

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ



ВІСНИК

**Східноукраїнського
національного університету
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**№ 1 (265)
2021**

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Сєвєродонецьк 2021

ВІСНИК

СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

№ 1 (265) 2021

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ЗАСНОВАНО У 1996 РОЦІ

ВИХІД З ДРУКУ - ДВНАДЦЯТЬ РАЗІВ НА РІК

Засновник

Східноукраїнський національний університет
імені Володимира Даля

Журнал зареєстровано

в Міністерстві юстиції України

Свідоцтво про державну реєстрацію

серія КВ № 15607-4079ПР

від 18.08.2009 р.

VISNIK

OF THE VOLODYMYR DAHL EAST
UKRAINIAN NATIONAL UNIVERSITY

№ 1 (265) 2021

THE SCIENTIFIC JOURNAL

WAS FOUNDED IN 1996

IT IS ISSUED TWELVE TIMES A YEAR

Founder

Volodymyr Dahl East Ukrainian National
University

Registered by the Ministry

of Justice of Ukraine

Registration Certificate

KB № 15607-4079ПР

dated 18.08.2009

Журнал включено до Переліків наукових фахових видань України (Наказ МОН № 886 02.07.2020 р.), (Наказ МОН №1188 24.09.2020 р.), (Наказ МОН №157 від 09.02.2021 р.) в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук з технічних (122, 131, 132, 133, 141, 151, 161, 273) та економічних (051, 073, 075) наук відповідно.

Журнал включено до Міжнародної наукометричної бази даних Index Copernicus International (ICV 2018: 59.34).

ISSN 1998-7927

Головна редакційна колегія:

Поркуян О.В., докт. техн. наук (голова редакційної колегії),

Галгаш Р.А., докт. екон. наук, (заступник голови
редакційної колегії),

Кудрявцев С.О., канд. техн. наук, (заступник голови
редакційної колегії),

Білобородова Т.О. канд. техн. наук,

Глікін М.А., докт. техн. наук,

Глікіна І.М., докт. техн. наук,

Горбунов М.І., докт. техн. наук,

Грицюк В.Ю., канд. техн. наук,

Д'яченко Ю.Ю., докт. екон. наук,

Ковтанець М.В., канд. техн. наук,

Кравченко К.О., канд. техн. наук,

Лорія М.Г., докт. техн. наук,

Ноженко В.С., канд. техн. наук,

Носко О.П., канд. техн. наук,

Проказа О.І., канд. техн. наук,

Семененко І.М., докт. екон. наук,

Сергієнко О.В., канд. техн. наук,

Скарга-Бандурова І.С., докт. техн. наук,

Соколов В.І., докт. техн. наук,

Суворін О.В., докт. техн. наук,

Целіщев О. Б., докт. техн. наук

Відповідальний за випуск: д.т.н., професор Соколов В.І.

Рекомендовано до друку Вченою радою Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Протокол № 8 від 26 лютого 2021 р.)

Матеріали номера друкуються мовою оригіналу.

© Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, 2021
© Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2021

ЗМІСТ

ТЕХНІЧНІ НАУКИ

Алтухов В.М. КОНТРОЛЬ ЗА ХАРАКТЕРОМ СТРУЖКИ ПРИ МЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ МАТЕРІАЛІВ В УМОВАХ ГНУЧКИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ.....	7
Єлісеєв П.Й. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ІНЖЕНЕРНОМУ ПРОЕКТУВАННІ	12
Заверкін А.В., Сергієнко О.В., Кузьменко С.В., Чередниченко С.П. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РІЗНИХ ФАКТОРІВ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНУВАННЯ ВАНТАЖНОЇ РОБОТИ НА ПІДВИЩЕННЯ ПЕРЕРОБНОЇ СПРОМОЖНОСТІ СОРТУВАЛЬНОЇ СТАНЦІ	20
Карпуук L.V., Davydenko N.O. MODELING IN AUTOCAD FOR BACHELORS	25
Каршук Л.В., Давіденко Н.О. ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ІНЖЕНЕРНІЙ ГРАФІЦІ	29
Кроль О.С. ОЦІНКА ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШПИНДЕЛЬНОГО ВУЗЛА БАГАТОЦІЛЬОВОГО ТОКАРНОГО ВЕРСТАТА В СЕРЕДОВИЩІ «АРМ WINMACHINE»	33
Кроль О.С., Жданок Г.М. ОЦІНКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМАЦІЙНОГО СТАНУ ШПИНДЕЛЯ БАГАТООПЕРАЦІЙНОГО ВЕРСТАТА	41
Купіна О.А., Лорія М.Г., Целішев О.Б. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БУДІВЕЛЬ	49
Ловська А.О., Фомін О.В. ВИЗНАЧЕННЯ СТІЙКОСТІ РІВНОВАГИ ВАГОНА-ПЛАТФОРМИ З УРАХУВАННЯМ ЦИКЛІЧНОСТІ ПОСТРІЛІВ З ЗЕНІТНИХ УСТАНОВОК, РОЗМІЩЕНИХ НА НЬОМУ	55
Логунів О.М. СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ МЕДОГОНКИ НА ПЛАТФОРМІ ARDUINO	60
Мелконов Г.Л. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ВІБРООБРОБКИ МАЛОЖОРСТКИХ ДЕТАЛЕЙ	64
Міщик А.В. РОЗВИТОК ВІБРАЦІЙНОЇ ОЗДОБЛЮВАЛЬНО-ЗАЧИЩУВАЛЬНОЇ ОБРОБКИ В СЕРЕДОВИЩІ ВІЛЬНИХ АБРАЗИВНИХ ГРАНУЛ	68
Могила В.І., Потапенко О.О., Кортєва О.В. ПІДВИЩЕННЯ ДОЛГОВІЧНОСТІ ВДОСКОНАЛЕНИХ ФРИКЦІЙНИХ АПАРАТІВ ВАНТАЖНОГО ПІВВАГОНА	75
Модестов В.Б. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗУСИЛЬ ЩО ДІЮТЬ НА РОБОЧИ ЕЛЕМЕНТИ ЗМІШУВАЧИВ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ	83
Модестов В.Б., Табунщиков В.Г. ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАНЕТАРНО-ШНЕКОВИХ ЗМІШУВАЧИВ	90
Ніколаєнко А.П., Шумакова Т.О. ІНЖЕНЕРНИЙ КОНСАЛТИНГ В СИСТЕМІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ВИРОБІВ	98
Ржецька Т.А., Бородіна А.В. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШКИ ПАСТИ СОРБИНОВОЇ КИСЛОТИ	108
Соколов В.І. ДИФУЗІЯ КРУГОВОГО ДЖЕРЕЛА В КАНАЛАХ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ	112

Табунщиків В.Г., Москалик В.М. ЦИРКУЛЯЦІЯ СИПКОГО МАТЕРІАЛУ В ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ РОБОЧИХ КАМЕРАХ ВІБРОПАРАТІВ	117
Тараненко Г.В. ДОСЛІДЖЕННЯ ВИТКАННЯ ГАЗУ З ОТВОРУ В ТАРІЛЦІ ПРОВАЛЬНОГО ТИПУ	124
Фомін О.В., Ловська А.О., Скуріхін Д.І., Бондаренко В.В. БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ХОДОВИХ ЧАСТИН ВАГОНІВ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ	128
Фомін О.В., Прокопенко П.М. КОМПЛЕКСНІ ВИПРОБУВАННЯ НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЙ ПАСАЖИРСЬКОГО ВАГОНА З ЗАКІНЧЕНИМ ПРИЗНАЧЕНИМ ТЕРМІНОМ СЛУЖБИ ЗАВОДОМ ВИРОБНИКОМ	133
Харламов Ю.О. ІМПУЛЬСНІ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ	138
Харламов Ю.О., Міцик А.В., Романченко О.В. ФОРМУВАННЯ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ	152
Харламов Ю.О., Романченко О.В., Міцик А.В. КОНТАКТНА ВЗАЄМОДІЯ ЧАСТИНОК З ПОВЕРХНЕЮ ОСНОВИ ПРИ ГАЗОТЕРМІЧНОМУ НАПИЛЕННІ	165
Черніков М.Г., Чернікова І.Д., Чернікова О.М., Гордєєв В.В. ЧАСОПРОЛІТНА МАС-СПЕКТРОМЕТРИЧНА УСТАНОВКА	174
Чернікова І.Д., Черніков М.Г., Чернікова О.М., Недобіга В.О. КВАНТОВИЙ ВИХІД ФОТОЕМІСІЇ І МЕТОДИ ЙОГО ВИМІРЮВАННЯ	178
Шабрацький С.В., Шабрацький В.І. ЗАСТОСУВАННЯ САМОУСМОКТУВАЛЬНИХ МІШАЛОК ПРИ СУЛЬФУВАННІ ВУГЛЕВОДНІВ	182
Шевченко О.В. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ БАРИЮ ТА ЦЕРІЮ НА ПРОЦЕС ГРАФІТИЗАЦІЇ ТА СТРУКТУРУ ФРИКЦІЙНОГО СІРОГО ЧАВУНУ	188
Шевченко О.В., Сергієнко О.В., Возлюблений Б.М. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МІКРОЛЕГУВАННЯ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ГАЛЬМІВНИХ КОЛОДОК	194
Шумакова Т.О., Ніколасенко А.П. ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВІБРАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ «ПРОБКА КУЛЬОВА»	201

ЕКОНОМІЧНІ НАУКИ

Гаврюшенко Г.В. ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ БЮДЖЕТІВ ОБ'ЄДНАНИХ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД В УМОВАХ ФІНАНСОВОЇ ДЕЦЕНТРАЛІЗАЦІЇ	214
---	-----

CONTENTS

TECHNICAL SCIENCES

Altukhov V.M. CONTROL AFTER CHARACTER OF SHAVING AT TOOLING OF MATERIALS IN THE CONDITIONS OF FLEXIBLE PRODUCTIVE SYSTEMS	7
Eliseyev P.J. SIMULATION MODELING IN ENGINEERING DESIGN.....	12
Zaverkin A.V., Serhiienko O.V., Kuzmenko S.V., Cherednychenko S.P. STUDY OF THE INFLUENCE OF DIFFERENT FACTORS OF FREIGHT OPERATIONS CALENDAR PLANNING TO INCREASE THE REPROCESSING ABILITY OF THE SORTING STATION	20
Karpyuk L.V., Davydenko N.O. MODELING IN AUTOCAD FOR BACHELORS	25
Karpyuk L.V., Davydenko N.O. INFORMATION TECHNOLOGIES IN ENGINEERING GRAPHICS.....	29
Krol O.S. ESTIMATION OF SPINDLE NODE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A MULTIPURPOSE TURNING MACHINE IN THE APM WINMACHINE ENVIRONMENT	33
Krol O.S., Zhdanok G.M. ESTIMATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE MULTIOPERATION MACHINE SPINDLE.....	41
Kupina O.A., Loriya M.G., Tselishev O.B. COMPARATIVE ANALYSIS OF EXISTING METHODS OF INCREASING BUILDINGS ENERGY SUPPLY INDICATORS	49
Lovska A.O., Fomin O.V. DETERMINATION OF THE STABILITY OF THE EQUILIBRIUM WAGON-PLATFORM TAKING INTO ACCOUNT THE CYCLICITY OF SHOOTERS FROM ANTI-AGENCY PLACES PLACED ON IT.....	55
Logunov O.M. HONEYCOMB ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEM ON ARDUINO PLATFORM	60
Melkonov H.L. RESEARCH OF PROCESSES OF VIBRATION PROCESSING OF SMALL PARTS.....	64
Mitsyk A.V. DEVELOPMENT OF VIBRATION FINISHING AND CLEANING IN THE ENVIRONMENT OF FREE ABRASIVE GRANULES.....	68
Mogila V.I., Potapenko O.O., Kortieva O.V. INCREASE DURABILITY IMPROVED FRICTIONAL DEVICES OF THE FREIGHT GONDOLA CAR.....	75
Modestov V.B. RESEARCH ON LOAD THAT ACTS ON THE WORKING ELEMENTS OF BULK MATERIAL MIXERS.....	83
Modestov V.B., Tabunschikov V.G. RESEARCH OF PLANETARY-SCREW MIXERS.....	90
Nikolaienko A.P., Shumakova T.O. ENGINEERING CONSULTING IN THE PRODUCT QUALITY ASSURANCE SYSTEM.....	98
Rzhetska T.A., Borodina A.V. RESEARCH OF THE DRYING PROCESS OF SORBIC ACID PASTE	108
Sokolov V.I. CIRCULAR SOURCE DIFFUSION IN CHANNELS OF VENTILATION SYSTEMS	112
Tabunshchikov V.G., Moskalyk V.M. CIRCULATION OF BULK MATERIAL IN HORIZONTAL CYLINDRICAL WORKING CHAMBER OF VIBRATORS.....	117
Taranenko G.V. INVESTIGATION OF GAS OUTFLOW FROM HOLE IN THE DUAL-FLOW PLATE.....	124

Fomin O.V., Lovska A.O., Skurikhin D.I., Bondarenko V.V. MULTI-FUNCTIONAL DEVICE FOR MONITORING OF THE TECHNICAL CONDITION OF RUNNING GEARS OF WAGONS DURING OPERATION.....	128
Fomin O.V., Prokopenko P.M. COMPLEX TESTING OF THE CARRIER CONSTRUCTIONS OF THE PASSENGER WAGON WITH THE DEFINED DESIGNATED SERVICE PERIOD OF THE PLANT MANUFACTURER	133
Kharlamov Y.O. PULSED COMBUSTION CHAMBERS	138
Kharlamov Y.O., Mitsyk A.V., Romanchenko O.V. FORMATION OF THERMAL SPRAY COATINGS	152
Kharlamov Y.O., Romanchenko O.V., Mitsyk A.V. ON THE POSSIBILITY OF USING OF METAL PARTICLES OXIDATION IN-FLIGHT DURING THERMAL SPRAYING	165
Chernikov M.G., Chernikova I.D., Chernikova O.M., Gordieiev V.V. TIME OF FLIGHT MASS SPECTROMETRIC INSTALLATION	174
Chernikova I.D., Chernikov M.G., Chernikova O.M., Nedobega V.O. PHOTOEMISSION QUANTUM OUTPUT AND METHODS OF ITS MEASUREMENT	178
Shabratsky S.V., Shabratsky V.I. THE USE OF SELF- SUCTION MIXERS IN THE SULFONATION OF HYDROCARBONS.....	182
Shevchenko O.V. STUDY OF THE INFLUENCE OF BARIUM AND CERIUM ON THE GRAPHITIZATION PROCESS AND THE STRUCTURE OF FRICTION GRAY CAST IRON	188
Shevchenko O.V., Serhiienko O.V., Vozliublenyi B.M. STUDY OF THE MICRO-ALLOYING INFLUENCE ON THE WEAR RESISTANCE OF BRAKE PADS	194
Shumakova T.O., Nikolaienko A.P. INCREASE OF PERFORMANCE OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF VIBRATION TREATMENT OF DETAILS «BALL CORK»	201

ECONOMIC SCIENCES

Gavrushenko G.V. FEATURES OF FORMATION OF BUDGETS OF UNITED TERRITORIAL COMMUNITIES IN THE CONDITIONS OF FINANCIAL DECENTRALIZATION.....	214
---	-----

ТЕХНІЧНІ НАУКИ

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-7-11>

УДК 621.941

КОНТРОЛЬ ЗА ХАРАКТЕРОМ СТРУЖКИ ПРИ МЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ МАТЕРІАЛІВ В УМОВАХ ГНУЧКИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ

Алтухов В.М.

CONTROL AFTER CHARACTER OF SHAVING AT TOOLING OF MATERIALS IN THE CONDITIONS OF FLEXIBLE PRODUCTIVE SYSTEMS

Altukhov V.M.

У статті розглянуто питання контролю за характером стружки при механічній обробці. Актуальним для гнучких виробничих систем є контроль виду стружки в процесі точіння. При безлюдній технології важливо, щоб при точінні заготовці була подрібнена стружка.

Сигнали акустичної емісії несуть інформацію про процеси, при яких вони утворюються і можуть бути використані для контролю процесу різання в умовах автоматизованого виробництва. Розглянута пропозиція вести контроль виду стружки по змінній складовій сигналів акустичної емісії. Показано, як змінюється змінна складова амплітуди сигналів акустичної емісії при утворенні зливної стружки і стружки надлому в умовах точіння високоякісної середньолегованої сталі 30ХГСА, нержавіючої сталі 20Х13, титанового сплаву ВТ14.

Ключові слова: матеріал, стружка, точіння, акустична емісія, інструмент, різання.

Вступ. При механічній обробці деталей в умовах гнучких виробничих систем і повній автоматизації процесів механічної обробки (безлюдна технологія) проблемою є контроль за характером стружки з метою забезпечення надійного стружкодроблення. Вид стружки залежить від багатьох параметрів (опрацьований матеріал, ріжучий інструмент, режими різання, стружколама тощо) [1, 2, 3].

При обробці багатьох матеріалів (сталь, кольорові метали і сплави) на токарних операціях утворюється зливна стружка, що може привести до намотування стружки на деталь, і при автоматичному переустановленні заготовки не буде забезпечуватися надійне закріплення деталі в патроні.

Постановка проблеми. На машинобудівних підприємствах завчасно проводять дослідження з визначення виду стружки при різних умовах механічної обробки і складають таблиці, в яких вказують вид стружки для відповідного оброблюваного матеріалу, ріжучого інструменту, режимів різання при токарній обробці.

Контроль характеру стружки при механічній обробці в умовах автоматизованого виробництва є актуальним. Ставиться задача теоретично проаналізувати процес різання щодо виявлення сигналів із зони різання, які можуть нести інформацію про характер стружки, потім практично перевірити його в умовах механічної обробки декількох матеріалів, при точінні яких можуть утворюватися різні види стружки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зрізані стружки мають різний вигляд і форму, що залежать від хімічного складу, структурного стану і механічних властивостей оброблюваних металів і сплавів, товщини зрізаного шару, значення переднього кута γ ріжучого інструменту, швидкості різання і інших менш впливових чинників [1].

Дослідники розділяють усі види стружки по зовнішньому вигляду і будові на три основні типи: стружка зливна; стружка сколювання і стружка надлому [1, 2].

Гнучкі виробничі системи є найбільш передовими і використовуються при автоматизації багатонomenclатурного виробництва. Вони дозволяють підвищити якість оброблюваної деталі, скоротити потребу в робочій силі, необхідну кількість технологічного оснащення і витрати при обробці іншої заготовки.

Основним устаткуванням, що використовується в ГПС, є верстати з ЧПУ, зокрема токарні. Стабільність ходу технологічного процесу в основному залежить від процесу стружкоутворення, зокрема, від виду і розмірів отриманої стружки. При безлюдній технології виникає необхідність забезпечення безперервного утворення стружки, що не заважає автоматичному циклу виробництва.

Характер стружкоутворення істотно впливає на надійність, стабільність процесу металообробки і можливість використання автоматизованого устат-

кування і безлюдної технології. Статистичні дослідження показали, що більше 60 % усіх випадків втручання оператора для поточної підтримки працездатності металорізального устаткування, пов'язано саме із стружкою [2]. Наприклад, виникнення при обробці неконтрольованої зливної стружки представляє серйозні незручності: стружка намотується на елементи технологічної системи верстат-приспособлення-інструмент-деталь; стружка викликає збої систем автоматичного виміру розмірів оброблюваної деталі і контролю стану ріжучого інструменту; стружка дряпає оброблену поверхню деталі і збільшує величину шорсткості; стружку складно збирати і транспортувати; стружка представляє загрозу для здоров'я персоналу; стружка ускладнює функціонування робототехнічних завантажувальних і інших допоміжних пристроїв тощо [2].

Мета статті. В рамках даної роботи ставилася задача виявити сигнал із зони різання при точінні, який може давати інформацію про характер стружки.

Результати досліджень. Використання в сучасному машинобудуванні автоматизованих виробництв, верстатів з ЧПУ і "безлюдних" технологій зробило актуальною проблему управління процесом стружкоутворення.

В процесі різання може бути зміна виду стружки із переривчастої (іншими словами – стружка надлому) на зливну і навпаки.

Дослідження [3] показали, що при обробці жароміцних сплавів на нікелевій основі твердосплавним інструментом відбувається зміна виду стружки зі зливної на елементну і навпаки, що було використано для розробки способу визначення оптимальної швидкості різання.

В процесі механічної обробки заготовок генеруються сигнали акустичної емісії (АЕ).

Сучасний погляд на процес зародження сигналів АЕ свідчить про те, що має поширення теорія, яка розглядає процес утворення АЕ як результат розмноження дефектів кристалічної решітки і руху дислокацій (лінійних дефектів) в металі або сплаві, який деформується при різанні. Ці процеси обумовлені розривами або відновленням атомних зв'язків.

Сигнали АЕ залежать від кінематики процесу різання (точіння, свердління, фрезерування, протягування тощо), режимів різання (швидкості різання, подачі, глибини різання), температури зони різання, оброблюваного та інструментального матеріалів тощо. При змінюванні такого роду умов процесу механічної обробки відбувається зміна постійної складової амплітуди сигналів АЕ.

Сигнали АЕ, генеровані при точінні різних матеріалів, несуть інформацію про процеси, що їх породжують в процесі різання, у тому числі, і утворення стружки.

Порівнюючи параметри сигналів АЕ, що генеруються в процесі різання при утворенні зливної і переривчастої стружки, можна відзначити, що усереднена амплітуда сигналів АЕ буде відрізнятися

величиною змінної складової амплітуди. Ця різниця зумовлена наявністю при формуванні стружки надлому великого числа мікротріщин, що утворюються по площинах зсуву, які є додатковими джерелами сигналів АЕ, які за величиною амплітуди відрізняються від сигналів, що генеруються при утворенні зливної стружки.

Тому величина змінної складової амплітуди сигналів АЕ при отриманні в процесі механічної обробки стружки надлому має значно більшу величину, ніж при утворенні зливної стружки.

Процес формування зливної стружки відрізняється від процесу формування стружки надлому. При формуванні стружки надлому утворюється по площинах зсуву велика кількість мікротріщин, які є додатковими джерелами сигналів акустичної емісії.

Проводилися експериментальні дослідження по вивченню впливу форми стружки при механічній обробці заготовок на параметри сигналів АЕ.

Діапазон частот реєстрації сигналів АЕ був прийнятий рівним 0,1-0,3 МГц.

На рис. 1 показані п'єзоелектричні датчики, які дозволяють зареєструвати сигнали АЕ, що генеруються в процесі різання.

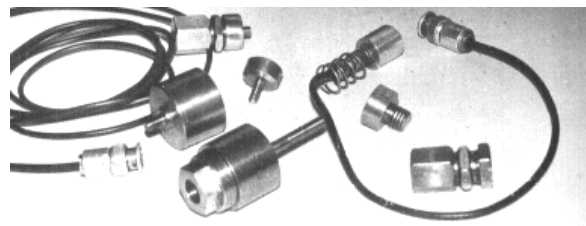


Рис. 1. Види датчиків, що застосовуються для реєстрації сигналів акустичної емісії

Датчики можна встановлювати на ріжучий інструмент, різцетримач, оброблювану деталь, станину верстата тощо. З метою підвищення точності вимірів потрібно прагнути встановити датчик ближче до зони різання.

Експерименти проводилися на верстаті моделі 16К20. На рис. 2 показана установка датчика на різцетримачі верстата.

Під час обробки прохідним різцем заготовок з різних матеріалів спостерігалася форма утвореної стружки і записувалася амплітуда сигналів АЕ на стрічці самописця.

На рис. 3 представлена форма стружки при обробці титанового сплаву ВТ14 прохідним різцем з твердого сплаву марки ВК6М. Геометричні параметри ріжучої частини різця: передній кут $\gamma = 0^\circ$; задній кут $\alpha = 11^\circ$; головний кут в плані $\phi = 45^\circ$; допоміжний кут в плані $\phi_1 = 45^\circ$.

Режими різання: швидкість різання $V = 1,65$ м/с, глибина різання $t = 0,25$ мм, мастильно-охолоджуюча рідина – 5 % розчин емульсолу товарного.

При подачі $S_0 = 0,07$ мм/об спостерігалася зливна стружка, а при подачі $S_0 = 0,14$ мм/об – стружка надлому.

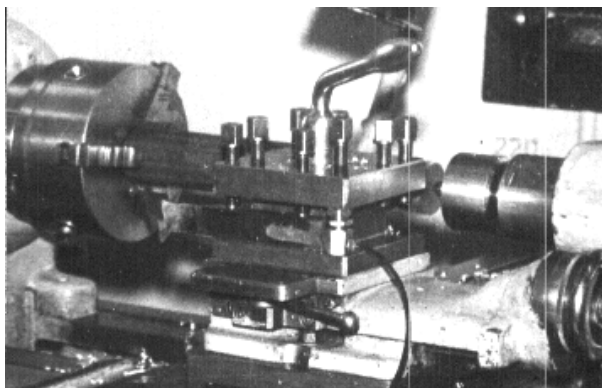


Рис. 2. Схема установки датчика на різцетримач

Фрагмент стрічки із записом амплітуди сигналів АЕ для цих умов різання показані на рис. 4: 1 – при утворенні зливної стружки; 2 – при утворенні стружки надлому.

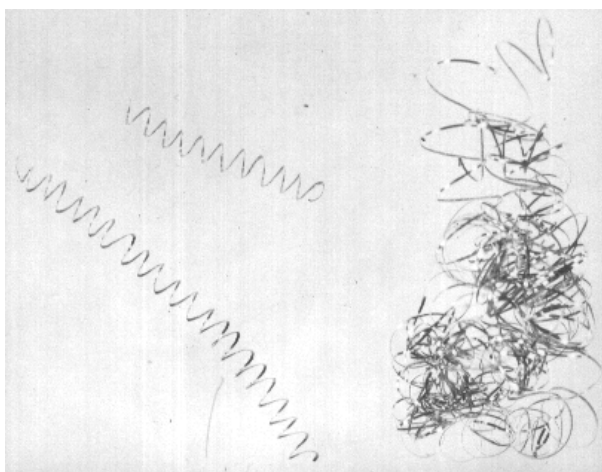


Рис. 3. Форма стружки при точінні титанового сплаву ВТ14 прохідним різцем з твердого сплаву марки ВК6М (при подачі $S_0 = 0,07$ мм/об – зливна стружка; при подачі $S_0 = 0,14$ мм/об – стружка надлому)

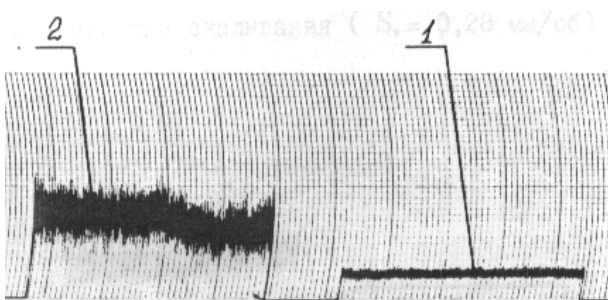


Рис. 4. Фрагменти стрічок із записом амплітуди сигналів АЕ при обробці титанового сплаву ВТ14 різцем з твердого сплаву марки ВК6М:
1 – подача $S_0 = 0,07$ мм/об (зливна стружка);
2 – подача $S_0 = 0,14$ мм/об (стружка надлому)

На рис. 5 представлена форма стружки при обробці сталі 30ХГСА прохідним різцем з твердого сплаву марки ВК6ОМ. Режими різання: швидкість різання $V = 4,08$ м/с, глибина різання $t = 0,5$ мм, без охолодження. Геометричні параметри ріжучої частини різця: передній кут $\gamma = 0^\circ$; задній кут $\alpha = 11^\circ$; головний кут в плані $\varphi = 45^\circ$; допоміжний кут в плані $\varphi_1 = 45^\circ$. При подачі $S_0 = 0,05$ мм/об спостерігалася зливна стружка, а при подачі $S_0 = 0,2$ мм/об – стружка надлому.

Фрагмент стрічки із записом амплітуди сигналів АЕ для цих умов різання показані на рис. 6: 1 – при утворенні зливної стружки; 2 – при утворенні стружки надлому.

На рис. 7 представлена форма стружки при обробці нержавіючої сталі 20Х13 прохідним різцем з твердого сплаву марки Т15К6.



Рис. 5. Форма стружки при обробці сталі 30ХГСА прохідним різцем з твердого сплаву марки ВК6ОМ (при подачі $S_0 = 0,05$ мм/об – зливна стружка, при подачі $S_0 = 0,2$ мм/об – стружка надлому)

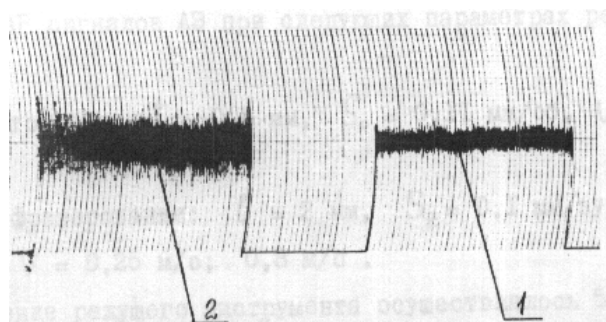


Рис. 6. Фрагмент стрічки із записом амплітуди сигналів АЕ при обробці сталі 30ХГСА прохідним різцем з твердого сплаву марки ВК6ОМ:
1 – подача $S_0 = 0,05$ мм/об (зливна стружка);
2 – подача $S_0 = 0,2$ мм/об (стружка надлому)

Геометричні параметри ріжучої частини різця: передній кут $\gamma = 0^\circ$; задній кут $\alpha = 11^\circ$; головний кут в плані $\varphi = 45^\circ$; допоміжний кут в плані $\varphi_1 = 45^\circ$. Режими різання: швидкість різання $V = 2,34$ м/с, глибина різання $t = 2$ мм, без охолодження.

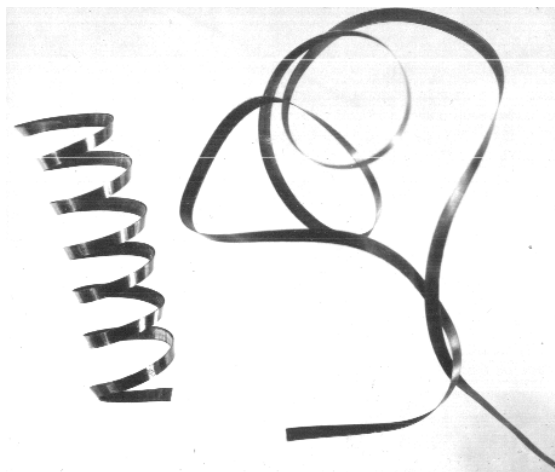


Рис. 7. Форма стружки при обробці нержавіючої сталі 20X13 прохідним різцем з твердого сплаву марки Т15К6 (при подачі $S_0 = 0,07$ мм/об – зливна стружка, при подачі $S_0 = 0,28$ мм/об – стружка надлому)

При подачі $S_0 = 0,07$ мм/об спостерігалася зливна стружка, а при подачі $S_0 = 0,28$ мм/об – стружка надлому.

Фрагмент стрічки із записом амплітуди сигналів АЕ для цих умов різання показані на рис. 8: 1 – при утворенні зливної стружки; 2 – при утворенні стружки надлому.

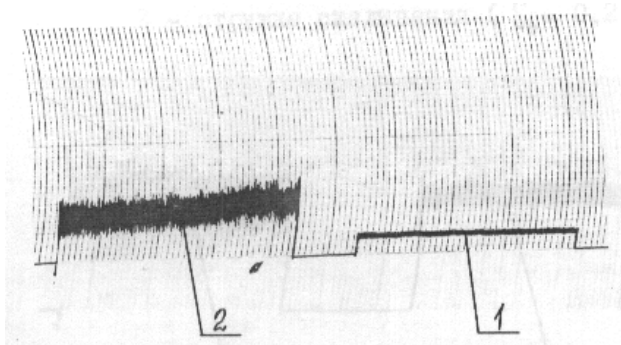


Рис. 8. Фрагмент стрічки із записом амплітуди сигналів АЕ при обробці нержавіючої сталі 20X13 прохідним різцем з твердого сплаву марки Т15К6: 1 – подача $S_0 = 0,07$ мм/об (зливна стружка); 2 – подача $S_0 = 0,28$ мм/об (стружка надлому)

Проведені експерименти показали, що змінна складова амплітуди сигналів акустичної емісії має для зливної стружки в 2-5 разів меншу величину, ніж для стружки надлому.

Можна зробити висновок про те, що характер стружки можна контролювати за величиною змінної складової амплітуди сигналів акустичної емісії.

У процесі механічної обробки генеруються сигнали акустичної емісії, головними джерелами яких вважають процеси ковзання і руйнування в кристалах і скупченнях кристалів, руху дислокацій і зламів, релаксації пружної матриці при русі дислокацій, структурно-фазові перетворення. Сигнали АЕ несуть певну інформацію про процесах, що їх поро-

джують, і можуть застосовуватися для діагностики та оптимізації процесів механічної обробки.

Блок-схема системи контролю характеру стружки в процесі механічної обробки металів та сплавів показана на рис. 9.

Система контролю характеру стружки в процесі механічної обробки металів та сплавів працює наступним чином.

Сигнали АЕ, що генеруються в зоні різання, уловлюються датчиком. Далі вони перетворюються п'єзоелектричним датчиком в електричний сигнал, який подається на вхід попереднього підсилювача. Посилений сигнал проходить селекцію по частоті в фільтрі, де відсікаються перешкоди (шуми) системи верстат-притосовування-інструмент-деталь. Далі сигнал надходить в підсилювач, який підсилює змінну складову амплітуди сигналів АЕ, після чого сигнали надходять в відеодетектор, який виділяє огинаючу сигналів АЕ. Потім сигнали надходять в логічний блок, де задавач рівня задає величину змінної складової амплітуди, а компаратор при отриманні цієї величини менше заданої, що свідчить про появу зливної стружки, подає сигнал на блок управління для прийняття рішення про подальше проведення процесу різання.

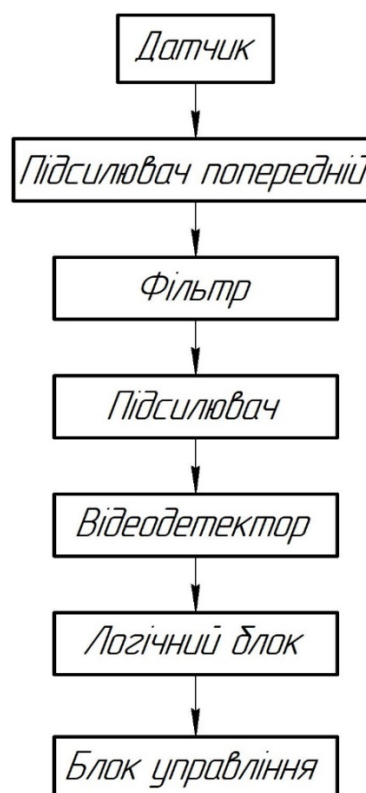


Рис. 9. Блок-схема системи контролю характеру стружки

Подальшою дією може бути, наприклад, дана команда на зміну величини подачі або зупинка процесу різання. Також можна дати команду на виклик оператора.

Висновки. Таким чином, показано, що сигнали АЕ, які генеруються в зоні різання, несуть певну інформацію про процеси, що їх породжують.

При порівнянні параметрів сигналів АЕ, що генеруються в процесі різання при утворенні зливної і переривчастої стружки, можна відзначити, що усереднена амплітуда сигналів АЕ буде відрізнятися величиною змінної складової амплітуди.

Величина змінної складової амплітуди сигналів АЕ при отриманні в процесі механічної обробки сталей 30ХГСА, 20Х13, титанового сплаву ВТ14 стружки надлому має величину, в 2-5 разів більшу, ніж при утворенні зливної стружки (для вибраної пари: оброблюваний матеріал – інструмент).

Л і т е р а т у р а

1. Шапко А. В. Методы дробления сливной стружки. Инженерно-педагогическое образование в XXI веке: материалы VIII Республиканской научно-практической конференции молодых ученых и студентов БНТУ (Минск, 17-18 мая 2012 г). Минск: БНТУ, 2012. Ч. 1. С. 132-135.
2. Волгин М. В., Аверьянов И. Н. Влияние режимов резания на стружкообразование при использовании сменных многогранных неперетачиваемых пластин. Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров: материалы 65-й Международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров, Международного научного симпозиума «Автотракторостроение – 2009». Москва: МГТУ «МАМИ», 2009. С. 97-98.
3. Способ определения оптимальной скорости резания: пат. 2658559 Российская Федерация: МПК6 В23В 1/00. № 2017119585, заявл. 05.06.2017, опубл. 21.06.2018, Бюл. № 18. 11 с.

References

1. Shapko A. V. Metody drobleniya slivnoi struzhki. Inzhenerno-pedagogicheskoe obrazovanie v XXI veke: materialy VIII Respublikanskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh i studentov BNTU (Minsk, 17-18 maya 2012 g). Minsk: BNTU, 2012. Ch. 1. S. 132-135.
2. Volgin M. V., Averyanov I. N. Vliyaniye rezhimov rezaniya na struzhkoobrazovanie pri ispolzovanii smennykh mnogogrannykh neperetachivaemykh plastin. Priorityety razvitiya otechestvennogo avtotraktoro-stroeniya i podgotovki inzhenernykh i nauchnykh kadrov: materialy 65-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii Assotsiatsii avtomobilnykh inzhenerov, Mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma «Avtotrakto-rostroenie – 2009». Moskva: MGTU «MAMI», 2009. S. 97-98.
3. Sposob opredeleniya optimalnoi skorosti rezaniya: pat. 2658559 Rossiiskaya Federatsiya: MPK6 V23V 1/00. № 2017119585, zayavl. 05.06.2017, opubl. 21.06.2018, Byul. № 18. 11 s.

Алтухов В.Н. Контроль за характером стружки при механической обработке материалов в условиях гибких производственных систем.

В статье рассмотрен вопрос контроля за характером стружки при механической обработке. Актуальным для гибких производственных систем является контроль

вида стружки в процессе точения. При безлюдной технологии важно, чтобы при точении заготовки была дроблёная стружка. Сигналы акустической эмиссии несут информацию о процессах, при которых они образуются и могут быть использованы для контроля процесса резания в условиях автоматизированного производства. Рассмотрено предложение вести контроль вида стружки по переменной составляющей сигналов акустической эмиссии. Показано изменение переменной составляющей амплитуды сигналов акустической эмиссии при образовании сливной стружки и стружки надлома в условиях точения высококачественной среднелегированной стали 30ХГСА, нержавеющей стали 20Х13, титанового сплава ВТ14.

Ключевые слова: материал, стружка, точение, акустическая эмиссия, инструмент, резание.

Altukhov V. M. Control after character of shaving at tooling of materials in the conditions of flexible productive systems.

The article discusses the issue of control over the nature of the chips during machining in continuous cutting conditions. Controlling the type of chips during the turning process is relevant for flexible production systems. With unmanned technology, it is important that there is crushed chips when turning the workpiece. When machining many materials (steel, non-ferrous metals and alloys), overflow chips are generated in turning operations. This can lead to winding of chips on the part, and when automatically resetting the workpiece, the part will not be securely fastened in the chuck. Then the workpiece will fall out of the clamp. During the machining of workpieces, acoustic emission signals are generated. The modern view of the process of generation of acoustic emission signals indicates that the theory is widespread, which considers the process of generation of acoustic emission signals as a result of the multiplication of crystal lattice defects and the movement of dislocations (linear defects) in a metal or alloy, which is deformed during cutting. Acoustic emission signals generated during the turning of various materials carry information about the processes in which they occur during the cutting process, including the receipt of chips. Comparing the parameters of the acoustic emission signals that are generated during the cutting process when receiving drained and crushed shavings, it can be noted that the average amplitude of the acoustic emission signals will differ in the value of the variable amplitude component. This difference is due to the presence of a large number of microcracks during chip formation, which are formed along shear planes, which are additional sources of acoustic emission signals, which differ in amplitude from the signals generated during the formation of drain chips. A proposal to monitor the type of chips by the variable component of acoustic emission signals is considered. The change in the variable component of the amplitude of the acoustic emission signals during the formation of drain chips and fracture chips under the conditions of turning high-quality medium-alloy steel 30ХГСА, stainless steel 20Х13, titanium alloy ВТ14 is shown. A block diagram of a system for controlling the nature of chips in the process of machining metals and alloys has been developed.

Keywords: material, shaving, sharpening, acoustic emission, instrument, cutting.

Алтухов В'ячеслав Миколайович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) VAdivli11@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-12-19>

УДК 66-5:51-74

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ІНЖЕНЕРНОМУ ПРОЕКТУВАННІ

Єлісеєв П.Й.

SIMULATION MODELING IN ENGINEERING DESIGN

Eliseyev P.J.

У статті обґрунтовано застосування імітаційного моделювання під час проектування технологічної схеми установки, яка реалізує процес знешкодження стічних вод, що містять розчинні органічні сполуки. Розглянуто етапи проектування, що потребують використання математичних моделей різного виду (статичних та динамічних). Надана докладна розрахункова схема, що застосована для аналізу динамічних властивостей окремих апаратів у складі технологічних ланцюгів. Наведено критерії для аналізу кожної динамічної характеристики, а також результати моделювання та їхня графічна інтерпретація.

Ключові слова: імітаційне моделювання, статична та динамічна математична модель, проектування, технологічна схема.

Вступ. Сучасний стан розвитку науки, техніки і технології висувають жорсткі вимоги до розробки та впровадження нових виробництв. Ці вимоги стосуються практично всіх етапів, починаючи з наукових досліджень і закінчуючи проектуванням та будівництвом. В першу чергу, дуже жорстко обмежується час розробки. Відповідно, зникає можливість кількісних повторних досліджень у випадку помилкових рішень. Ефективним виходом є широке застосування новітніх методів комп'ютерного моделювання та проектування.

Постановка проблеми. Проектні роботи складають значну частину загальних витрат на розробку та побудову сучасного технологічного виробництва. Це стосується як матеріальних затрат, так і витрат часу на розробку. Тому пошук ефективних методів розробки, випробування та аналізу проектних рішень є важливим завданням, актуальність якого постійно зростає.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним з найбільш системних викладень основних питань, що пов'язані з побудовою реальних систем, проведенням експериментів з моделями та керуванням цими експериментами, є книга Шеннона [1]. В ній докладно розглядаються принципи імітаційного моделювання, аналіз основних помилок, що допус-

каються при вивченні систем за допомогою моделей, підготовка вхідних даних та інтерпретація результатів експериментів.

Імітаційне моделювання використовується в проектних роботах різного рівня та області застосування, таких як розробка автоматичних систем керування котлоагрегатом [2], застосуванням для проектування та наступної оптимізації виробничої лінії [3], моделювання та дослідження автоматизованих систем керування і диспетчеризації технологічних процесів [4], а також в системах оптимального керування логістикою аграрних вантажів [5].

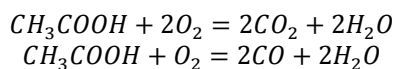
Мета статті. Показати високу ефективність імітаційного моделювання при комплексному застосуванні моделей різного типу. Це дає можливість аналізувати результати проектування за різноманітними критеріями і, таким чином, перевіряти найбільш важливі проектні рішення.

Матеріали досліджень. Розробка та впровадження технологічних виробництв, що виконуються сучасними інжиніринговими фірмами, включає максимально широкий охват робіт – від передпроектних розробок до побудови та запуску виробництва. Це дає можливість забезпечити комплексність розробки, підвищити глибину проробки окремих частин технічних рішень, а також детально перевірити їхню правильність та ефективність.

Розглянемо перспективну технологію, що присвячена вирішенню важливої екологічної проблеми – знешкодження залишків хімічного виробництва, що містять різноманітні органічні сполуки. При цьому, можливість розділення суміші залишків на окремі первинні речовини не розглядається, оскільки концентрації окремих складових у суміші малі і їхнє розділення економічно недоцільне [6].

Технологія знешкодження рідких органічних відходів здійснюється із рідкими реагентами-відновлювачами на каталізаторі. Рідина вводиться в реактор безпосередньо в шар псевдозрідженого каталізатора.

Процес описується наступними сумарними рівняннями на прикладі оцтової кислоти:



Тепло реакції окиснення використовується для випару рідини й нагрівання реагентів.

Технологія термокаталітичного окиснення органічних речовин у реакторі із псевдозрідженим шаром каталізатора дозволяє ефективно знешкоджувати промислові стічні води, що забруднені органічними сполуками. Окиснення органічних складових стічних вод відбувається до утворення термодинамічно стійких продуктів: діоксиду вуглецю й води.

На першому етапі проектування виділяються окремі функціональні підсистеми, що забезпечують одержання мети. При цьому вирішується завдання узгодження матеріальних потоків між підсистемами за умови збереження технологічних режимів суміжних підсистем.

Промислові умови проведення реакції:

- суміш 80% розчину оцтової кислоти з метанолом окислюється на каталізаторі (міднохромові каталізатори, що нанесені на сферичний оксид алюмінію) киснем повітря;
- температура на вході до реактору $t = 450 [^{\circ}C]$;
- тиск у реакторі $P_{роб} = 1 [МПа]$.

Виходячи з умов проведення реакції, технологічна схема процесу повинна включати три основні блока (рис. 1), що з'єднані послідовно:

- компресійний блок;
- блок підігріву технологічних потоків;
- реакційний блок.

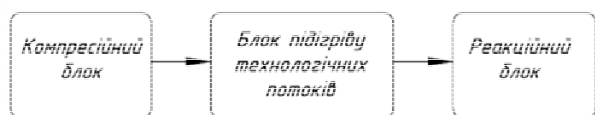


Рис. 1. Блок-схема технологічного процесу

Атмосферне повітря відбирається із зовнішнього середовища та доводиться у компресійному блоці до тиску $P_{роб} = 1 [МПа]$. Далі стиснуте повітря над-

ходить до блоку підігріву технологічних потоків, де димовими газами нагрівається до температури близько $450 [^{\circ}C]$. Нагрітий газовий потік разом з гранульованим каталізатором та рідким розчином кислоти надходять до реакторного блоку, де відбувається реакція знешкодження органічних сполук. Утворені діоксид вуглецю та водяна пара, а також незначна частка каталізатору виносяться з реакційної зони.

Відповідно до блок-схеми технологічного процесу та промислових умов необхідно побудувати технологічну схему промислової установки [7,8].

На цьому етапі проектування отримуємо конструктивні параметри апаратів, що складають технологічну схему (рис. 2). Таким чином одержуємо статичні математичні моделі конкретних апаратів і технологічної схеми в цілому.

Основні апарати:		
1	–	компресор першого ступеня;
2	–	проміжний холодильник;
3	–	компресор другого ступеня;
4	–	ресивер;
5	–	підігрівач повітря;
6	–	реактор.
Технологічні потоки:		
П1	–	атмосферне повітря на вході компресора;
П2	–	повітря з виходу першого ступеня компресора на вхід проміжного холодильника;
П3	–	вхід охолоджувальної води в проміжний холодильник;
П4	–	вихід охолоджувальної води з проміжного холодильника;
П5	–	повітря з виходу проміжного холодильника на вхід другого ступеня компресора;
П6	–	повітря з виходу другого ступеня компресора на вхід ресивера;
П7	–	повітря з виходу ресивера на вхід підігрівача повітря;
П8	–	вхід димових газів у підігрівач повітря;
П9	–	вихід димових газів з підігрівача повітря;
П10	–	повітря з виходу підігрівача повітря на вхід реактора;
П11	–	подача рідкого агента в реактор;
П12	–	подача каталізатора в реактор;
П13	–	вихід продукту з реактора.

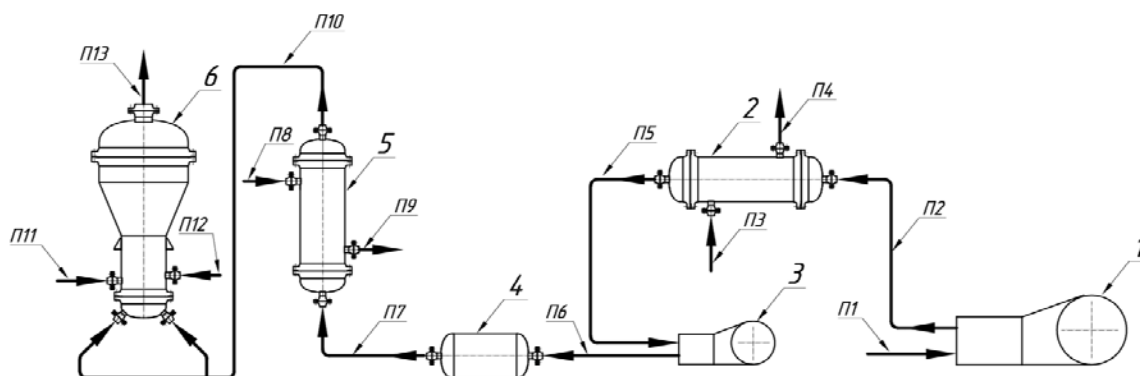


Рис. 2. Технологічна схема установки

Статичні моделі дають можливість одержати значення вихідних параметрів технологічного об'єкта (наприклад, температура технологічного потоку, його тиск тощо) за їхнім значенням на вході об'єкта.

Але для переходу від розрахункового опису за статичними математичними моделями технологічної схеми до оцінки роботи її реальної схеми, необхідно зробити перевірку взаємодії окремих частин схеми у реальному часі. Тобто необхідно зробити аналіз взаємодії окремих частин схеми (технологічних апаратів) з урахуванням їх динамічних властивостей, таких як коливальність, інерційність тощо.

У даному випадку, обов'язкової перевірки динамічних властивостей потребує ресивер – апарат 4 на технологічній схемі установки (рис. 2). Ресивер – це герметична ємність, однією з основних функцій якої є вирівнювання тиску у разі нерівномірної витрати або надходження газу. У даному випадку ресивер встановлено на виході толокового компресора, з виходу якого надходить стисле повітря. З огляду на принцип роботи толокового компресора очевидно, що тиск повітря на його виході є величиною змінною і має характер періодичної ступінчастої функції. Ресивер має згладити тиск повітря та забезпечити його рівномірну витрату для нормальних умов роботи подальшої частини технологічної схеми.

Розробка динамічної моделі ресивера. Для перевірки здатності ресивера щодо згладжування та стабілізації параметрів повітря, побудуємо математичну модель ресивера, яка буде нашим об'єктом дослідження. Процес згладжування параметрів повітря відбувається у часі, тому час має бути одним з параметрів динамічної математичної моделі.

В якості метода розробки моделі обрано метод аналітичного моделювання, а саме, розробка динамічної моделі у формі диференціальних рівнянь [9].

За основу математичної моделі ресивера узяті рівняння матеріального балансу:

$$dm_1 = dm_V + dm_2, \quad (1)$$

де dm_1 – маса газу, що подається в ресивер;

dm_V – маса газу, що накопичується в ресивері об'ємом V ;

dm_2 – маса газу, що відводиться з ресиверу.

Напишемо рівняння (1) в технологічних змінних.

$$dm_1 = F_1 \cdot dt,$$

де F_1 – масова витрата газу на вході ресиверу $\left[\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right]$;

dt – зміна часу [с].

$$dm_V = V \cdot d\rho,$$

де V – об'єм ресиверу $[\text{м}^3]$;

$d\rho$ – зміна густини газу в ресивері, що викликана зміною тиску $\left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right]$.

Для технічних розрахунків цілком достатню точність у визначенні густини газу забезпечує рівняння ідеального газу Клапейрона-Менделєєва.

$$d\rho = \frac{M}{R \cdot T} \cdot dP = \frac{1}{R_r \cdot T} \cdot dP,$$

де M – молярна маса газу;

P – тиск [Па];

R – універсальна газова стала;

R_r – газова стала,;

T – абсолютна температура $[\text{°K}]$.

$$dm_2 = F_2 \cdot dt.$$

Витрата газу на виході ресиверу може бути визначена таким чином

$$F_2 = \frac{\alpha_2 \cdot C \cdot S_2 \cdot P}{\sqrt{R_r \cdot T}},$$

де α_2 – коефіцієнт витікання газу через регулюючий орган ($\alpha_2 = 0.839$ – витікання в отвір з циліндричною насадкою);

C – коефіцієнт, що залежить від показника адиабати для двоатомних газів $C = 0.684$;

S_2 – площа перерізу регулюючого органу на виході ресивера $[\text{м}^2]$.

З урахуванням означеного, рівняння матеріального балансу в технологічних змінних набуде вигляду

$$F_1 \cdot dt = \frac{V}{R_r \cdot T} \cdot dP + \frac{\alpha_2 \cdot C \cdot S_2 \cdot P}{\sqrt{R_r \cdot T}} \cdot dt. \quad (2)$$

Після лінеаризації та деяких перетворень рівняння набуде вигляду

$$\tau_1 \cdot \frac{dy_1}{dt} + y_1 = K_1 \cdot x_1 + K_2 \cdot z_1 + K_3 \cdot z_2, \quad (3)$$

де

$$x_1 = \frac{\Delta F_1}{F_{10}}; \quad y_1 = \frac{\Delta P}{P_0}; \quad z_1 = \frac{\Delta S_2}{S_{20}}; \quad z_2 = \frac{\Delta T}{T_0}.$$

Оскільки метою дослідження є визначення властивостей ресивера як частотного фільтра вхідних пульсацій, будемо вважати, що керування на його виході відсутнє, тобто $\Delta S_2 = 0$, і зміною температури газу у ресивері можна знехтувати $\Delta T = 0$. Тоді рівняння (3) буде спрощено та набуде вигляду

$$\tau_1 \cdot \frac{dy_1}{dt} + y_1 = K_1 \cdot x_1. \quad (4)$$

З урахуванням технологічних змінних, коефіцієнти рівняння (4) набудуть вигляду

$$\tau_1 = V \cdot P_0 / (R_r \cdot T_0 \cdot P_1) - \text{стала часу};$$

$K_1 = F_{10}/P_1$ – коефіцієнт;

$$P_1 = \frac{\alpha_2 \cdot C \cdot S_{20} \cdot P_0}{\sqrt{R_r \cdot T_0}}$$

Рівняння (4) є динамічною математичною моделлю ресивера за тиском без урахування часу запізнення.

Для подальшої роботи з моделлю, перетворимо її у передаточну функцію. Для цього зробимо перетворення рівняння (4) за Лапласом (перехід до частотної форми):

$$\frac{d}{dt} = s; \quad x_1 \rightarrow X_1(s); \quad y_1 \rightarrow Y_1(s).$$

Після перетворень одержимо передаточну функцію:

$$W_{x_1 \rightarrow y_1}(s) = \frac{K_1}{\tau_1 \cdot s + 1}.$$

Для отримання математичної моделі кінцевого вигляду необхідно визначити час запізнення за досліджуваним каналом.

Виходячи з фізичних властивостей об'єкту, час запізнення за цим каналом визначається транспортним запізненням

$$\tau_{31} = \frac{V}{F_{10}^V}.$$

В остаточному варіанті одержимо математичну модель ресивера у вигляді передаточної функції:

$$W_{x_1 \rightarrow y_1}(s) = \frac{K_1}{\tau_1 \cdot s + 1} \cdot \exp(-\tau_{31} \cdot s),$$

де

$$\tau_1 = \frac{V \cdot \sqrt{R_r \cdot T_0}}{R_r \cdot T_0 \cdot \alpha_2 \cdot C \cdot S_{20}};$$

$$K_1 = \frac{F_{10} \cdot \sqrt{R_r \cdot T_0}}{\alpha_2 \cdot C \cdot S_{20} \cdot P_0};$$

$$\tau_{31} = \frac{V}{F_{10}^V}.$$

Для переходу до аналізу одержаної моделі, адаптуємо її до конкретних фізичних умов, тобто параметрів спроектованої технологічної схеми.

Вихідні дані для побудови аналітичної моделі ресивера наведені у таблиці 1.

Після розрахунків одержали такі значення коефіцієнтів:

$$\tau_1 = 2.86; \quad K_1 = 0.0147; \quad \tau_{31} = 19.98,$$

і підсумковий вигляд моделі:

$$W_{x_1 \rightarrow y_1}(s) = \frac{0.0147}{2.86 \cdot s + 1} \cdot \exp(-19.98 \cdot s) \quad (5).$$

Таблиця 1

Вихідні дані аналітичної моделі ресивера

Газ – повітря	$M = 29 \left[\frac{\text{КГ}}{\text{КМОЛЬ}} \right] = 29 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}} \right]$
$V = 0.6 \text{ [м}^3\text{];}$	$T_0 = 448 \text{ [}^\circ\text{К];}$ $t = 175 \text{ [}^\circ\text{С]}$
$P_0 = 10^6 \text{ [Па];}$	$F_{10}^V = 0.03 \left[\frac{\text{М}^3}{\text{С}} \right]$
$\rho(175 \text{ [}^\circ\text{С]}) = 0.788 \left[\frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} \right]$	$F_{10} = 0.024 \left[\frac{\text{КГ}}{\text{С}} \right]$
$R = 8.314 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{}^\circ\text{К} \cdot \text{МОЛЬ}} \right]$	$R_r = 287 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{}^\circ\text{К} \cdot \text{КГ}} \right]$
$\alpha_2 = 0.839$	$C = 0.684$
Труба 40 × 2, ст. 10, $S_{20} = 1.018 \cdot 10^{-3} \text{ [м}^2\text{];}$	

Аналіз динамічної моделі ресивера. За допомогою динамічної моделі ресивера (5) проаналізуємо властивості апарату щодо вирівнювання та стабілізації тиску повітря у мережі.

При роботі толокового компресора тиск повітря на його виході постійно змінюється. Характер цих змін наближено можна описати синусоїдальною функцією. Параметри синусоїдальної функції визначаються характером роботи компресора.

Компресор приводиться у дію електродвигуном. Частота синусоїди обумовлена частотою обертання електродвигуна. Одному обороту електродвигуна відповідає два хода толока компресора і один період синусоїди зміни тиску на виході компресора. Продуктивність роботи компресора змінюється від 50 % при 450 [об/хв] = 7.5 [об/с] до 100 % при 980 [об/хв] = 16.3 [об/с], середня частота роботи компресора – 75 % при 715 [об/хв] = 11.9 [об/с].

Для аналізу об'єкта складемо дослідницьку схему (рис. 3).

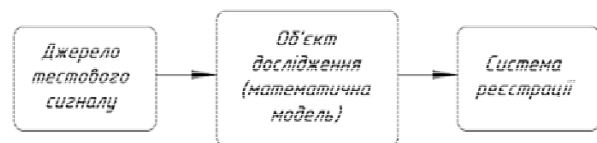


Рис. 3. Схема дослідження об'єкта

Дослідження проводилися за допомогою пакету прикладних програм MathCAD [10].

Дослідження об'єкта почнемо з перевірки його динамічних властивостей. Для цього необхідно подати на вхід об'єкта стандартну східчасту функцію та подивитися на відклик.

В якості східчастої функції застосуємо східчасту функцію Хевісайда – $\Phi(t)$. Вона повертає 1, якщо аргумент менше 0, інакше повертає 0.

$$\Phi(t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } t \geq 0 \\ 0, & \text{в інших випадках} \end{cases}$$

Графік східчастої функції Хевісайда наведено на рис. 4.

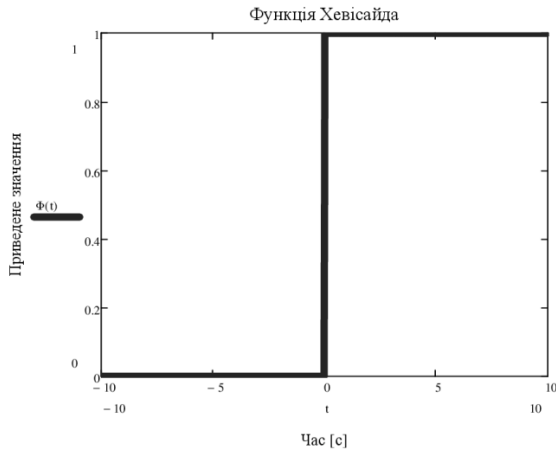


Рис. 4. Східчаста функція Хевісайда

Складемо розрахункову схему для подачі на вхід об'єкта східчастої функції Хевісайда, відповідно до схеми (рис. 3).

Вхідний сигнал $f_{in}(s)$ задаємо стандартною функцією $\Phi(t)$, перетвореною за Лапласом у частотну форму

$$f_{in}(s) := \Phi(t) \text{ laplace} \rightarrow \frac{1}{s}.$$

Досліджуваній об'єкт описується формулою (5). У форматі MathCAD одержимо

$$f_{obj}(s) := \frac{0.0147}{2.86 \cdot s + 1} \cdot \exp(-19.98 \cdot s). \quad (6)$$

Послідовне з'єднання ланок описується їхнім добутком

$$f_{out}(s) := f_{in}(s) \cdot f_{obj}(s). \quad (7)$$

Для отримання функції відклику у часовій області $f_{view}(t)$, робимо зворотне перетворення Лапласа

$$f_{view}(t) := f_{out}(s) \text{ invlaplace} \rightarrow \quad (8)$$

і виводимо дані на графік (рис. 5)

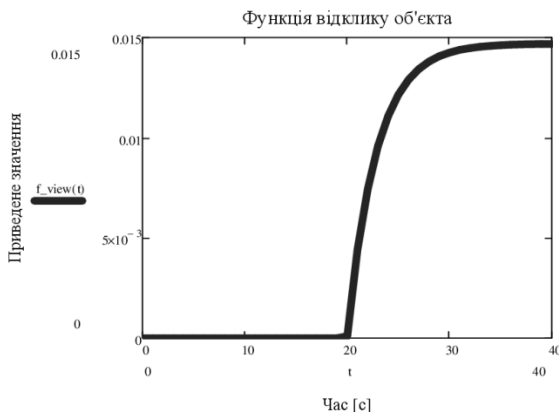


Рис. 5. Функція відклику об'єкта на східчастий вхідний вплив

Виходячи з математичної моделі ресивера (5), він описується аперіодичною ланкою першого порядку. Це підтверджується функцією відклику на графіку (рис. 5). Із цього слідує, що ресивер є абсолютно стійким об'єктом із запізненням без будь-яких коливань.

Для аналізу фільтруючих здібностей ресивера, що характеризують його можливості щодо вирівнювання та стабілізації тиску повітря на виході, побудуємо його амплітудно-частотну характеристику (АЧХ).

Оскільки аргументом у даній функції є частота або кутова швидкість, зробимо у формулі (6) підстановку

$$s = j \cdot \omega,$$

де $j = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця;

ω – кутова швидкість валу компресора [рад/с].

Рівняння (6) набуде вигляду

$$f_{obj}(\omega) := \frac{0.0147}{2.86 \cdot j \cdot \omega + 1} \cdot \exp(-19.98 \cdot j \cdot \omega). \quad (9)$$

Рівняння (9) має розв'язок в площині комплексних чисел. Виділимо дійсну та уявну частини

$$\begin{aligned} Re_{obj}(\omega) &:= Re(f_{obj}(\omega)); \\ Im_{obj}(\omega) &:= Im(f_{obj}(\omega)). \end{aligned}$$

Амплітуда визначається залежністю

$$A_{obj}(\omega) := \sqrt{Re_{obj}(\omega)^2 + Im_{obj}(\omega)^2}.$$

Важливою характеристикою залежності АЧХ є «частота зрізу». Це точка на ординаті графіка АЧХ, в якій амплітуда зменшується до величини $(1/\sqrt{2}) \cdot A_{obj}(0)$.

$$A_c(\omega) := (1/\sqrt{2}) \cdot A_{obj}(0).$$

У фільтрі низьких частот, яким у даному випадку є ресивер, за частотою зрізу практично відсутнє коливання вхідного сигналу.

Результуючий графік наведено на рис. 6.

Частоті зрізу відповідає кутова швидкість $\omega = 0.35$ [рад/с].

Кутова швидкість валу компресора дорівнює

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \nu \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right],$$

де ν – частота обертання валу компресора [об/с].

Робоча кутова швидкість валу компресора знаходиться в діапазоні 47.12 ... 102.42 [рад/с].

$$\omega_{min} = 2 \cdot \pi \cdot \nu_{min} = 2 \cdot 3.14 \cdot 7.5 = 47.12 \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right],$$

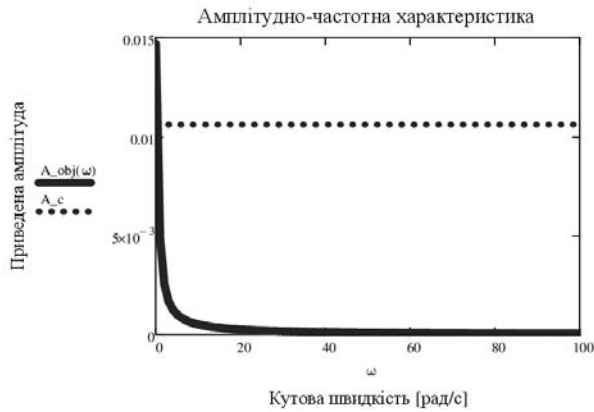


Рис. 6. Графік амплітудно-частотної характеристики ресивера. Функція відклику об'єкта на східчастий вхідний вплив

$$\omega_{average} = 2 \cdot \pi \cdot \nu_{average} = 2 \cdot 3.14 \cdot 11.9 = 74.77 \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right],$$

$$\omega_{max} = 2 \cdot \pi \cdot \nu_{max} = 2 \cdot 3.14 \cdot 16.3 = 102.42 \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right].$$

Таким чином, робочий діапазон частот компресора лежить далеко за частотою зрізу ресивера, що має забезпечувати якісне згладжування імпульсів тиску повітря на виході ресивера.

Перевіримо висновок шляхом моделювання подачі на вхід моделі ресивера синусоїдального сигналу, який імітує імпульсний вхідний сигнал.

$$f_{sin}(t) := \sin(\omega \cdot t). \tag{10}$$

Для цього необхідно задати параметри синусоїдального сигналу: кутову швидкість та діапазон часу. Виберемо мінімальну кутову швидкість, оскільки вона найбільш близька до швидкості зрізу.

$$\omega_{min} = 47.12 \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right],$$

$$f_{sin}(t) := \sin(47.12 \cdot t).$$

Параметри часу

$$t_{begin} := 0; \quad t_{end} := 5; \quad t_{del} := 0.001;$$

$$t := t_{begin}, t_{begin} + t_{del} \cdot t_{end}.$$

Результати моделювання наведені на рис. 7.

Складемо розрахункову схему для подачі на вхід об'єкта синусоїдального сигналу, відповідно до схеми (рис. 3).

Вхідний сигнал $f_{in}(s)$ задаємо синусоїдальною функцією (10), перетвореною за Лапласом у частотну форму

$$f_{in}(s) := \sin(\omega \cdot t) \text{ laplace} \rightarrow \frac{47.1239}{s^2 + 2220.661}.$$

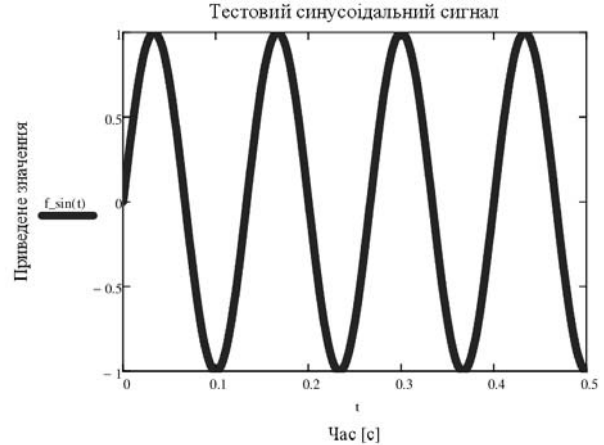


Рис. 7. Графік тестового синусоїдального сигналу

Досліджуваний об'єкт описується передаточною функцією першого порядку із запізненням (6).

Спочатку перевіримо, як буде перетворено вхідний сигнал без урахування запізнення об'єкта. Рівняння (6) набуде вигляду

$$f_{obj}(s) := \frac{0.0147}{2.86 \cdot s + 1}.$$

Напишемо послідовне з'єднання ланок вхідного сигналу та об'єкта (7). Для отримання функції відклику у часовій області $f_{view}(t)$, робимо зворотне перетворення Лапласа (8) і виводимо дані на графік (рис. 8)

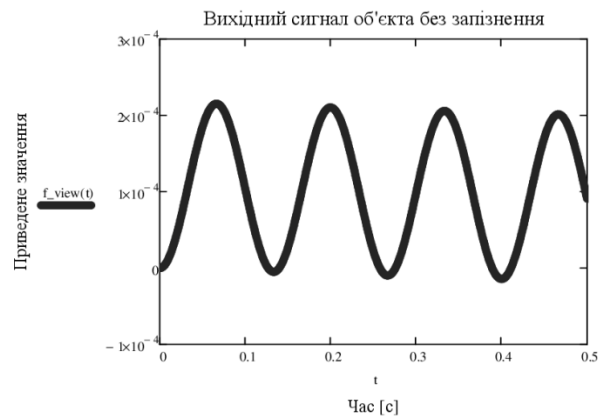


Рис. 8. Графік вихідного сигналу об'єкта без урахування часу запізнення

Наведені дані показують, що характер сигналу після проходження скрізь ресивер не змінився, він залишився синусоїдальним. У той же час відбувся зсув фази приблизно на чверть періоду та зменшилась амплітуда сигналу в 10^4 разу.

Тепер перевіримо, як буде перетворено вхідний сигнал із урахуванням запізнення об'єкта (рівняння 6).

Напишемо послідовне з'єднання ланок вхідного сигналу та об'єкта (7). Для отримання функції відклику у часовій області $f_{view_3}(t)$, робимо зворотне

перетворення Лапласа (8) і виводимо дані на графік (рис. 9)

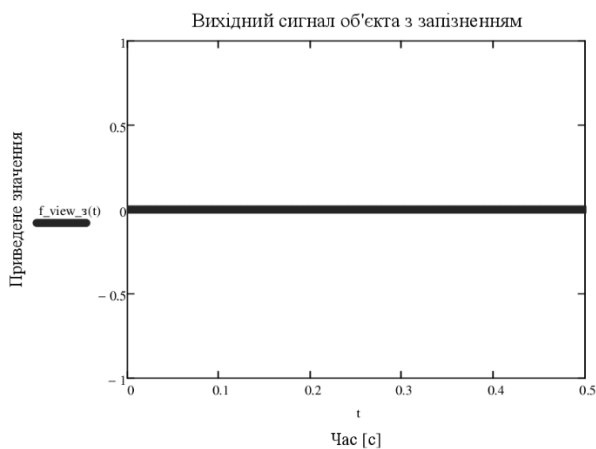


Рис. 9. Графік вихідного сигналу об'єкта з урахуванням часу запізнення

Результат моделювання показує, що завдяки значному часу запізнення об'єкта (порядку 20 [с]), коливання витрат на вході ресивера повністю згладжуються. Це відповідає твердженню, що чим більша інерційність об'єкта, тим менший діапазон частот він пропускає.

Висновки. Проведені дослідження підтвердили високу ефективність імітаційного моделювання при комплексному застосуванні моделей різного типу. Це дало можливість аналізувати результати проектування за різноманітними критеріями і, таким чином, перевірити найбільш важливі проектні рішення.

Застосування статичних моделей дозволило отримати дані для конструкторських розрахунків апаратів у технологічній схемі за критерієм оптимального використання матеріальних та енергетичних ресурсів при реалізації цільової хімічної реакції.

Аналіз функціонування апаратів, для яких важливим є їх динамічні властивості, додатково розроблені математичні моделі, одним із параметрів яких є час. Перевірка роботи ресиверу в ланцюзі «толоковий компресор – ресивер – теплообмінний апарат» підтвердила ефективність ресиверу в якості фільтра низьких частот.

Таким чином, дослідження показали високу ефективність застосування імітаційного моделювання із застосуванням математичних моделей різного виду для розробки та аналізу проектних рішень.

Література

1. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем: искусство и наука. М.: Мир, 1978. 420 с.
2. Николаев А. П., Бердников А. Г. Имитационное моделирование автоматических систем управления котлоагрегатом. Международный научно-исследовательский журнал. 2015. №10 (41) Часть 2. С. 86–90.

3. Старнер К. Имитационное моделирование как инструмент оптимизации производственной линии. Control Engineering Russia. 2019. №4 (82). С. 24–26.
4. Дрозд О. В., Капулин Д. В. Моделирование и исследование автоматизированных систем управления и диспетчеризации технологических процессов. Исследования наукограда. 2013. № 3-4 (6). С. 39–45.
5. Medvediev I., Muzylyov D., Shramenko N., Nosko P., Eliseyev Pe., Ivanov V. Design logical linguistic models to calculate necessity in trucks during agricultural cargoes logistics using fuzzy logic. Acta logistica – International Scientific Journal about Logistics. 2020. v. 7 is. 3. P. 155–166.
6. Гликин М.А., Гликина И.М. Гетерогенный газозольный нанокатализ: монография. Харьков: Изд-во «Підручник» НТУ «ХПІ», 2015. 472 с.
7. Иванченко В.В., Архипов О.Г., Штонда Ю.М. Конструювання і розрахунок колонних апаратів: навч. посібник. Северодонецьк: Вид-во Східноукр. нац. ун-ту ім. В.Даля, 2015. 330 с.
8. Иванченко В.В., Барвін О.І., Штонда Ю.М. Конструювання та розрахунок кожухотрубчастих теплообмінних апаратів: навч. посібник. Луганськ: Вид-во СХУ ім. В.Даля, 2006. 208 с.
9. Целищев О.Б., Єлісєєв П.Й., Лорія М.Г., Захаров І.І. Математичні моделі технологічних об'єктів: підручник. Луганськ: Вид-во Східноукр. нац. ун-ту ім. В.Даля, 2011. 421 с.
10. Кирьянов Д.В. Mathcad 15/Mathcad Prime 1.0. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 432 с.

References

1. Shannon R. Systems Simulation: the Art and Science. M.: Mir, 1978. 420 p.
2. Nikolaev A. P., Berdnikov A. G. Simulation modeling of automatic boiler control systems. International research journal. 2015. №10 (41) Part 2. P. 86–90.
3. Starner K. Simulation as a production line optimization tool. Control Engineering Russia. 2019. №4 (82). P. 24–26.
4. Drozd O. V., Kapulin D. V. Modeling and research of automated control systems and dispatching of technological processes. Research of the naukograd. 2013. № 3-4 (6). P. 39–45.
5. Medvediev I., Muzylyov D., Shramenko N., Nosko P., Eliseyev P., Ivanov V. Design logical linguistic models to calculate necessity in trucks during agricultural cargoes logistics using fuzzy logic. Acta logistica – International Scientific Journal about Logistics. 2020. v. 7 is. 3. P. 155–166.
6. Glikin M.A., Glikina I.M. Heterogeneous gas-phase aerosol nanocatalysis: monograph. Kharkov: Izd-vo «Pidruchnik» NTU «KhPI», 2015. 472 p.
7. Ivanchenko V.V., Arhipov O.G., Shtonda Ju.M. Design and calculation of column apparatus: tutorial. Severodoneck: Publ. house V. Dahl East Ukrainian National University, 2015. 330 p.
8. Ivanchenko V.V., Barvin O.I., Shtonda Ju.M. Design and calculation of shell-and-tube heat exchangers: tutorial. Lugansk: Publ. house V. Dahl East Ukrainian National University, 2006. 208 p.
9. Celishhev O.B., Eliseyev P.J., Lorija M.G., Zakharov I.I. Mathematical models of technological objects: textbook. Lugansk: Publ. house V. Dahl East Ukrainian National University, 2011. 421 p.
10. Kirjanov D.V. Mathcad 15/Mathcad Prime 1.0. SPB.: BHV-Peterburg, 2012. 432 p.

Елисеєв П.И. Имитационное моделирование при инженерном проектировании

В статье обосновано применение имитационного моделирования при проектировании технологической схемы установки, которая реализует процесс обезвреживания сточных вод, содержащих растворимые органические соединения. Рассмотрены этапы проектирования, которые требуют использования математических моделей различного вида (статических и динамических). Показана подробная расчетная схема, примененная для анализа динамических свойств отдельных аппаратов в составе технологических цепей. Приведены критерии для анализа каждой динамической характеристики, а также результаты моделирования и их графическая интерпретация.

Ключевые слова: имитационное моделирование, статическая и динамическая математическая модель, проектирование, технологическая схема.

Eliseyev P.J. Simulation modeling in engineering design

The article investigates the use of simulation modeling in the design of technological schemes for various industries. The substantiation of efficiency of application of simulation modeling at development of the technological scheme of installation which realizes process of sewage treatment containing soluble organic compounds is made. The purification process consists in the oxidation of organic pollutants to form thermodynamically stable products: carbon dioxide and water. A technological scheme that implements this process has been developed. The design stages that require the use of mathematical models of different types (static and dynamic) are considered. In the first stages, static mathematical models and regulatory process parameters were applied. As a result, the design parameters of the devices in the technological scheme, their location and communication system were ob-

tained. Since the functioning of the real technological scheme is a process, the parameters of which are distributed both in space and time, as well as non-stationary, it is necessary to check the consistency of the parameters of technological flows between devices. It is also necessary to analyze the behavior of the parameters of technological flows in the devices during transients, such as stability, oscillation, inertia, and so on. Therefore, in the subsequent stages, the study and analysis of design solutions to find the circuits of the technological scheme, which require verification of their dynamic characteristics. It was found that the circuit "tolok compressor - receiver - heat exchanger" is to be studied. To analyze the found circuit, mathematical models were developed that have time as a parameter of explicit form. The article presents the criteria for the analysis of each dynamic indicator. A detailed computational scheme has been developed, which is used to analyze the dynamic properties of individual devices as part of technological chains. The results of numerical modeling, as well as their graphical interpretation are given. The conducted researches have shown high efficiency of application of simulation modeling with application of mathematical models of various kind for development and the analysis of design decisions.

Key words: simulation modeling, static and dynamic mathematical model, design, technological scheme.

Єлісеєв Петро Йосипович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк)
peter_eliseyev@ukr.net

Стаття подана 09.02.2021 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-20-24>

УДК 629.454:656.223.2

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РІЗНИХ ФАКТОРІВ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНУВАННЯ ВАНТАЖНОЇ РОБОТИ НА ПІДВИЩЕННЯ ПЕРЕРОБНОЇ СПРОМОЖНОСТІ СОРТУВАЛЬНОЇ СТАНЦІ

Заверкін А.В., Сергієнко О.В., Кузьменко С.В., Чередниченко С.П.

STUDY OF THE INFLUENCE OF DIFFERENT FACTORS OF FREIGHT OPERATIONS CALENDAR PLANNING TO INCREASE THE REPROCESSING ABILITY OF THE SORTING STATION

Zaverkin A.V., Serhiienko O.V., Kuzmenko S.V., Cherednychenko S.P.

В статті проведено аналіз існуючого стану переробної спроможності маневрових пристроїв і наведені перспективні показники, одержувані за рахунок оптимізації планів навантаження. Показано, що одним з основних напрямків розвитку державних сортувальних станцій є перегляд основних підходів та методів планування роботи станцій. На основі проведеного дослідження впливу різних факторів календарного планування вантажної роботи надані рекомендації щодо оптимізації роботи сортувальних гірок в сортувальному парку магістральної станції.

Ключові слова: залізничний транспорт, сортувальна станція, переробна спроможність, план навантаження.

Вступ. Залізничний транспорт є одним з основних видів транспорту, який здійснює значну частину вантажоперевезень як по Україні, так і за кордон. У 2019 році вантажообіг залізничного транспорту становив 181,8 млрд. ткм [1], а за період січень – травень 2020 року – 69,711 млрд. ткм [2]. У подальшому, враховуючи вимоги Європейського Союзу щодо необхідності зменшення шкідливого впливу автомобільного транспорту на навколишнє природне середовище, питома вага залізничних перевезень збільшуватиметься [3].

У зв'язку з цим актуальним завданням є удосконалення роботи сортувальних станцій, а саме підвищення їх переробної спроможності та вантажообігу [4, 5].

Дослідженням організації вагонопотоків та маршрутизації перевезень вантажів у різні часи займалися такі вчені, як Акулінічев В.М, Боровий Н.Є., Шабалін Н.Н. та ін. [6 – 8]. Однак на сьогоднішній день так і залишилися невизначеними питання раціонального розташування та ефективної переробної спроможності сортувальних станцій.

Дослідження досвіду залізниць США, Канади,

Франції, Німеччини та Японії, проведені в роботі [9] показали, що основними напрямками розвитку державних сортувальних станцій повинні бути впровадження автоматизації керування процесу переробки вантажів, а також перегляд основних підходів та методів планування роботи станцій.

В зв'язку з цим метою роботи є дослідження впливу різних факторів календарного планування вантажної роботи на підвищення переробної спроможності сортувальної станції для оптимізації роботи сортувальних гірок в сортувальному парку.

Основна частина

Збільшення середньої швидкості розпуску составів на гірці і зниження часу розпуску на один состав може бути розраховано.

Середня швидкість розпуску [6]:

$$t_p = \frac{0,06 \cdot l_g \cdot m_c}{V_p} \cdot \left(1 - \frac{1}{2 \cdot q}\right), \text{ (хв)} \quad (1)$$

де l_g - довжина вагону, м;

q, m_c - відповідно кількість вагонів та причепів в составі;

V_p - середня швидкість розпуску розрахункового (найбільш часто повторюється у составі), км/год;

$$V_p = f \cdot \left(q, \frac{m_c}{q}\right), \text{ приймається для типових умов,}$$

або розраховується моделюванням розпуску для конкретної сортувальної гірки.

Для типової (умовної) механізованої гірки величини зміни швидкості і часу розпуску наведені в табл. 1-4 [7].

Таблиця 1

Зміна швидкості і часу розпуску составів залежно від укрупнення відчепів при $q_0 = 40$

$\beta_y, \%$	q	$l_{омц} = \frac{m_k}{q}$, ваг	V_p , км/ГОД	t_p , хв	Δt_p , хв	$\sum \Delta t_p$, хв
	40	1,25	5,02	9,37		
10	36	1,39	5,10	9,22	0,15	0,15
15	34	1,47	5,15	9,13	0,09	0,24
20	32	1,56	5,19	9,06	0,07	0,31
25	30	1,67	5,25	8,96	0,10	0,41
30	28	1,78	5,32	8,84	0,12	0,53
35	26	1,92	5,45	8,63	0,21	0,74
40	24	2,08	5,56	8,46	0,17	0,91
45	22	2,27	5,69	8,27	0,19	1,10
50	20	2,50	5,85	8,04	0,23	1,33

Таблиця 2

Зміна швидкості і часу розпуску составів залежно від укрупнення відчепів при $q_0 = 35$.

$\beta_y, \%$	q	$l_{омц} = \frac{m_k}{q}$, ваг	V_p , км/ГОД	t_p , хв	Δt_p , хв	$\sum \Delta t_p$, хв
	35	1,43	5,12	9,19		
10	32	1,56	5,20	9,05	0,14	0,14
15	30	1,67	5,26	8,94	0,11	0,25
20	28	1,78	5,32	8,84	0,10	0,35
25	26	1,92	5,46	8,62	0,22	0,57
30	24	2,08	5,56	8,46	0,16	0,73
35	22	2,27	5,70	8,25	0,21	0,94
40	21	2,38	5,81	8,10	0,15	1,09
45	19	2,63	5,91	7,96	0,14	1,23
50	17	2,94	6,12	7,69	0,27	1,50

Таблиця 3

Зміна швидкості і часу розпуску составів залежно від укрупнення відчепів при $q_0 = 30, m_c = 50$ ваг

$\beta_y, \%$	q	$l_{омц} = \frac{m_k}{q}$, ваг	V_p , км/ГОД	t_p , хв	Δt_p , хв	$\sum \Delta t_p$, хв
	30	1,67	5,25	8,93		
10	27	1,85	5,40	8,68	0,25	0,25
15	25,5	1,96	5,49	8,52	0,16	0,41
20	24	2,08	5,58	8,37	0,15	0,56
25	22,5	2,22	5,67	8,22	0,15	0,71
30	21,0	2,38	5,78	8,06	0,16	0,87
35	19,5	2,56	5,90	7,87	0,19	1,06
40	18,0	2,78	6,01	7,72	0,15	1,21
45	16,5	3,03	6,17	7,60	0,22	1,43
50	15,0	3,33	6,32	7,30	0,20	1,63

Таблиця 4

Зміна швидкості і часу розпуску составів залежно від укрупнення відчепів при $q_0 = 25, m_c = 50$ ваг

$\beta_y, \%$	q	$l_{омц} = \frac{m_k}{q}$, ваг	V_p , км/ГОД	t_p , хв	Δt_p , хв	$\sum \Delta t_p$, хв
	25	2,0	5,51	8,48		
10	22,5	2,22	5,65	8,24	0,24	0,24
15	21,25	2,35	5,73	8,12	0,12	0,36
20	20,0	2,50	5,85	7,95	0,17	0,53
25	18,75	2,67	5,94	7,82	0,13	0,68
30	17,50	2,86	6,06	7,65	0,17	0,83
35	16,25	3,08	6,20	7,46	0,19	1,02
40	15,0	3,33	6,32	7,29	0,17	1,19
45	13,75	3,64	6,47	7,11	0,18	1,37
50	12,50	4,00	6,66	6,88	0,23	1,60

Розрахунки виконані для наступних умов:

m_c - склад місцевих передавальних і вивізних поїздів, що формуються відповідно на вантажних станціях вузлів і вантажних та проміжних станціях ділянок, дорівнює в середньому 45-50 вагонів;

q_o, q - число відчепів в складах цих поїздів відповідно до і після укрупнення навантаження на основі календарного плану;

$$\beta_y = \frac{q_o - q}{q_o} - \text{відсоток зниження кількості відчепів в складах при введенні технології календарного планування навантаження немаршрутизованих вантажів по призначеннях плану формування поїздів сортувальної станції прийнятий в межах 10-50\%.$$

До введення заходів календарного планування навантаження в складах зазначених поїздів міститься 60-70% відчепів з одиночних вагонів і фактичне число відчепів досягає 85-40.

Реальне скорочення числа відчепів за рахунок укрупнення навантаження при календарному плануванні становить 25-30%, про що свідчать дані аналізу натурних листів передавальних і вивізних поїздів, що розформовуються на сортувальних станціях в тих вузлах, де принципи календарного планування навантаження увійшли в технологічну систему роботи комплексу вантажних і сортувальних станцій.

Таким чином, маючи величину скорочення часу розпуску на один склад $\sum \Delta t_p$, можна визначити резерв часу роботи гірки T_{py} , що одержуємо від прискорення швидкості розпуску за рахунок скорочення числа і укрупнення розмірів відчепів. Для станцій з різними умовами роботи величина цього резерву буде різною.

Для величин α_{knn} та β_y , що найбільш часто зустрічаються, сортувальних станцій з різним обсягом переробки вагонів на гірках (N_{nep}) визначено скорочення часу розпуску залежно від укрупнення відчепів в поїздах, що надходять з вантажних станцій, тобто резерв часу роботи гірок:

$$T_{py} = n_y \cdot \sum \Delta t_p \quad (2)$$

У загальному випадку число додаткових складів, які можуть бути перероблені на гірці за рахунок одержуваного резерву часу від укрупнення відчепів, може бути визначено як:

$$n_{don} = \frac{T_{py}}{t_2} \quad (3)$$

В свою чергу

$$T_{py} = \sum \Delta t_p \cdot n_y,$$

або

$$T_{py} = \frac{\sum \Delta t_p \cdot \alpha_{knn} \cdot N_{nep}^\phi}{m_c} \quad (4)$$

де $N_y = \frac{\alpha_{knn} \cdot N_{nep}^\phi}{m_c}$ - число поїздів, що формуються

шляхом вагонопотоків місцевого навантаження із застосуванням принципів календарного планування.

В цьому випадку

$$N_{don} = \frac{\sum \Delta t_p \cdot \alpha_{knn} \cdot N_{nep}^\phi}{m_c \cdot t_2} \quad (5)$$

Перетворюючи формулу (3), можемо визначити α_{knn} , при якому стає досяжним заданий рівень T_{py} ($T_{py} \geq t_p$ або $T_{py} \geq t_2$), в умовах тієї чи іншої станції:

$$\alpha_{knn} = \frac{T_{py} \cdot m_c}{\sum \Delta t_p \cdot N_{nep}^\phi} \quad (6)$$

За цією формулою для величини $T_{py} = 8$ хв. при різних N_{nep}^ϕ та β_y накреслюють криві α_{knn} , що характеризують сфери ефективного застосування заходів щодо укрупнення відчепів за рахунок календарного планування навантаження в різних умовах роботи сортувальних станцій.

Формули для оцінювання можливого рівня підвищення переробної спроможності станції ΔN_{nep} - абсолютне його значення і приріст ΔN_{nep} у відсотках до фактичної переробки N_ϕ або величину переробної спроможності гірки N_{nc} можна отримати шляхом перетворення формули (3):

$$N_{nep} = m_c \cdot n_{gon} = \frac{\sum \Delta t_p \cdot \alpha_{knp} \cdot N_{nep}^\phi}{t_2} \quad (\text{ваг.}); \quad (7)$$

$$\Delta N_{nep} (\%) = \frac{m_c \cdot n_{gon}}{N_{nep}^\phi} = \frac{\sum \Delta t_p \cdot \alpha_{knp} \cdot 100}{t_2} \quad (\%). \quad (8)$$

У відсотках до величини переробної спроможності:

$$\Delta N_{nc} = \frac{m_c \cdot n_{gon}}{N_{nep(cn)}} = \frac{\sum \Delta t_p \cdot \alpha_{knn} \cdot N_{nep}^\phi \cdot 100}{t_2 \cdot N_{nc}} \quad (9)$$

Якщо $\frac{N_{nep}^\phi}{N_{nc}}$ - рівень завантаження гірки, то

$$\Delta N_{nc} = \frac{\sum \Delta t_p \cdot \alpha_{knn} \cdot V}{t_2} \quad (10)$$

Ця величина характеризує приріст в % переробної спроможності гірки при знайденому значенні $\sum \Delta t_p$.

У загальному випадку формула $N_{\text{пер}}$ має вигляд:

$$\Delta N_{\text{пер}} = \frac{0.06 \cdot \ell_B \cdot m_c (V_p^{\text{kan}} - V_p^{\text{бкл}}) \cdot \alpha_{\text{кпн}} \cdot N_{\text{пер}}^{\phi}}{V_p^{\text{кпн}} \cdot V_p^{\text{бкл}} \cdot t_2} \quad (11)$$

Для того, щоб отримати відчутне збільшення переробної спроможності гірки при всіх значеннях $\alpha_{\text{кпн}} \geq 20\%$ та $N_{\phi} = 2-10$ тис. вагонів за добу, необхідно за допомогою календарного планування навантаження забезпечити укрупнення відчепів не менше ніж на 30% ($\beta_y = 30\%$)

Висновки

1. В статті проведено аналіз існуючого стану переробної спроможності маневрових пристроїв та наведені перспективні показники, одержувані за рахунок оптимізації планів навантаження. Показано, що одним з основних напрямків розвитку державних сортувальних станцій є перегляд основних підходів та методів планування роботи станцій.

2. Отримано формули для оцінки можливого рівня підвищення переробної спроможності станцій, які базуються на дослідженні впливу різних факторів планування вантажних операцій, що дозволяють відстежувати ефективність заходів щодо укрупнення відчепів за рахунок планування навантаження в різних умовах роботи сортувальних станцій сортування гірок у сортувальному парку головної станції.

3. Затрати на маневрову роботу по станціях формування укрупнених груп скорочуються пропорційно зменшенню числа маневрових передач за рівнем укрупнення груп навантаження.

4. Показано, що для того, щоб отримати відчутне збільшення переробної спроможності гірки при всіх значеннях $\alpha_{\text{кпн}} \geq 20\%$ та $N_{\phi} = 2-10$ тис. вагонів за добу, необхідно за допомогою календарного планування навантаження забезпечити укрупнення відчепів не менше ніж на 30% ($\beta_y = 30\%$).

Література

- Самойдук М. Вантажообіг залізниці зменшився на 2,4 %. URL: <https://www.railinsider.com.ua/vantazhoobig-zaliznyczy-zmenshyvsya-na-24/> (дата звернення 14.12.2020 р.).
- Кулак О. Вантажообіг залізничного транспорту впав на 11,4 %. URL: <https://www.railinsider.com.ua/vantazhoobig-zaliznychnogo-transportu-vpav-na-114/> (дата звернення 07.01.2021 р.).
- Розпорядження Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2009 р. № 1555-р «Стратегія розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року». URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/243219821> (дата звернення 07.01.2020 р.).
- Заверкін А.В., Сергієнко О.В., Марченко Д.М., Кузьменко С.В. Методика інтенсифікації перевізного процесу на залізничному транспорті. *Наукові вісті Дніпровського університету*, 2020. № 19. DOI: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2020-19-5> [Електронне видання] URL: http://nvdu.snu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/12/2020_19_7.pdf

- Музикіна С.І., Музикін М.І., Нестеренко Г.І. Дослідження пропускної спроможності сортувальної станції. *Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ*, 2016. № 2(62). С 47 – 60.
- Акулиничев В.М., Кирьянова О.С., Боровой Н.Е. Организация вагонопотоков и маршрутизация перевозок. М.: Транспорт, 1979. 223 с.
- Боровой, Н.Е. Маршрутизация перевозок грузов. М.: Транспорт, 1978. 216 с.
- Шабалин Н.Н. Оптимизация процесса переработки вагонов на станциях. М., Транспорт, 1973. 184 с.
- Кулешов В.В. Анализ перспектив развития сортувальных станций за кордоном та на залізницях України в умовах реформування транспорту. *Збірник наукових праць*. Харків: УкрДАЗТ, 2013. Вип. 136. С. 13 – 20.

References

- Samoidiuk M. Vantazhoobih zaliznytsi zmenshyvsia na 2, 4 %. URL: <https://www.railinsider.com.ua/vantazhoobig-zaliznyczy-zmenshyvsya-na-24/>. (Last accessed 14.12.2020).
- Kulak O. Vantazhoobih zaliznychnogo transportu vpav na 11,4 %. URL: <https://www.railinsider.com.ua/vantazhoobig-zaliznychnogo-transportu-vpav-na-114/> (Last accessed 07.01.2021).
- Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 16 hrudnia 2009 r. № 1555-r «Stratehiia rozvytku zaliznychnogo transportu na period do 2020 roku». URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/243219821> (Last accessed 07.01.2020).
- Zaverkin A.V., Serhiienko O.V., Marchenko D.N., Kuzmenko S.V. The methodology for intensifying the transportation process in railway transport. *Naukovi visti Dalivskoho universytetu*, 2020. № 19. DOI: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2020-19-5> [Elektronne vydannia] URL: http://nvdu.snu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/12/2020_19_7.pdf
- Muzykina S.I., Muzykin M.I., Nesterenko G.I. Study of working capacity of the marshalling yard. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk DNUZT*, 2016. № 2(62). P. 47 – 60.
- Akulynychev V.M., Kyrianova O.S., Borovoi N.E. Orhanizatsiia vahonopotokov y marshrutyzatsiia perevozk. M.: Transport, 1979. 223 p.
- Borovoi, N.E. Marshrutyzatsiia perevozk hruzov. M.: Transport, 1978. 216 p.
- Shabalyn N.N. Optymyzatsiia protsessa pererabotky vahonov na stantsiakh. M., Transport, 1973. 184 p.
- Kuleshov V.V. Analiz perspektyv rozvytku sortovalnykh stantsii za kordonom ta na zaliznytsiakh Ukrainy v umovakh reformuvannia transportu // Zbirnyk naukovykh prats. Kharkiv: UkrDAZT, 2013. Vyp. 136. P. 13 – 20.

Заверкин А.В., Сергиенко О.В., Кузьменко С.В., Чердиченко С.П. Исследование влияния различных факторов календарного планирования грузовой работы на повышение перерабатывающей способности сортировочной станции

В статье проведен анализ существующего состояния перерабатывающей способности маневровых устройств и приведены перспективные показатели, получаемые за счет оптимизации планов нагружения. Показано, что одним из основных направлений развития государственной сортировочных станций является просмотр основных подходов и методов планирования работы станций. На основе проведенного исследования влия-

ния различных факторов календарного планирования грузовой работы даны рекомендации по оптимизации работы сортировочных горок в сортировочном парке магистральной станции.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, сортировочная станция, перерабатывающая способность, план погрузки.

Zaverkin A.V., Serhiienko O.V., Kuzmenko S.V., Cherednychenko S.P. Study of the influence of different factors of freight operations calendar planning to increase the reprocessing ability of the sorting station

Rail transport is one of the main modes of transport, which carries out a significant part of freight both in Ukraine and abroad. In this regard, improving the operation of sorting stations, namely increasing their reprocessing ability and turnover is an urgent scientific task. Therefore, the aim of the article is to study the various factors influencing the calendar planning of cargo operations to increase the reprocessing ability of the sorting station, to optimize the operation of sorting hills in the sorting park. To achieve this goal, the article analyzes the current state of the shunting devices ability to process and presents promising indicators obtained as a result of optimization of load plans. It is shown, that one of the main directions of state sorting stations development is introduction of automation of cargo processing management and the revision of the main approaches and methods of station operation planning. Formulas for estimating the possible level of increasing the station reprocessing ability, which are based on a study of the impact of various factors of cargo operations plan, which allow to track the effectiveness of measures to consolidate the taps due to load plan in different operating conditions of sorting stations sorting hills in the sorting park of the main station, are obtained. It is shown that for effective application of measures on consolidation of hindcarriages at the expense of calendar planning of loading offered in work, for each station it is necessary: to establish standards on reduction of number of hindcarriages in local trains for the pur-

pose of increase of reprocessing ability of a sorting hill. It is revealed, that the costs of shunting work at the stations of formation of integrated groups are reduced in proportion to the decrease in the number of shunting gears according to the level of integration of load groups. In order to obtain a significant increase in the reprocessing ability of the hill at all values $\alpha_{\text{км}} \geq 20\%$ and $N_{\phi} = 2-10$ thousand carriages per day, it is necessary with the help of load plan to ensure the consolidation of the hindcarriages, at least 30% ($\beta_y = 30\%$).

Key words: railway transport, sorting station, reprocessing ability, load plan.

Заверкін Андрій Вікторович – к.т.н., доц., доцент кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк), zawerkin@ukr.net

Сергієнко Оксана Вікторівна – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк), sergienko.o.v@gmail.com.

Кузьменко Сергій Валентинович – к.т.н., доцент, директор навчально-наукового інституту транспорту і будівництва Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк), kuzmenkov@ukr.net.

Чередниченко Сергій Петрович – к.т.н., доцент, старший науковий співробітник відділу фізико-хімії ливарних процесів фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України (м. Київ), che_serg@ukr.net.

Стаття подана 16.01.2021 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-25-28>

УДК 004.92[621:744]

MODELING IN AUTOCAD FOR BACHELORS

Karpyuk L.V., Davydenko N.O.

МОДЕЛЮВАННЯ В AUTOCAD ДЛЯ БАКАЛАВРІВ

Карпюк Л.В., Давіденко Н.О.

The article discusses the methods of using the AutoCad graphic editor for creating three-dimensional objects. The possibilities of three-dimensional modeling in the AutoCad graphic editor for optimizing the educational process of bachelors of technical specialties are also considered. The article analyzes the best ways to create mechanical engineering drawings. The most developed software tool for the production of design documentation is AutoCAD - a universal graphic design system. Creating models of any complexity in space by using this graphic editor, the user will be able to see their relative position, estimate the distance between them. The model can be freely moved in space, viewing many options. The ability to control the point of view allows to conveniently select the view of the 3D model that is being developed. Zooming, panning in real time with the ability to freely rotate the camera around the model provide the ability to quickly view objects from any point of view. The article provides examples of choosing the most optimal option for creating a three-dimensional model. The traditional way to create a 3D model drawing is to make 2D views of the model. When creating a flat drawing, there is a possibility of error when making projections, since they are created independently from each other and consist of several images. It is rather difficult to represent an object in space from a flat drawing. At present, modern software graphic editors are aimed at creating three-dimensional models that allow to create realistic models and, on their basis, get two-dimensional projections. Graphic editor AutoCad allows to create three-dimensional objects based on standard commands, in the form of a cylinder, cone, box, torus, etc., when editing which you can get the desired shapes. After creating a three-dimensional model, the user can get its two-dimensional projections not only on the main planes, but also on any plane at will. The 3D modeling method allows you to create a complex drawing with any number of images based on a 3D model. There are ways to create 2D plane drawings from a 3D model and the ability to edit ready-made designs that can be inserted from model space into paper space. Editing takes place by changing the parameters of a 3D object in model space, and these changes are automatically reflected in paper space. This method allows us to use the tools to quickly create a system of 3-4 linked views for a 3D AutoCad model.

Keywords: model, modeling, commands, complex drawing, computer graphics, AutoCad

Introduction. The traditional way to create a 3D model drawing is to make 2D views of the model. When creating a flat drawing, there is a possibility of error when making projections, since they are created independently from each other and consist of several images.

It is rather difficult to represent an object in space from a flat drawing. At present, modern software graphic editors are aimed at creating three-dimensional models that allow to create realistic models and, on their basis, get two-dimensional projections. Graphic editor AutoCad allows you to create three-dimensional objects based on standard commands, in the form of a cylinder, cone, box, torus, etc., when editing which you can get the desired shapes. The method of three-dimensional modeling allows you to create a complex drawing with any number of images based on a three-dimensional model [1–5].

Purpose of the study. It is necessary to consider methods of using the AutoCad graphics editor to create three-dimensional objects. Taking into account the initial training of students, knowledge of engineering graphics, the ability to apply it in practice. This ensures fast work, flexibility and adaptability to various modeling methods and develops motivation for independent and cognitive activity of the student.

Presentation of the main material. We use the AutoCad graphics editor to build three-dimensional objects. AutoCad supports three ways to draw 3D objects: solid, wireframe, and surface. Each of them has its own characteristics. Each type of model has its own palette of drawing and editing commands. Since there are several types of modeling and editing, you shouldn't mix them up. It is rational to use one method. Creation of three-dimensional models can be carried out in a set of model shapes from graphic primitives such as cylinders, cones, boxes, spheres, tori, etc. and applying editing commands such as subtract, join, and intersect. There are also alternative commands for creating models - these are "rotation" and "extrusion".

Results. In fig. 1 shows the use of the commands "rotate" and "extrude". These commands greatly speed up the creation of solid models. To do this, you need to create a model profile. But keep in mind that you only need to create a flat profile with a command called "polyline". This command allows us to create a closed contour from which we can get a solid part. You should also observe the absence of intersections of contour or profile lines. If there are such intersections, the command will fail. Then we draw the axis of rotation and select the "rotation" command to create the model:

- 1) Select the object for rotation.
 - 2) Select the axis of rotation and to obtain a complete model, select the angle of rotation 360.
 - 3) Having received a three-dimensional model of the body, we need to make four holes in this model.
- To do this, we will use the cylinder primitive. Let's build it so that it intersects our model in a certain place. Next, using the "array" command (select a circular array), we get the four cylinders we need. Using the subtract command we get the holes. To do this, select the model itself, press "Enter", then select the cylinders, press "Enter".
- 4) We get the result (fig. 1).

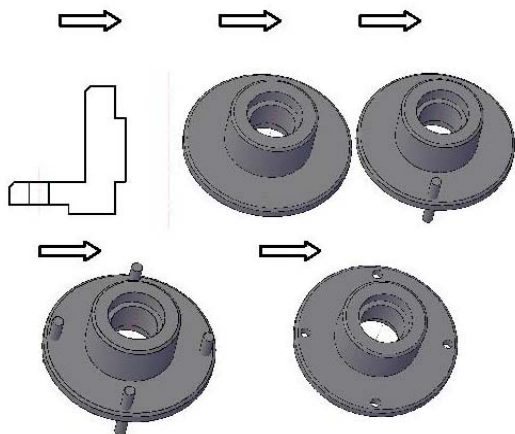


Fig. 1. Building a model using the "rotation" command

Having considered an example of building a three-dimensional model, it should be noted that the created model gives a complete picture of its geometric shape (Fig. 2). The next step will be the design of a complex drawing based on a three-dimensional model. To do this, load the ready-made A3 format, and using the "sheet" tab in the ribbon, select the command "create a base model from model space". Based on this, all other views of the drawing are formed. With the help of a projection connection, we build three views, and, if necessary, add a fourth (isometric) view.

After constructing the necessary views, we proceed to further design the drawing. The resulting views display all visible and invisible lines and require editing. To do this, select the view in the drawing and use the "edit view" command, here we can change the scale, hide invisible lines, shade with visible lines, etc. Projec-

tions without editing are shown in Fig. 3. The result of editing is shown in fig. 4.

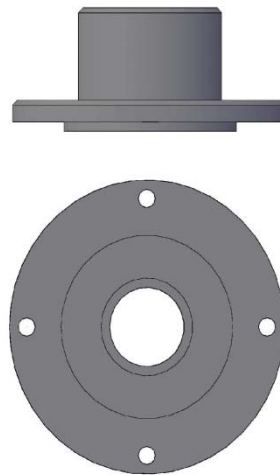


Fig. 2. Building the required types according to the basic model

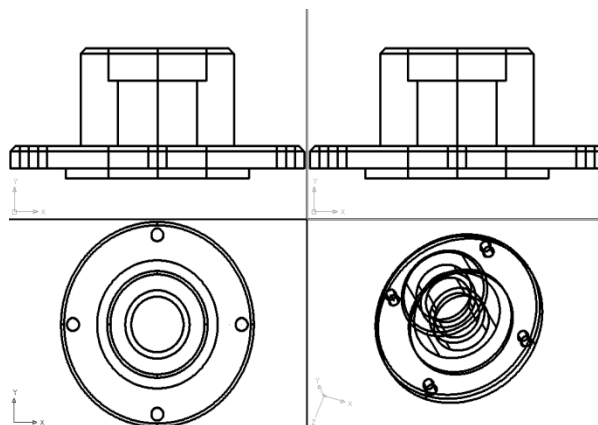


Fig. 3. Projections without editing

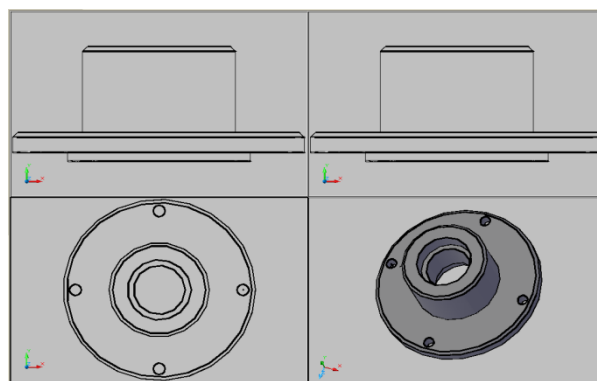


Fig. 4. Result of editing

The main and biggest advantage of this method is that the mechanism for changing any element in the model space on the object entails automatic transformation of all views in the drawing. This method is shown in Fig. 5.

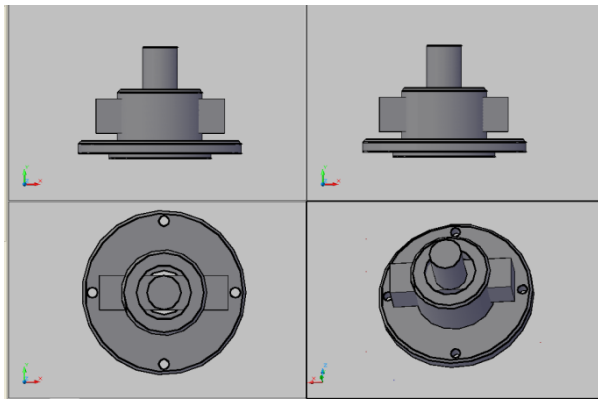


Fig. 5. Automatic conversion of views

Conclusions. Exploring and analyzing the methods and options for the commands used when creating three-dimensional models and flat drawings, we come to the conclusion that choosing the simplest and fastest modeling option results in an optimization of the educational process. By completing an individual assignment, students have the opportunity to make corrections to an already finished flat, complex drawing.

At the design stage, working with a three-dimensional model, making corrections and receiving changes in automatic mode on view projections, we get:

- 1) saving time for error correction;
- 2) the ability to use several modeling options;
- 3) create an unlimited number of views from one 3D model.

References

1. T. Yu. Sokolova AutoCAD 2012 na 100%. Sokolova T. Yu. Spravochnik. Prakticheskoe ruko-vodstvo Izdatel' stvo: Piter, 2012. – 576 s.
2. Nikolaj Poleshhuk. AutoCAD 2010. Naibolee polnoe rukovodstvo / Nikolaj Poleshhuk — BKhV-Peterburg, 2009. — 800 s.
3. Ivanov A. Yu. Formirovanie poverkhnosti vrashheniya s ispol'zovaniem 3D modelirovaniya // Sovremennaya pedagogika. 2015. # 4 [E'lektronny'j resurs]
4. Proektuvannya trivimi`rnikh ob'yekti`v zasobami AutoCAD-2008: Navchal`nij posi`bnik. – K: I'P-DO NUKhT, 2010. – 64 s.
5. I'nzhenerna i` komp'yuterna grafi`ka : Navchal`nij posi`bnik / V. Ye. Klimnyuk. – Kh. : Vid. KhNEU, 2013. – 92 s.

Література

1. Т. Ю. Соколова AutoCAD 2012 на 100%. / Соколова Т. Ю. Справочник. Практическое руководство - Издательство: Питер, 2012. – 576 с.
2. Николай Полещук. AutoCAD 2010. Наиболее полное руководство / Николай Полещук — БХВ-Петербург, 2009. — 800 с.
3. Иванов А. Ю. Формирование поверхности вращения с использованием 3D моделирования // Современная педагогика. 2015. # 4 [Электронный ресурс]

ременная педагогика. 2015. № 4 [Электронный ресурс]

4. Проєктування тривимірних об'єктів засобами AutoCAD-2008: Навчальний посібник. – К: ПДО НУХТ, 2010. – 64 с.
5. Інженерна і комп'ютерна графіка : Навчальний посібник / В. Є. Климнюк. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2013. – 92 с.

Карпюк Л.В., Давіденко Н.О. Моделювання в AUTOCAD для бакалаврів

У статті розглядаються методи використання графічного редактора AutoCad для створення тривимірних об'єктів, а також можливості тривимірного моделювання в графічному редакторі AutoCad для оптимізації навчального процесу бакалаврів технічних спеціальностей і аналізуються оптимальні способи створення машинобудівних креслень. Найбільш розвиненим програмним засобом виготовлення конструкторської документації є AutoCAD - універсальна графічна система проєктування. Створюючи моделі будь-якої складності в просторі за допомогою цього графічного редактора, користувач зможе побачити їх взаємне розташування, оцінити відстань між ними. Модель можна вільно переміщувати у просторі, переглядаючи безліч варіантів. Традиційний спосіб створення креслення об'ємної моделі складається з виконання двовимірних видів цієї моделі. При створенні плоского креслення, є ймовірність помилки виконуючи проєкції, так як одна від одної створюються вони незалежно і складаються з декількох зображень. За плоским кресленням досить складно уявити предмет в просторі. В даний час сучасні програмні графічні редактори спрямовані на створення тривимірних моделей, що дозволяють створювати реалістичні моделі і на їх основі отримувати двовимірні проєкції. Графічний редактор AutoCad дозволяє створювати тривимірні об'єкти на основі стандартних команд, у вигляді циліндра, конуса, ящика, тора і т.д., при редагуванні яких можна отримувати потрібні форми. Після створення тривимірної моделі, користувач може отримати її двовимірні проєкції не тільки на основні площини, а й на будь-яку площину за своїм бажанням. Метод тривимірного моделювання дозволяє створювати комплексне креслення з будь-якою кількістю зображень на основі тривимірної моделі. Існують способи створення на основі тривимірної моделі двовимірних плоских креслень і можливість редагування вже готових проєктів вставлених з простору моделі в простір листа. Редагування проходить шляхом зміни параметрів тривимірного об'єкту в просторі моделі, і ці зміни автоматично відображаються в просторі листа. Такий спосіб дозволяє нам використовувати засоби швидкого створення системи з 3-4 пов'язаних видів для тривимірної моделі AutoCad.

Ключові слова: модель, моделювання, команди, комплексне креслення, комп'ютерна графіка, AutoCad

Карпюк Л.В., Давиденко Н.А. Моделирование в AUTOCAD для бакалавров

В статье рассматриваются методы использования графического редактора AutoCad для создания трехмерных объектов, а также возможности трехмерного моделирования в графическом редакторе AutoCad для оптимизации учебного процесса бакалавров технических специальностей и анализируются оптимальные способы создания машиностроительных чертежей. Наиболее развитым программным средством изготовления конструкторской документации является AutoCAD - универсальная графическая система проектирования. Создавая модели любой сложности в пространстве с помощью этого графического редактора, пользователь сможет увидеть их взаимное расположение, оценить расстояние между ними. Модель можно свободно перемещать в пространстве, просматривая множество вариантов. Возможность управления точкой зрения позволяет удобно выбрать вид на трехмерную модель, которая разрабатывается. Зуммирование, панорамирование в режиме реального времени с возможностью свободного поворота камеры вокруг модели предоставляют возможность быстрого просмотра объектов с любой точки зрения. В статье приведены примеры выбора самого оптимального варианта создания трехмерной модели. Традиционный способ создания чертежа объемной модели состоит из выполнения двухмерных видов этой модели. При создании плоского чертежа, есть вероятность ошибки выполняя проекции, так как друг от друга создаются они независимо и состоят из нескольких изображений. По плоскому чертежу достаточно сложно представить предмет в пространстве. В настоящее время современные программные графические редакторы направлены на создание трехмерных моделей, позволяющих создавать реалистичные модели и на их основе получать двухмерные проекции. Графический редактор AutoCad позволяет создавать трехмерные объекты

на основе стандартных команд, в виде цилиндра, конуса, ящика, тора и т.д., при редактировании которых можно получать нужные формы. После создания трехмерной модели, пользователь может получить ее двумерные проекции не только на основные плоскости, но и на любую плоскость по своему желанию. Метод трехмерного моделирования позволяет создавать комплексный чертеж с любым количеством изображений на основе трехмерной модели. Существуют способы создания на основе трехмерной модели двухмерных плоских чертежей и возможность редактирование уже готовых проектов вставленных из пространства модели в пространство листа. Редактирование проходит путем изменения параметров трехмерного объекта в пространстве модели, и эти изменения автоматически отображаются в пространстве листа. Такой способ позволяет нам использовать средства быстрого создания системы из 3-4 связанных видов для трехмерной модели AutoCad.

Ключевые слова: модель, моделирование, команды, комплексный чертеж, компьютерная графика, AutoCad

Карпюк Людмила Вікторівна – старший викладач кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк)
karp224klv@ukr.net

Давіденко Наталія Олександрівна – старший викладач кафедри іноземних мов та професійної комунікації, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк)
davidenko_no@snu.edu.ua

Стаття подана 19.01.2021 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-29-32>

УДК 004.92: 744

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ІНЖЕНЕРНІЙ ГРАФІЦІ

Карпюк Л.В., Давіденко Н.О.

INFORMATION TECHNOLOGIES IN ENGINEERING GRAPHICS

Karpyuk L.V., Davydenko N.O.

Стаття присвячена питанню підвищення ефективності процесу навчання за допомогою використання сучасних інформаційних технологій на прикладі дисципліни «Інженерна та комп'ютерна графіка». Описано способи застосування комп'ютерної графіки в ході вивчення курсів нарисної геометрії та інженерної графіки. Розглянуто особливості викладання розділу комп'ютерної графіки в дисципліні інженерної графіки, орієнтованого на використання графічного редактора AutoCAD, для цілеспрямованого формування професійних якостей майбутніх фахівців і їх готовності до самостійної розробки конструкторських документів. Використання автоматизованої системи створення зображень дозволяє урізноманітнити навчальний процес, що сприяє більш швидкому і якісному засвоєнню студентами складного матеріалу. Однак охопити такий великий обсяг інформації можливо тільки при використанні різних інноваційних технологій. В якості одного з підходів до вирішення даного завдання є розглянута в статті методика проведення лабораторних робіт з комп'ютерної графіки. Для посилення зворотного зв'язку зі студентами на початку кожного заняття для закріплення матеріалу, що вивчається, стимулювання студентів при навчанні та забезпечення швидкої готовності їх до сприйняття нових питань доцільно проводити автоматизований тестовий контроль. Також при викладенні нового навчального матеріалу рекомендується застосовувати міні-лекції та комп'ютерний практикум. Традиційно при читанні лекцій тривимірні моделі демонструвалися на плакатах або викреслювалися на дошці. Пізніше з'явилася можливість демонструвати слайди або 3D-зображення, підготовлені викладачем за допомогою комп'ютерної графіки. Студенти при опрацюванні нового матеріалу використовували вже готові ілюстрації. Однак, як відомо, процес навчання проходить набагато ефективніше, якщо студенти приймають в ньому не пасивну, а активну участь. Сучасний інноваційний підхід дозволяє кожному самостійно створити ілюстрацію досліджуваного алгоритму. При виконанні завдань в ході комп'ютерного практикуму у студентів поряд з розвитком просторового і конструкторського мислення формується усвідомлене уявлення про форми геометричних об'єктів, їх взаємне положення і компонування. Для підвищення «насиченості» розділу комп'ютерної графіки пропонується ретельно продумувати методику викладення теоретичного матеріалу, техніку оформлення сучасних презентацій, структуру, розмітку та на-

повнення комп'ютерних слайдів. Ефективність впливу навчального матеріалу на студентську аудиторію багато в чому залежить від ступеня і рівня ілюстративності усного матеріалу. Продумана система завдань, які виконуються в ході комп'ютерного практикуму, сприяє вивченню всіх особливостей комп'ютерної графіки по розробці робочих креслень.

Ключові слова: інженерна графіка, комп'ютерна графіка, тестовий контроль, міні-лекція, комп'ютерний практикум, графічний редактор AutoCAD, інформаційні технології.

Вступ. Сучасний етап розвитку суспільства диктує нові вимоги до рівня освіченості та компетентності фахівця. В умовах збільшення обсягу знань, пропонованих студентам, при одночасному зменшенні годин аудиторної роботи особливого значення набуває оптимізація навчального процесу. Підвищення ефективності процесу навчання - одна з основних задач вищої школи, вирішити яку можливо шляхом використання в освітньому процесі сучасних інформаційних технологій.

Мета статті. Вивчення в дисципліні інженерної графіки основ комп'ютерної графіки є невід'ємною частиною процесу навчання в університеті в зв'язку з тим, що в машинобудівній галузі вже багато років розробляють технічну документацію з використанням комп'ютерних технологій. Такий підхід дає можливість зрозуміти, наскільки збільшується продуктивність праці і якість роботи інженера-конструктора, архітектора. Адже комп'ютер може витримувати стандарти до побудови ліній (тип, товщина та ін.), написів і т.д. абсолютно точно, він не допускає ніяких помарок і помилок [1]. Охопити такий великий обсяг інформації можливо тільки при використанні різних інноваційних технологій. В якості одного з підходів до вирішення даного завдання є розглянута в статті методика проведення лабораторних робіт з комп'ютерної графіки.

Викладення основного матеріалу. Для посилення зворотного зв'язку зі студентами на початку

кожного заняття доцільно проводити автоматизований тестовий контроль. Для його проведення необхідно розробити систему тестових завдань. Основною перевагою застосування тестів при перевірці знань є отримання миттєвого об'єктивного результату і можливість порівняння свого результату з результатами інших. Письмові опитування, які проводилися раніше, припускали тимчасові витрати на їх перевірку. До моменту оголошення результатів питання могли бути вже забутими, і оцінка не асоціювалася з конкретною темою. При виконанні ж тестових завдань на паперовій основі завжди є бажання звірити свої відповіді з відповідями однокурсників. Ці негативні сторони тестових завдань на основі паперових носіїв можна уникнути при використанні комп'ютерних технологій (рис. 1).



Рис. 1. Методика проведення лабораторних робіт з комп'ютерної графіки

Система автоматично обчислює результат тестування і формує базу даних для кожного студента. Тести дозволяють викладачеві спостерігати за ходом навчального процесу та вчасно надавати студентам необхідну допомогу, так як він має можливість аналізувати статистику відповідей на питання тесту і кількість часу, витраченого на відповіді. Результати тестування мають велике значення для закріплення матеріалу, що вивчається, стимулювання студентів при навчанні, а також для швидкого налаштування їх на сприйняття нового навчального матеріалу.

При викладенні нового матеріалу на лабораторних роботах рекомендується застосовувати міні-лекції та комп'ютерний практикум. Навчальний матеріал, в залежності від специфіки зображень, компонується за блоками, кожен з яких охоплює один з розділів комп'ютерної графіки. Кожне заняття починається з короткої лекції. В ході міні-лекції викладач доводить до студентів необхідний мінімум теоретичного матеріалу, наприклад, методи і засоби комп'ютерної графіки, команди, особливості застосовуваних алгоритмів, способи побудови зображень і т.д.

Ефективність впливу навчального матеріалу на студентську аудиторію багато в чому залежить від ступеня і рівня ілюстративності усного матеріалу [2, 3]. Візуальна насиченість навчального матеріалу робить його яскравим, переконливим і сприяє інтенсифікації процесу його засвоєння. Тому на заняттях рекомендується застосовувати комп'ютерні слайди, розроблені викладачами. З огляду на специфіку викладання комп'ютерної графіки, на презентаціях повинен переважати ілюстративний і схематичний матеріал над текстовим (рис. 2). Текстовий зміст уявити в тезовому вигляді і відформатувати за пунктами. При демонстрації презентації студентам розгорнуті тексти промовляються викладачем вголос, як пояснення до слайду.

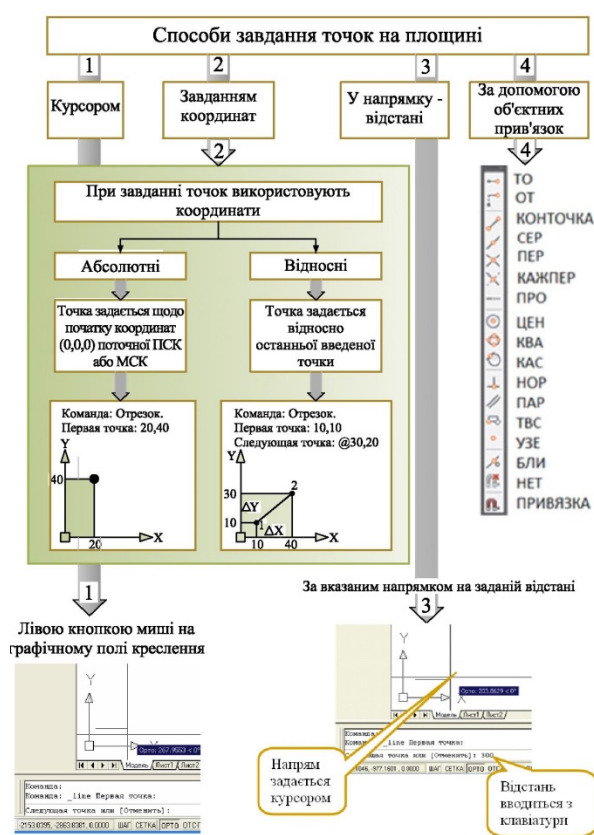


Рис. 2. Приклад оформлення слайда для пояснення способів завдання точок на площині

Результати. Поєднання усного лекційного матеріалу з демонстрацією слайд-презентації дозволяє концентрувати візуальну увагу студентів на особливо значимих (важливих) моментах навчального матеріалу. Для самостійної підготовки до занять студенти можуть використовувати підручники з вивчення графічного редактора AutoCAD [4] і методичні вказівки для роботи з AutoCAD, розміщені в системі eCampus.

Для активізації пізнавальної діяльності студентів при вивченні складного матеріалу рекомендуємо з самого початку продемонструвати результати, які може надати той чи інший матеріал, що вив-

чається. Наприклад, можна показати можливості команд редагування або побудови складних об'єктів та ін. Після такої демонстрації у більшості студентів виникає бажання самим навчитися використовувати можливості графічного редактора для побудови креслень.

В ході читання лекції викладач через систему питань дізнається про ступінь готовності студентів до практичного відпрацювання завдання. Система завдань повинна бути продумана таким чином, що їх виконання сприяє вивченню всіх тонкощів комп'ютерної графіки. При виконанні завдань в ході комп'ютерного практикуму у студентів поряд з розвитком просторового і конструкторського мислення формується усвідомлене уявлення про форми геометричних об'єктів, їх взаємне положення і композивання. Пропоновані завдання покликані сприяти розвитку графічних і творчих здібностей кожного студента. Йому надається можливість проявити певну самостійність в ухваленні рішення з побудови того чи іншого креслення; у виборі колірної гами для шарів і налаштування стилів. На заняттях повинні використовуватися методичні вказівки щодо виконання робіт, які містять короткий опис основних команд і детальні алгоритми виконання завдань. При необхідності можуть бути використані додаткові матеріали: навчальний посібник, нормативна документація, довідники, електронні підручники, слайди. В процесі виконання студентами робіт особлива увага звертається на точність і правильність геометричних побудов, а також на дотримання стандартів щодо виконання та оформлення робочих креслень.

Графічний редактор AutoCAD дозволяє вести роботу з багатошаровими зображеннями. Багатошаровість і управління шарами легко розуміються і використовуються студентами при виконанні завдань по створенню робочих креслень (рис. 3).

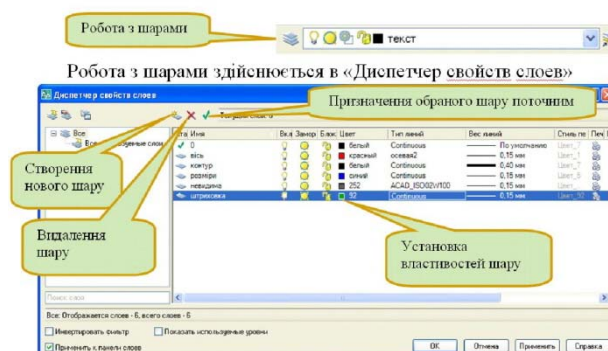


Рис. 3. Послідовність роботи студентів зі створення шарів для побудови багатошарового зображення

Об'єктивним контролем знань, отриманих при вивченні всіх тем розділу «Комп'ютерна графіка», є виконання залікового завдання кожним студентом за індивідуальними завданнями. До його виконання допускаються студенти, які виконали всі графічні завдання.

Висновки. Таким чином, використання запропонованої методики активізує процес викладання, підвищує інтерес студентів до вивчаємої дисципліни і ефективність навчального процесу, дозволяє досягти більшої глибини розуміння навчального матеріалу. Знання, отримані на цих заняттях, студенти застосовують і на старших курсах при виконанні курсових і дипломних робіт.

Проаналізувавши вищесказане, можна зробити висновок, що застосування комп'ютерної графіки в процесі навчання сприяє більш якісному засвоєнню основних понять, методів, придбання практичних навичок і умінь, розвитку просторового мислення. Як наслідок, підвищується ефективність самостійної роботи студентів, поліпшується якість виконаних домашніх завдань і контрольних робіт.

Література

1. Комп'ютерна графіка в машинобудівних кресленнях: / Укл. Л. В. Карпюк, М. І. Гуліда, С. А. Ревенко. Навч. посібник. – Луганськ: Вид-во Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 2007. -132 с.
2. Горобець С. М., Методичні підходи щодо навчання комп'ютерній графіці студентів ВНЗ засобами інформаційно-комунікаційних технологій / Житомир. держ. ун-т ім. І. Франка. – Житомир: Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2018. Випуск 1 (92). С. 75—79.
3. Карпюк Л. В. Використання графічного редактора в інженерній графіці і курсовому проектуванні / Л. В. Карпюк, О. В. Любимова-Зінченко // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. - 2016. - № 8. - С. 59-64.
4. Поleshuk N. N. Самоучитель AutoCAD 2017. — СПб.: БХВ-Петербург, 2017. — 480 с.

References

1. Komp'yuterna grafika v mashinobudivnih kreslenyakh: / Ukl. L. V. Karpyuk, M. I. Gulida, S. A. Revenko. Navch. posibnik. – Lugansk: Vid-vo Shid-noukrayinskogo natsionalnogo universitetu imeni Volodimira Dalya, 2007. -132 s.
2. Gorobec S. M., Metodichni pidhodi shodo navchannya komp'yuternij grafici studentiv VNZ zaso-bami informacijno-komunikacijnih tehnologij / Zhitomir. derzh. un-t im. I. Franka. – Zhitomir: Vid-vo ZhDU im. I. Franka, 2018. Vipusk 1 (92). S. 75—79.
3. Karpyuk L. V. Viktoristannya grafichnogo re-daktora v inzhenernij grafici i kursovomu proektuvanni / L. V. Karpyuk, O. V. Lyubimova-Zinchenko // Visnik Pridniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnictva ta arhitekturi. - 2016. - № 8. - S. 59-64.
4. Poleshuk N. N. Samouchitel AutoCAD 2017. — SPb.: BHV-Peterburg, 2017. — 480 s.

Карпюк Л.В., Давиденко Н.А. Информационные технологии в инженерной графике

Статья посвящена вопросу повышения эффективности процесса обучения посредством использования современных информационных технологий на примере дисциплины «Инженерная и компьютерная графика». Описаны способы применения компьютерной графики в ходе

изучения курсов начертательной геометрии и инженерной графики. Рассмотрены особенности преподавания раздела компьютерной графики в дисциплине инженерной графики, ориентированного на использование графического редактора AutoCAD, для целенаправленного формирования профессиональных качеств будущих специалистов и их готовности к самостоятельной разработке конструкторских документов. Использование автоматизированной системы создания изображений позволяет разнообразить обучающий процесс, что способствует более быстрому и качественному усвоению студентами сложного материала. Однако охватить такой большой объем информации возможно только при использовании различных инновационных технологий. В качестве одного из подходов к решению данной задачи является рассмотренная в статье методика проведения лабораторных работ по компьютерной графике. Для усиления обратной связи со студентами в начале каждого занятия для закрепления изучаемого материала, стимулирования студентов при обучении и обеспечения быстрой готовности их к восприятию новых вопросов целесообразно проводить автоматизированный тестовый контроль. Также при изложении нового учебного материала рекомендуется применять мини-лекции и компьютерный практикум. Традиционно при чтении лекций трехмерные модели демонстрировались на плакатах или вычерчивались на доске. Позднее появилась возможность демонстрировать слайды или 3D-изображения, подготовленные преподавателем при помощи компьютерной графики. Студенты при проработке нового материала использовали уже готовые иллюстрации. Однако, как известно, процесс обучения проходит намного эффективнее, если обучающиеся принимают в нем не пассивное, а активное участие. Современный инновационный подход позволяет каждому самостоятельно создать иллюстрацию изучаемого алгоритма. При выполнении заданий в ходе компьютерного практикума у студентов наряду с развитием пространственного и конструкторского мышления формируется осознанное представление о формах геометрических объектов, их взаимном положении и компоновке. Для повышения «насыщенности» раздела компьютерной графики предлагается тщательно продумывать методику изложения теоретического материала, технику оформления сопроводительных презентаций, структуру, разметку и наполнение компьютерных слайдов. Эффективность воздействия учебного материала на студенческую аудиторию во многом зависит от степени и уровня иллюстративности устного материала. Продуманная система заданий, выполняемых в ходе компьютерного практикума, способствует изучению всех особенностей компьютерной графики по разработке рабочих чертежей.

Ключевые слова: инженерная графика, компьютерная графика, тестовый контроль, мини-лекция, компьютерный практикум, графический редактор AutoCAD, информационные технологии.

Karpyuk L.V., Davydenko N.O. Information technologies in engineering graphics

The article is devoted to the issue of increasing the efficiency of the learning process through the use of modern information technologies on the example of the discipline "Engineering and Computer Graphics". Methods of using computer graphics in the course of studying descriptive geometry and

engineering graphics courses are described. The features of teaching the section of computer graphics in the discipline of engineering graphics, focused on the use of the graphic editor AutoCAD, for the purposeful formation of the professional qualities of future specialists and their readiness for independent development of design documents are considered. The use of an automated system for creating images allows you to diversify the learning process, which contributes to faster and better assimilation of complex material by students. However, to cover such a large amount of information is possible only with the use of various innovative technologies. As one of the approaches to solving this problem is the methodology of laboratory work on computer graphics considered in the article. It is advisable to carry out automated test control to enhance feedback with students at the beginning of each lesson to consolidate the material being studied, to stimulate students in learning and to ensure their quick readiness to perceive new questions. Also, when presenting new educational material, it is recommended to use mini-lectures and a computer workshop. Traditionally, when giving lectures, three-dimensional models were shown on posters or drawn on a blackboard. Later, it became possible to show slides or 3D images prepared by the teacher using computer graphics. Students used ready-made illustrations when working on new material. However, as you know, the learning process is much more effective if the learners take not passive, but active participation in it. A modern innovative approach allows everyone to independently create an illustration of the studied algorithm. When performing tasks in the course of a computer workshop, along with the development of spatial and design thinking, students form a conscious idea of the shapes of geometric objects, their relative position and arrangement. To increase the completeness of the computer graphics section, it is proposed to carefully think over the methodology for presenting theoretical material, the technique for designing accompanying presentations, the structure, layout and filling of computer slides. The effectiveness of the impact of educational material on the student audience largely depends on the degree and level of illustrativeness of the oral material. A well-thought-out system of tasks performed during the computer workshop contributes to the study of all the features of computer graphics for the development of working drawings.

Key words: engineering graphics, computer graphics, test control, mini-lecture, computer workshop, graphic editor AutoCAD, information technology.

Карпюк Людмила Вікторівна – старший викладач кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк)
karp224klv@ukr.net

Давіденко Наталія Олександрівна – старший викладач кафедри іноземних мов та професійної комунікації, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк)
davydenko_no@snu.edu.ua

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-33-40>

УДК 621.9.06-229.001.24

ОЦІНКА ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШПИНДЕЛЬНОГО ВУЗЛА БАГАТОЦІЛЬОВОГО ТОКАРНОГО ВЕРСТАТА В СЕРЕДОВИЩІ «APM WINMACHINE»

Кроль О.С.

ESTIMATION OF SPINDLE NODE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A MULTIPURPOSE TURNING MACHINE IN THE APM WINMACHINE ENVIRONMENT

Krol O.S.

Розглянуто проблему аналізу працездатності багатофункціонального токарного верстата, оснащеного різноманітним модульним оснащенням. Розроблено статичний формуляр для оцінки характеристик жорсткості двухопорного шпиндельного вузла зі змінними інструментальними блоками. Показана ефективність модуля APM Structure-3D в умовах складного характеру деформування шпиндельних опор. Дана оцінка напружено-деформованого стану шпинделя за допомогою аналізу полів напружень, розрахованих методом кінцевих елементів. Побудований ряд частотних характеристик, що відображають динаміку шпиндельного вузла при комбінованому просторовому навантаженні.

Ключові слова: токарний верстат, формотворний вузол, статичний формуляр, кутова піддатливість, поле напруг, частотна характеристика.

Вступ. Аналіз тенденцій розвитку сучасних металорізальних верстатів токарної групи і верстатних комплексів на їх основі показав основні напрями вдосконалення таких проектів, які характеризуються розширеними технологічними можливостями, і які можна класифікувати як багатоопераційне обладнання, яке ефективно функціонує в складі гнучких автоматизованих систем [1-3]. Такі системи формуються на базі агрегатного принципу їх побудови. Результатом такого підходу є перспектива створення великої номенклатури модифікованих конструкцій токарних верстатів. Особливо важливий такий підхід при проектуванні формотворчих вузлів (шпиндельна і супортні група) з використанням модульного принципу. Постійне розширення компонентів інструментального забезпечення [4], на базі допоміжного і різального інструмента з одного боку і підвищення точностних характеристик виробів робить необхідним проведення комплексних досліджень формотворчих вузлів обробних центрів в

середовищі сучасних систем автоматизованого проектування. Аналіз численних досліджень вихідних характеристик формотворчих вузлів, пов'язаних з напружено-деформованим станом шпинделів верстатів показав, що початковим етапом є створення 3D моделі цих вузлів в рамках інтегрованих САПР. На основі побудованої тривимірної моделі шпиндельного вузла (ШВ) запропоновано новий підхід, на базі аналізу поля статичної жорсткості робочої зони сучасного верстата з ЧПУ [5]. Необхідно відзначити перспективність пропонованої параметричної моделі, що враховує шість напрямків, в яких вимірюється статична жорсткість. На базі цієї моделі здійснюється визначення статичної жорсткості в масштабі робочої зони верстата. На цій основі проводиться оцінка і плануються шляхи зменшення помилок обробки під різними навантаженнями. В роботі [6] розглянуті питання оброблюваності виробів в рамках життєвого циклу тривісного фрезерного верстата, оснащеного інструментальним оснащенням типу Bridgerport DIN 69871. Автор використовує системний підхід до оцінки ефективності обробки з урахуванням взаємодії основних формотворчих вузлів верстата: приводу подач; шпиндельного вузла і інструментальної системи. В якості допоміжного інструменту застосовуються оправлення за стандартом ISO 230 series, які відповідають оснащенням малогабаритних верстатів (першого і другого типорозмірів). Комплексного використання CAD SOLIDWORKS і CAE ANSYS software для побудови 3D-моделі шпинделя токарного верстата з ЧПУ і дослідження її методом кінцевих елементів присвячена робота [7]. При формалізації шпинделя використовується 10-вузлова стрижнева модель з трьома ступенями свободи в кожному вузлі. Аналіз динамічних характеристик на 5 власних частотах і

формах коливань шпинделя з урахуванням змінного навантаження дає можливість прогнозувати поведінку цього виробу поза зоною резонансу і давати оцінку показника жорсткості при домінуванні згинальних напружень. Разом з тим, автори наголошують на необхідності спрощення вихідної 3D-моделі (видалення фасок і отворів малих розмірів і інших елементів конструкції) в процесі конвертації форматів 3D-файлів між SOLIDWORKS і ANSYS. Аналіз балансу піддатливості і форм коливань основних вузлів токарних верстатів показав, що основні формотворчі вузли: шпиндель – заготівля (Ш – З) і супортні група – інструмент (С–І) зумовлюють якість функціонування верстата в цілому. Оцінки за якими можна зробити якісні висновки визначаються характером і особливістю напружено-деформованого стану. Разом з тим аналіз перерахованих вище робіт показав, що дослідження працездатності формотворчих вузлів проводилися в основному при певній фіксації схеми обробки з нормованим вильотом інструменту. Саме на цій основі здійснювалося побудова розрахункових схем конструкцій токарних верстатів, які не дають можливість ефективного управління жорсткістю і вібростійкістю в межах робочого простору верстата.

Метою даної роботи є створення комплексної процедури визначення жорсткості формотворного

шпиндельного вузла токарних верстатів, оснащених широкою номенклатурою модульного інструментального оснащення на базі оцінок напружено-деформованого стану.

Матеріали та результати дослідження. Характеристики жорсткості і вібростійкості шпинделя на пружних опорах залежать від величини консольної частини як самого шпинделя, так і довжини оброблюваної деталі.

Перспективним є підхід до побудови статичних формулярів s_f шпинделя, представлений в роботах [8-10]. Такий підхід ефективний при використанні уніфікованих шпиндельних вузлів, оснащених широкою гамою модульної оснастки. Разом з тим, автори розглянули один варіант навантаження однічною консольною силою, не взявши до уваги сили в зубчастому зачепленні «вихідний вал коробки швидкостей – шпиндель». Розглянемо варіант комбінованого навантаження двухопорного шпиндельного вузла (рис. 1) багатопільового верстата моделі МС-03, змонтованого на радіально-упорних підшипниках 4-46209 і 4-46112, установлених за схемою «тандем-О» з попереднім натягом пружинного типу (задня опора) і натягом за допомогою двох проміжних втулок для здвоєної передньої опори [11-13].

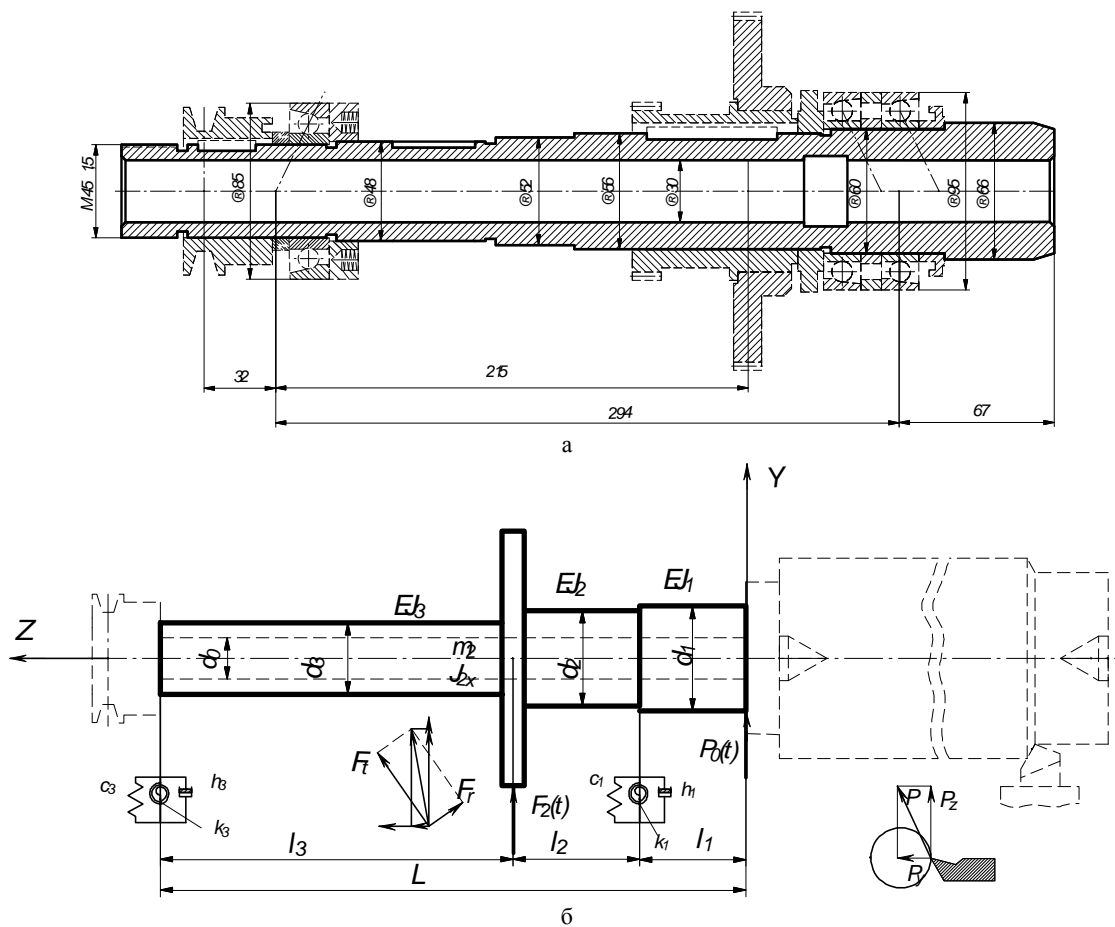


Рис. 1. Шпиндельний вузол:
а – конструктивна схема; б – розрахункова схема

Розглянутий верстат оснащений комплектом модульної оснастки:

- трьохкулачковий патрон, який закріплюється на шпинделі за допомогою проміжного фланця;
- обертаючий центр, монтуємий в конусному отворі пинолі і призначений для обробки довгомірних деталей;
- шліфувальне оправлення, яке вмонтовується в конусному отворі шпинделя;
- патрон з набором втулок з попередньо встановленим на столі супорта кутовим столом (і при необхідності лежачими)
- розточне оправлення, що вмонтовується на різьбової частини шпинделя, для виконання розточувальних операцій та виготовлення деталей, встановлених на додатковий кутовий стіл з кареткою;
- фрезерне оправлення з кінцевою фрезою з необхідним набором конусних втулок, що встановлюються в конусний отвір шпинделя (верстат оснащується при цьому кутовим столом і лежачими).

Для оцінки характеристик піддатливості шпиндельного вузла з урахуванням розміру робочої зони верстата розроблена програма в математичному середовищі «Maple» і за допомогою ядра символічної математики отримано статичний формуляр $s_f = f(l_k)$ для різних довжин консолі l_k шпиндельного вузла багатопільового верстата МС03 [14-16]:

$$s_f = 0.29 \cdot 10^{-4} + 0.332 \cdot 10^{-6} l_k + 0.507 \cdot 10^{-8} l_k^2.$$

Отриманий аналітичний формуляр є ефективним інструментом визначення і моделювання характеристик жорсткості в межах робочого простору верстата [17, 18]. З'являється можливість швидкого статистичного розрахунку того чи іншого налагодження, за допомогою номограм « $s_f - l_k$ », які складаються з двох частин: статистичного формуляра s_f і графіка піддатливості консолі Δ_k . Аналіз отриманих результатів, показує наявність значного запасу жорсткості (максимальний прогин на консолі шпинделя (рис.1) становить $y_{\max} = f = 0.027$ мм, а кут повороту консольного перетину становить 0.0289 рад). При цьому стріла прогину на межопорного частини при $[f] = 0.0003 \cdot l$ не повинна перевищувати $y_{\max} = 0.0873$ мм. Допустимий кут повороту кінця шпинделя не повинен перевищувати $[\theta] = 0.0572$ град. Близько чисельні значення піддатливості виходять в результаті розрахунків за допомогою модуля APM Shaft [19-21]. Разом з тим в модулі APM Shaft відсутня можливість обліку кутової піддатливості шпиндельного вузла, що виявляє вплив на показни-

ки деформації, щодо проектованої конструкції. Для ефективного моделювання та розрахунку напружено-деформованого стану з урахуванням кутової піддатливості опор використовується модуль комплексного аналізу тривимірних конструкцій APM Structure3D [22-24]. В процесі моделювання в середовищі APM Structure 3D створюється «каркасна» модель конструкції шпинделя (рис. 2), в якій кордону стрижнів елементів визначаються вузлами в тих точках, де прикладається навантаження або змінюється згинальна жорсткість перерізу. Кожен стрижень має конкретні розміри і з'єднаний за допомогою вузлів з іншими стрижнями конструкції.

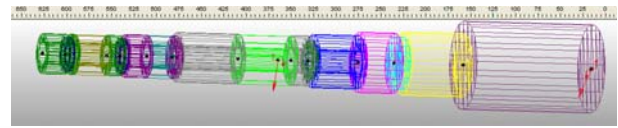


Рис. 2. Каркасна модель конструкції шпинделя

Для проведення розрахунку цієї конструкції необхідно додатково поставити:

- поперечні перерізи кожному зі стрижнів;
- опори для створеної конструкції, що визначають її положення в просторі;
- зовнішні навантаження, що діють на конструкцію;
- параметри матеріалу елементів конструкції.

Особливістю завдання опор є можливість суміщення в одній опорі і жорсткого і пружного закріплення, кожне з яких є зовсім різними об'єктами. Вони будуть функціонувати разом в тому випадку, коли діють за різними напрямками системи координат в вузлі.

Для проектованої конструкції дозволені переміщення по напрямку дії сил P_y (вісь Z) і F_r (пружне закріплення) і поворот навколо осі Z. У режимі завдання жорсткого закріплення, включенням прапорців в полях переміщення в напрямку осей X і Y, а також повороти навколо цих же осей. Розрахунок в середовищі APM Structure3D дозволяє оцінити повну картину напружено-деформованого стану шпинделя в будь-якому його перетині, включаючи оцінку навантажень, силові фактори та ін., які представлені в пункті меню «Результати» [25, 26]. На рис. 3. представлено поле напруг, характерне для типової операції точіння, виробленої на багатопільовому верстаті МС-03 і розподіл напружень в i -му перерізі шпинделя.

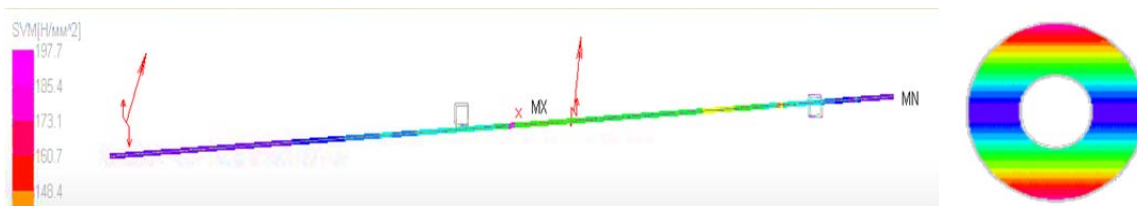


Рис. 3. Поле напруг шпинделя верстата МС-03

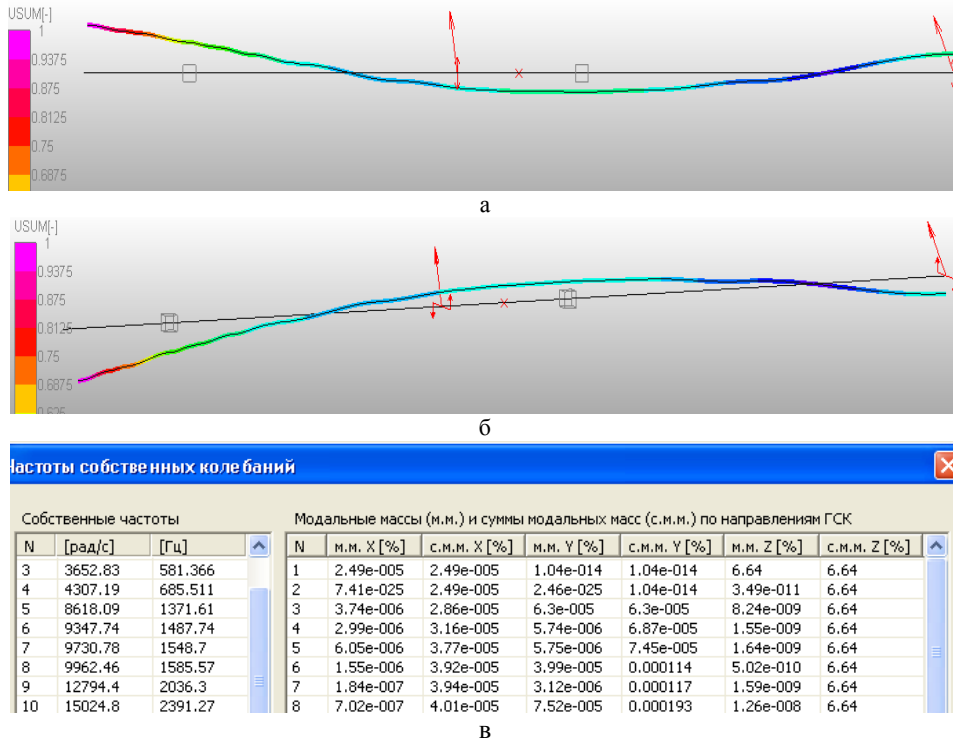


Рис. 4. Динамічні характеристики шпинделя: а – таблиця власних частот; б – власна форма коливань на 3-й власній частоті; в – власна форма коливань на 4-й власній частоті

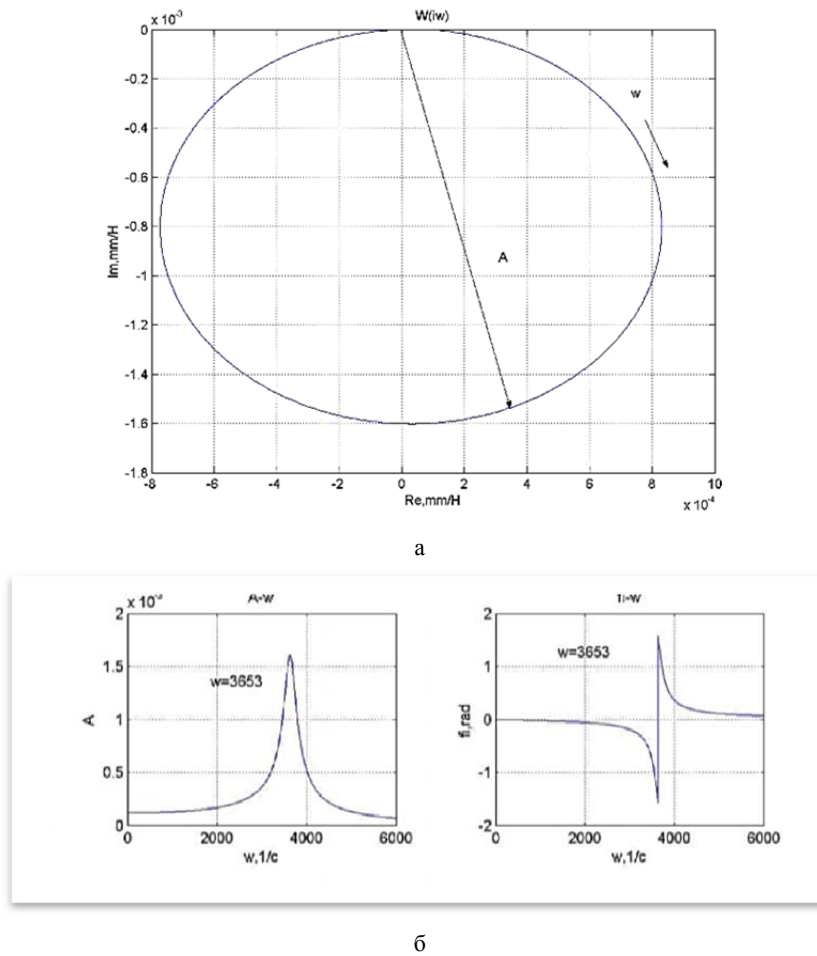


Рис. 5. Частотні характеристики шпиндельного вузла: а – АФЧХ; б – АЧХ та ФЧХ

Відповідно до колірної шкалою (рис.3) максимальні значення еквівалентних напружень SVM (з енергетичної теорії міцності) не перевищують допустимих напружень плинності ($[\tau] = 635$ МПа для матеріалу шпинделя Ст 20Х) навіть при коефіцієнті запасу по плинності $k_{\tau} = 2$.

Оцінка динамічної якості функціонування пов'язана з визначенням власних частот і відповідних їм власних форм коливань. Розрахунок цих динамічних характеристик проведено в модулі АРМ Structure 3D [27, 28]. За замовчуванням система розрахувала 16 власних частот і форм з точністю 0.01%.

На рис. 4, а; б; в представлена таблиця власних частот і 3-я і 4-я власні форми, що описують конфігурацію моделі шпинделя, що коливається з відповідними частотами.

При коливаннях пружної системи шпиндельного вузла превалює основна згинальна форма, отже систему можна розглядати як лінійну коливальну ланку другого порядку, передавальна функція $W(i\omega)$ якої представлена на рис.5 [29-31]. Програми побудови передавальної функції, амплітудно-фазової частотної (АФЧХ), амплітудно-частотної (АЧХ) $A = f(\omega)$ і фазочастотної характеристик (ФЧХ) $\varphi = f(\omega)$ розроблені в математичній середовищі «Matlab».

АФЧХ пружних систем дають можливість порівнювати різні налагодження з перерахованого вище модульного оснащення за величиною відрізка, що відсікається характеристикою на уявної осі Im . Відношення довжини цього відрізка до статичної податливості визначає коефіцієнт динамічності в резонансі для i -ої власної частоти коливань [32-34]. На відміну від статичної податливості коефіцієнт динамічності враховує інерційні та демпфуючі властивості та, отже, більш повно характеризують пружну систему шпиндельного вузла токарного багатоцільового верстата моделі МС-03 [35-37].

Висновки. В результаті проведених досліджень отримані наступні результати:

1. Розроблено аналітичну залежність податливості шпиндельного вузла багатоцільового токарного верстата від вильоту інструментального блоку у вигляді статичного формуляра. Це дозволяє ефективно управляти процесом обробки деталей на токарному верстаті при зміні технологічного оснащення.

2. Отримано оцінки напружено-деформованого стану в різних перетинах шпинделя за допомогою методу кінцевих елементів в модулі АРМ Structure-3D. Підвищено точність отриманих результатів за рахунок обліку кутової податливості опори на здвоєних радіально-упорних підшипниках, змонтованих по схемі тандем.

3. Виконано розрахунок динамічних характеристик шпиндельного вузла і виявлено спектр власних частот і відповідних форм коливань. Створені програми побудови амплітудно-фазової частотної характеристики в математичному середовищі MatLab.

Література

1. Аврамова Т. М., Бушуев В. В., Гиловой Л. Я. Металло-орежущие станки: Учебник / за ред. В. В. Бушуев. Москва: Машиностроение, 2012. 608 с.
2. Бальмонт В.Б., Горелик И.Г., Фигатнер А.М. Расчеты высокоскоростных шпиндельных узлов. Москва: ВНИИТЭМР, 1987. 52 с.
3. Пуш А.В., Зверев И.А. Шпиндельные узлы. Проектирование и исследование: монография. Москва: «Станкин», 2000. 197 с.
4. Григорьев С.Н., Гречишников В.А., Маслов А.Р. Инструментальные системы интегрированных машиностроительных производств: монография. Москва: ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2012. 194 с.
5. Gao X., Li B., Hong Ju., Guo Ju. Stiffness modeling of machine tools based on machining space analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 86, No. 5–8. P. 2093–2106.
6. Afsharizand B., Zhang X., Newman S.T., Nassehi A. () Determination of machinability considering degradation of accuracy over machine tool life cycle. *Proceeding of the 47th CIRP conference on manufacturing systems*. 2014. No.17, P. 760–765. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.02.048>
7. Kong J., Cheng X. Modal analysis of CNC lathe's spindle based on finite element. *Advances in Engineering Research (AER)*. 2017. Vol.148. P. 318–321.
8. Попов В.И., Локтев В.И. Динамика станков. Київ: Техніка, 1975. 136 с.
9. Krol O., Sokolov V. 3D modelling of angular spindle's head for machining centre. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2019. 1278, 012002. VSPID-2018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1278/1/012002>
10. Николаенко А.П. Формирование поверхности изделия при вибрационной обработке. Вибрации в техніці та технологіях, №2 (58). Вінницький національний аграрний університет, 2010. С. 167-184.
11. Кроль О.С., Кроль А.А., Бурлаков Е.И. Твердотельное моделирование и исследование шпиндельного узла обрабатывающего центра. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків: НТУ «ХПІ», 2013. № 16(989). С. 14–18.
12. Кроль О.С. Параметрическое моделирование металло-орежущих станков и инструментов. Монография. Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2012. 116 с.
13. Кроль О.С., Соколов В.І. Тривимірне моделювання металорізальних верстатів та інструментального оснащення. Северодонецьк: СНУ ім. В. Даля, 2016. 160 с.
14. Kharlamov, Y., Sokolov, V., Krol, O., Romanchenko, O.: Research of the mechanism of particles bonding with substrate during thermal spraying of coating. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 985, №. 1. P. 012037.
15. Sokolov, V., Krol, O., Romanchenko, O., Kharlamov, Y., Baturin, Y.: Mathematical model for dynamic characteristics of automatic electrohydraulic drive for technological equipment. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1553. P. 012013.
16. Кроль О.С. Методы и процедуры динамики шпиндельных узлов: Монография. Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2014. 154 с.
17. Kharlamov, Y., Sokolov, V., Krol, O., Romanchenko, O. Analysis of physical and chemical transformations during thermal spraying of coatings based on carbides of tungsten

- and chromium. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 985, №. 1. P. 012036
18. Кріль О.С., Хмеловський Г.Л. Оптимізація і управління процесом різання: учебное пособие. Київ: УМК ВО, 1991. 140 с.
 19. Николаенко А.П. Совершенствование конструкции вибрационных станков с U-образной формой контейнера. Вісник Національного технічного університету ХПІ. Сер.: Нові рішення в сучасних технологіях, №56(1029), 2013. С. 15 – 21.
 20. Кріль О. С., Сухорутченко И. А. Трёхмерное моделирование многооперационного станка модели СВМ1Ф4 в среде компас 3D. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. Т. 4. № 7 (70). С. 13–18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26250>
 21. Шевченко О.І, Мелконов Г.Л. Пристрій розмагнічування установки магнітної дефектоскопії осі колісної пари. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, вип. 8(264), Січень 2021, С. 66-72, doi:10.33216/1998-7927-2020-264-8-66-72
 22. Кріль О.С., Замковец Д.М. Оцінка піддатливості пружної ланки шпindelь-розточна оправка в середовищі АРМ WinMachine. *Вісник Східноукраїнського Національного Університету імені Володимира Даля*. 2020. № 4 (260). С. 40–45. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-40-45>
 23. Суржиков С.М., Кріль О.С. Моделювання шпindelьного вузла багатопільового токарного верстата в середовищі «MAPLE». *Технічні науки в Україні: сучасні тенденції розвитку: матеріали Всеукр. наук.-тех. інтернет-конф. м. Київ, 20–21 листопада 2019 р.* Київ: вид-во Державного університету інфраструктури та технологій, 2019. С. 71–73.
 24. Кузовов О.Ю., Кріль О.С. Динамічне моделювання шпindelьного вузла фрезерного верстата *Технічні науки в Україні: сучасні тенденції розвитку: матеріали Всеукр. наук.-тех. інтернет-конф. м. Київ, 20–21 листопада 2019 р.* Київ: вид-во Державного університету інфраструктури та технологій, 2019. С. 64–67.
 25. Николаенко А.П., Калмыков М.А. Основание выбора математической модели процесса вибрационной упрочняющей обработки [Текст]. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*, 2008. №5/4(35). С. 53 – 57.
 26. Замрий А.А. Практический учебный курс САД/САЕ АРМ WinMachine. Учебно-методическое пособие. Москва: Изд-во АПИМ, 2004. 240 с.
 27. Krol O., Sokolov V. Parametric modeling of machine tools for designers. Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. 112 p. <https://doi.org/10.7546/PMMTD.2018>
 28. Krol O.S., Sokolov V.I. [3D Modeling Of Machine Tools For Designers](https://doi.org/10.7546/3D_momtfd.2018). Sofia: Prof. Marin Drinov Academy Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. 140 p. https://doi.org/10.7546/3D_momtfd.2018
 29. Krol O., Sokolov V. Modeling of carrier system dynamics for metal-cutting machines. *IEEE Proceedings 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 2018. P. 1–5.
 30. Кріль О.С., Замковец Д.М. Оцінка піддатливості пружної ланки шпindelь-розточна оправка в середовищі АРМ WinMachine. *Вісник Східноукраїнського Національного Університету імені Володимира Даля*. Северодонецьк: ЧНУ ім. В. Даля, 2020. № 4 (260). С. 40–45. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-40-45>
 31. Мицьк А.В., Федорович В.А. Пути интенсификации вибрационной отделочно-зачистной обработки комбинированием схем энергетических воздействий на рабочую среду и детали. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2011, № 6 (83). С. 26 – 34.
 32. Мелконов Г.Л, Ветряк Є.С. Удосконалення токарного верстата 1А62 (16К20) шляхом заміни стандартного вузла встановленням взаємо пересувного різцетримача для обробки деталей з малим діаметром при відрізних операціях». *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, вип. 4, вип. 1(249), Березень 2019, с. 23-25
 33. Міцьк А.В., Федорович В.О. Оцінка ефективності вібраційної оздоблювально-зачистувальної обробки у резервуарах з мультиенергетичним впливом і різною формою поперечного перерізу. Різання та інструмент в технологічних системах: Міжнар. наук.-техн. зб. Харків: НТУ «ХПІ», 2019. Вип. 90. С. 51 – 63.
 34. Мицьк А.В., Федорович В.А. Процес отделочно-зачистной виброобработки и параметры, влияющие на его производительность. Різання та інструмент в технологічних системах: Міжнар. наук.-техн. зб. Харків: НТУ «ХПІ», 2013. Вип. 83. С. 184 – 194.
 35. Мелконов Г.Л., Глазунов Я.І. Стійкість інструментів з круговою ріжучою кромкою. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, вип. 1(249), Березень 2019, с. 26-29
 36. Міцьк А.В., Федорович В.О. Методичні основи теоретичного та експериментального оцінювання процесу виброобработки деталей технологічними системами комбінованого динамічного впливу вільного абразивного середовища. Різання та інструмент в технологічних системах: Міжнар. наук.-техн. зб. Харків: НТУ «ХПІ», 2019. Вип. 89. С. 100 – 108.
 37. Мицьк А.В., Федорович В.А. Аналітика, коментарі і класифікація технологій отделочно-зачистной виброобработки, созданных комбинированием различных схем энергетического воздействия. Сучасні технології в машинобудуванні. Харків: НТУ «ХПІ», 2016. Вип. 11. С. 175 – 189.

References

1. Avraamova T. M., Bushuev V. V., Gilovoy L. Ya. *Metallozhuschie stanki: Uchebnik / za red. V. V. Bushuev*. Moskva: Mashinostroenie, 2012. 608 s.
2. Balmont V.B., Gorelik I.G., Figatner A.M. *Rascheti vyisokoskorostnyih shpindelnyih uzlov*. Moskva: VNIITEMR, 1987. 52 s.
3. Push A.V., Zverev I.A. *Shpindelnyie uzlyi. Proektirovanie i issledovanie: monografiya. –«Stankin»*, 2000. 197 s.
4. Grigorev S.N., Grechishnikov V.A., Maslov A.R. *Instrumentalnyie sistemyi integrirovannyih mashinostroitelnyih proizvodstv: monografiya*. Moskva: FGBOU VPO MGTU «STANKIN», 2012. 194 s.
5. Gao X., Li B., Hong Ju., Guo Ju. Stiffness modeling of machine tools based on machining space analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 86, No. 5–8. P. 2093–2106.
6. Afsharizand B., Zhang X., Newman S.T., Nassehi A. Determination of machinability considering degradation of accuracy over machine tool life cycle. *Proceeding of the 47th CIRP conference on manufacturing systems*. 2014. No.17, P. 760–765. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.02.048>
7. Kong J., Cheng X. Modal analysis of CNC lathe's spindle based on finite element. *Advances in Engineering Research (AER)*. 2017. Vol.148. P. 318–321.

8. Popov V.I., Loktev V.I. Dinamika stankov. Kyiv: Tehnika, 1975. 136 s.
9. Krol O., Sokolov V. 3D modelling of angular spindle's head for machining centre. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2019. 1278, 012002. VSPID-2018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1278/1/012002>
10. Nikolaienko A.P. Formyrovanye poverkhnosty yzdeleya pry vybratsyonnoy obrabotke. *Vibratsiyy v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh*, №2 (58). Vinnyts'kyi natsional'nyy ahramnyy universytet, 2010. P. 167-184.
11. Krol O.S., Krol A.A., Burlakov E.I. Tverdotelnoe modelirovaniye i issledovaniye shpindel'nogo uzla obrabatyvayushchego tsentra. *Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «HPI»*. Seriya: Novi rishennya v suchasnykh tekhnolohiyakh. Harkiv: NTU «HPI», 2013. # 16(989). S. 14–18.
12. Krol O.S. Parametricheskoe modelirovaniye metallorazhushchih stankov i instrumentov. Monografiya. Lugansk: SNU im. V. Dallya, 2012. 116 s.
13. Krol O.S., Sokolov V.I. Trivimirne modelyuvannya metalorizalnih verstativ ta instrumental'nogo osnaschennya. Severodonetsk: SNU im. V. Dallya, 2016. 160 s.
14. Kharlamov, Y., Sokolov, V., Krol, O., Romanchenko, O.: Research of the mechanism of particles bonding with substrate during thermal spraying of coating. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 985, №. 1. P. 012037.
15. Sokolov, V., Krol, O., Romanchenko, O., Kharlamov, Y., Baturin, Y.: Mathematical model for dynamic characteristics of automatic electrohydraulic drive for technological equipment. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1553. P. 012013.
16. Krol O.S. Metody i protseduryi dinamiki shpindel'nykh uzlov: Monografiya. Lugansk: VNU im. V. Dallya, 2014. 154 s.
17. Kharlamov, Y., Sokolov, V., Krol, O., Romanchenko, O. Analysis of physical and chemical transformations during thermal spraying of coatings based on carbides of tungsten and chromium. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 985, №. 1. P. 012036.
18. Krol O.S., Hmelovskiy G.L. Optimizatsiya i upravlenie protsessom rezaniya: uchebnoe posobie. Kyiv: UMK VO, 1991. 140 s.
19. Nikolaienko A.P. Sovershenstvovaniye konstruksyy vybratsyonnykh stankov s U-obraznoy formoy konteynera. *Visnyk Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu KHPI*. Ser.: Novi rishennya v suchasnykh tekhnolohiyakh, №56(1029), 2013. P. 15–21.
20. Krol O. S., Suhorutchenko I. A. Trehmernoe modelirovaniye mnogooperatsionnogo stanka modeli SVM1F4 v srede KOMPAS 3D. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnolohiy*. 2014. T. 4. # 7 (70). S. 13–18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26250>
21. Shevchenko O.I., Melkonov G.L. Pristriy rozmagnichuvannya ustanovki magnitnoyi defektoskopiyi osi kolisnoyi pari. *Visnik Shidnoukrayinskogo natsional'nogo universitetu imeni Volodimira Dallya*, vip. 8(264), Sichen 2021, S. 66-72, doi:10.33216/1998-7927-2020-264-8-66-72
22. Krol O.S., Zamkovets D.M. Otsinka piddatlivosti pru-zhnoyi lanki shpindel-roztochna opravka v seredovischi APM WinMachine. *Visnik Shidnoukrayinskogo Natsional'nogo Universitetu imeni Volodimira Dallya*. 2020. # 4 (260). S. 40–45. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-40-45>
23. Surzhikov S.M., Krol O.S. Modelyuvannya shpindel'nogo vuzla bagatotsillovogo tokarnogo verstata v seredovischi «MAPLE». *Tekhnichni nauki v Ukrayini: suchasni tendentsiyyi rozvittu: materiali Vseukr. nauk.-teh. Internet-konf. m. Kyiv, 20–21 listopada 2019 r.* Kyiv: vid-vo Derzhavnogo universitetu Infrastrukturi ta tekhnolohiy, 2019. S. 71–73.
24. Kuzovov O.Yu., Krol O.S. Dinamichne modelyuvannya shpindel'nogo vuzla frezernogo verstata. *Tekhnichni nauki v Ukrayini: suchasni tendentsiyyi rozvittu: materiali Vseukr. nauk.-teh. Internet-konf. m. Kyiv, 20–21 listopada 2019 r.* Kyiv: vid-vo Derzhavnogo universitetu Infrastrukturi ta tekhnolohiy, 2019. S. 64–67.
25. Nikolaienko A.P., Kalmykov M.A. Osnovaniye vybora matematicheskoy modeli protsesa vibratsionnoy uprochnyayushchey obrabotki [Tekst]. *Vostochno-yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnolohiy*, 2008. №5/4(35). P. 53 – 57.
26. Zamriy A.A. Prakticheskii uchebnyy kurs CAD/CAE APM WinMachine. Uchebno-metodicheskoe posobie. Moskva: Izd-vo APM, 2004. 240 s.
27. Krol O., Sokolov V. Parametric modeling of machine tools for designers. Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. 112 p. <https://doi.org/10.7546/PMMTD.2018>
28. Krol O.S., Sokolov V.I. 3D Modeling Of Machine Tools For Designers. Sofia: Prof. Marin Drinov Academy Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. 140 p. https://doi.org/10.7546/3D_momtfd.2018
29. Krol O., Sokolov V. Modeling of carrier system dynamics for metal-cutting machines. *IEEE Proceedings 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 2018. P. 1–5.
30. Krol O.S., Zamkovets D.M. Otsinka piddatlivosti pru-zhnoyi lanki shpindel-roztochna opravka v seredovischi APM WinMachine. *Visnik Shidnoukrayinskogo Natsional'nogo Universitetu imeni Volodimira Dallya*. Severodonetsk: SNU im. V. Dallya, 2020. # 4 (260). S. 40–45. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-40-45>
31. Mitsyk A.V., Fedorovich V.A. Puti intensivatsii vibratsionnoy otdelechno-zachistnoy obrabotki kombinovaniem shem jenergeticheskikh vozdeystviy na rabochuju sredu i detali // *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tekhnologija*. 2011. № 6. s. 26 – 34.
32. Melkonov G. L., Vetryak E.S. «Udoskonalennya tokarnogo verstata 1A62 (16K20) shlyahom zamini standartnogo vuzla vstanovlenniam vzaemo peresuvnogo ritzsetrimacha dlya obrabotki detaley z malim diametrom pri vidriznih operatsiyah». *Visnik Shidnoukrayinskogo natsional'nogo universitetu imeni Volodimira Dallya*, vip. 4, vip. 1(249), Berezen 2019, S. 23-25
33. Mitsyk A.V., Fedorovich V.O. Ocinka effektivnosti vibratsionnoy ozdobljuval'no-zachishhuval'noy obrabotki u rezervuarah z mul'tienergetichnim vplivom i riznoju formoju poperechnogo pererizu. *Rizannja ta instrument v tekhnologichnih sistemah: Mizhnar. nauk.-teh. zb. Kharkiv: NTU «KPI»*, 2019. Vip. 90. S. 51 – 63.
34. Mitsyk A.V., Fedorovich V.O. Process otdelechno-zachistnoy vibroobrabotki i parametry, vlijajushhie na ego proizvoditel'nost'. *Rizannja ta instrument v tekhnologichnih sistemah: Mizhnar. nauk.-teh. zb. Kharkiv: NTU «KPI»*, 2013. Vip. 83. S. 184 – 194.
35. Melkonov G. L., Glazunov Ya.I. Stykist instrumentiv z krugovoyu rizhuchoyu kromkoyu. *Visnik Shidnoukrayinskogo natsional'nogo universitetu imeni Volodimira Dallya*, vip. 1(249), Berezen 2019, S. 26-29.

36. Mitsyk A.V., Fedorovich V.O. Metodichni osnovi teoretichnogo ta eksperimental'nogo ocinjuvannja procesu vibroobrobki detalej tehnologichnimi sistemami kombinovanogo dinamichnogo vplivu vil'nogo abrazivnogo seredovishha. Rizannja ta instrument v tehnologichnih sistemah: Mizhnar. nauk.-tehn. zb. Kharkiv: NTU «KPI», 2019. Vip. 89. S. 100 – 108.
37. Mitsyk A.V., Fedorovich V.O. Analitika, komentarii i klassifikacija tehnologij otdelochno-zachistnoj vibroobrobki, sozdannyh kombinirovaniem razlichnyh shem jenergeticheskogo vozdeystvija. Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni Kharkiv: NTU «KPI», 2016. Vip. 11. S. 175 – 189.

Кроль О.С. Оценка динамических характеристик шпиндельного узла многоцелевого токарного станка в среде APM WinMachine

Рассмотрена проблема анализа работоспособности многофункционального токарного станка, оснащенного разнообразной модульной оснасткой. Разработан статистический формуляр для оценки характеристик жесткости двухпорного шпиндельного узла со сменными инструментальными блоками. Показана эффективность модуля APM Structure-3D в условиях сложного характера деформирования шпиндельных опор. Дана оценка напряженно-деформированного состояния шпинделя с помощью анализа полей напряжений, рассчитанных методом конечных элементов. Построен ряд частотных характеристик, отражающих динамику шпиндельного узла при комбинированном пространственном нагружении.

Ключевые слова: токарный станок, формообразующий узел, статический формуляр, угловая податливость, поле напряжений, частотная характеристика.

Krol O.S. Estimation of spindle node dynamic characteristics of a multipurpose turning machine in the APM WinMachine environment

A new procedure is proposed for solving the problem of analyzing the dynamics of the functioning of a multifunctional lathe, which is equipped with additional modular equipment. The set of modular equipment, expanding the technological capabilities of the machine in question, includes a rosette, milling and grinding mandrel. A static form has been developed in an analytical form as a means of probing (preliminary

assessment of compliance) of the spindle assembly on the scale of the working space of the machine. The peculiarity of this form is its symbolic representation, obtained in the Maple mathematical environment using the corresponding symbolic kernel of this environment. This opens up opportunities to control the processing process at the limit of the stiffness characteristics of the elastic system "spindle-tool block". The effectiveness of the APM Structure-3D module under conditions of the complex nature of deformation of spindle bearings is shown. A feature of evaluating the characteristics of rigidity in this module is the additional consideration of the angular compliance of the support. In this case, in one support, a rigid and an elastic mount is considered as different objects that act together. A comprehensive calculation of the stress-strain state of the spindle structure has been performed in the APM Structure-3D module. The state of the spindle is assessed using the analysis of stress fields calculated by the finite element method using the example of a typical turning operation on a multi-purpose lathe MS-03. It is proved that the maximum shear stresses in the spindle sections (material Steel 20X) do not exceed the permissible ones ($[\tau] = 635 \text{ MPa}$) even with a safety factor. A number of frequency characteristics reflecting the dynamics of the spindle assembly under combined spatial loading are constructed. A table of the spectrum of natural frequencies of the elastic system of the spindle assembly is presented. For the most critical third and fourth natural frequencies, the corresponding vibration modes are constructed. The main bending form is highlighted, which makes it possible to consider the investigated structure as a second-order linear vibrational link. For this link in the MatLab environment, the amplitude-phase-frequency characteristics are built, which reflect the vibration resistance of the spindle assembly according to the Nyquist criterion.

Keywords: lathe, forming unit, static form, angular compliance, stress field, frequency response.

Кроль Олег Соломонович – к.т.н., доц., професор кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк)
krolos.snu.edu@gmail.com

Стаття подана 01.02.2021 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-41-48>

УДК 621.9.06

ОЦІНКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМАЦІЙНОГО СТАНУ ШПИНДЕЛЯ БАГАТООПЕРАЦІЙНОГО ВЕРСТАТА

Кроль О.С., Жданок Г.М.

ESTIMATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE MULTIOPERATION MACHINE SPINDLE

Krol O.S., Zhdanok G.M.

Запропоновано комплексну процедуру аналізу конструкції шпindelного вузла модернізованого токарного верстата. Наведено конструктивна і розрахункова схеми двухопорного полого шпindelа з використанням модуля аналізу напружено-деформованого стану балок АРМ Беат. Розглянуто поперечна згортка приводу головного руху токарного верстата і визначена просторова схема сил, що діють на шпindel. Виконано розрахунок статичної міцності за величиною еквівалентних напружень, що виникають в конструкції шпindelа. Дана оцінка рівня дотичних напружень у поперечному перетині конструкції методом кінцевих елементів.

Ключові слова: формотворчий вузол, привід багатоцільового верстата, жорсткість, балка, метод кінцевих елементів.

Вступ. Зростаючі вимоги до швидкохідності, надійності і зниження маси металорізального обладнання призводять до ускладнення розрахунків на міцність і жорсткість і робить доцільним використання розвинених систем автоматизованого проектування.

Ефективність процесу конструювання металорізальних верстатів залежить від опрацьованості формотворчих вузлів. Вузол шпindelа (ШВ) є кінцевою ланкою приводу головного руху і частиною несучої системи багатоцільового верстата та надає найістотніший вплив на точність, надійність і продуктивність всього верстата, тому до нього пред'являють особливі вимоги.

При моделюванні шпindelного вузла, формуючи комплексну модель, необхідно вирішити задачу упругодеформаційного опису шпindelного вузла. Вже в ранніх роботах [1, 2] наведені результати досліджень, пов'язаних з розподілом навантажень між усіма підшипниками і визначенням деформацій і зміщення шпindelів, що мають кілька підшипників в кожній опорі. Таке завдання зводиться до спільного вирішення рівнянь:

- трьох моментів, складених для кожної пари суміжних прольотів;
- зміщення опор в функції опорних реакцій;
- опорних реакцій, отриманих з умови рівноваги ШВ.

Разом з тим, застосування запропонованих методів упругодеформаційного опису, не дозволяє аналізувати з необхідною точністю вплив зовнішніх факторів на властивості ШВ через спрощеного підходу до опису компонентів ШВ.

У численних дослідженнях працездатності, пов'язаної з напружено-деформованим станом шпindelних вузлів ставиться завдання створення комплексної моделі цих вузлів в рамках інтегрованих САПР. На базі такої розробленої моделі ШВ обговорюється новий підхід, який досліджує поле статичної жорсткості робочого простору високопродуктивного комп'ютеризованого верстата з ЧПУ. В рамках цього методу створена параметрична модель з урахуванням шести-спрямованої статичної жорсткості для проектування та оцінки статичної жорсткості в масштабі робочого простору верстата. Отримані результати використовуються для подальших обговорень з оцінки та зменшення помилок обробки під різними навантаженнями.

Для дослідження жорсткості і податливості формотворчих вузлів необхідно сформулювати аналітичні залежності вихідних характеристик шпindelного вузла від впливаючих на нього параметрів [4-6]. Такі залежності входять в упругодеформаційну модель двухопорної фланцевої конструкції ШУ різного типорозміру. Особливістю об'єкта дослідження є наявність двох компонентів:

уніфікований двухопорний шпindelний вузол, який може бути використаний в різних верстатах токарної групи, в тому числі що відносяться до класу багатоінструментних, (багатоопераційних, багатоцільових) верстатів;

змінний компонент, що наструюється на різну номенклатуру виробів, що виготовляються, представлений у вигляді заготовки, або для багаточільових - інструментального блоку (інструментального оснащення).

Найбільш поширеними в задачах моделювання шпіндельних вузлів є стрижневі кінцеві елементи. Для коректності розв'язуваної задачі слід визначити умову однозначної закріплення в просторі, з одного боку і наявність вільних вузлів з дозволеними переміщеннями (внаслідок деформації під дією сил різання) з іншого.

У разі подання шпинделя у вигляді балки на двох шарнірних опорах, в яких заборонені переміщення в напрямку зовнішньої сили, такі вільні вузли відсутні. Це призводить до необхідності введення додаткового вільного вузла на початкових етапах 3D-моделювання, в якому допускається переміщення в напрямку діючих навантажень [7-9]. В іншому випадку завдання стає некоректним, тому що при розрахунку методом кінцевих елементів, в першу чергу, визначаються переміщення вузлів. Внутрішні навантаження в вузлах і напруги обчислюються на основі його переміщень. Така ситуація призводить до виникнення зворотного зв'язку (*перший тип*) між етапом побудови 3D-моделі і етапом дослідження ефективності конструкції, наприклад, за критерієм жорсткості.

Поряд з необхідністю врахування особливостей закріплення і навантаження, які визначаються на стадії побудови розрахункових схем шпинделя, виникає також ще один вид зворотного зв'язку. Такий зворотній зв'язок пов'язан з методами вирішення завдань оцінки жорсткості. Так, для шпинделів, які працюють на вигин з незначним крутним моментом (для тонкого точіння, розточування), досить використання в силовому розрахунку відомих методів опору матеріалів, таких як метод початкових параметрів. В іншому випадку, при значній частці крутного моменту (для операції фрезерування на багаточільовий верстаті з додатковим модульним оснащенням), застосовується метод кінцевих елементів. В цьому випадку поперечний переріз шпинделя (у вигляді стрижня) розбивається на плоскі кінцеві елементи, які взаємодіють між собою за допомогою вузлів. Така ситуація призводить до виникнення зворотного зв'язку (*другий тип*) між етапом побудови 3D-моделі і етапом вибору метода розрахунку конструкції, що проектується.

Виникає проблема пошуку компромісу при формуванні формалізованого представлення формотворчого вузла верстата на різних етапах його проектування і пошуку методів та засобів її вирішення.

Метою даної роботи є створення такої комплексної процедури дослідження працездатності шпіндельного вузла багатоопераційного токарного верстату за критерієм міцності і жорсткості, яка реалізує експрес-метод розрахунку на початковому

етапі проектування і уточнений метод вибору оптимальної конструкції.

Матеріали та результати дослідження. Серед програмних засобів, призначених для розрахунку і проектування валів і шпинделів довільної форми при довільному характері навантаження і закріплення, виділяється спеціалізований модуль APM Beam [10]. В процесі проектування важливо знати велике число різних параметрів, які в тій чи іншій формі можна використовувати для аналізу його стану при навантаженні. Для цього слід враховувати можливість вбудованого в систему постпроцесора, який дозволяє переглянути наступні результати обчислення:

- реакції в опорах шпинделя, що формалізуються у вигляді балкової конструкції;
- розподіл моментів і кутів вигину по довжині балки;
- розподіл поперечних і поздовжніх деформацій;
- розподіл еквівалентних напружень по довжині балки;
- карти розподілу еквівалентних напружень по довжині балки;
- частоти власних коливань і власних форм балки на відповідних частотах.

На етапі підготовки даних в системі використовується спеціалізований редактор, побудований на принципах об'єктно-орієнтованого програмування. У спеціалізованому редакторі передбачено введення геометрії і опор різних типів. Є також можливість завдання силових факторів в довільній точці на осі балки, представлених у вигляді: зосереджених сил в двох взаємно перпендикулярних площинах; зосереджених моментів вигину в цих площинах; розподілених просторово-орієнтованих сил і моментів обертання. Крім зазначених силових факторів, для виконання динамічних розрахунків передбачено введення додаткових мас, які впливають на характер поперечних коливань шпинделя [11-13]. Можна ввести додатково моменти інерції, що вносять істотний внесок в величини і характер крутильних коливань. Маси і моменти інерції, що задаються дозволяють моделювати зовнішні деталі, встановлені на шпинделі. Слід зазначити, що власна маса шпинделя при виконанні динамічного розрахунку враховується автоматично.

При виконанні перевірочних розрахунків шпинделів використовуються комбіновані методи:

- метод Мора, який призначений для розрахунку переміщень і розкриття статичної невизначеності на етапі розрахунку коефіцієнтів канонічних рівнянь методу сил;
- метод розрахунку еквівалентних нормальних і дотичних напружень по енергетичній теорії міцності [14-16].

Характерною особливістю модуля APM Beam є розрахунок напружень крутіння в поперечному перерізі шпинделя методом кінцевих елементів (генеруються автоматично трикутні кінцеві елементи).

При необхідності можна підібрати найбільш підходяще для даної конструкції поперечний переріз.

Розглянемо в якості об'єкта моделювання шпиндель багатоопераційного токарного верстата моделі MC03, широкоуніверсальність якому забезпечує набір модульного оснащення, призначений для виконання таких видів механічної обробки, як точіння, нарізування різьблення, фрезерування, свердління, розточування, а також шліфування і заточування інструменту [17-19]. Порожній шпиндель верстата дозволяє використовувати в якості заготовки прутковий матеріал.

Шпиндель верстата MC03 (Рис.1) являє собою двухопорного балку, передня опора якого змонтована на здвоєних радіально-упорних кулькових підшипниках 4-46112 за схемою «тандем-О» з натягом шляхом використання двох різновисотних проміжних втулок, а задня опора на одинарному підшипнику 4-46209 з попереднім натягом пружинного типу.

Просторова система сил, що діють на шпиндель – сили в зубчастому зачепленні і складові сил різання (Рис.1, б), обумовлена поперечною згорткою верстата, ескіз якої представлений на Рис. 2. При побудові поперечної згортки використані засоби побудови параметричної моделі компонування, що надаються модулем APM Graph. [20-22].

Завдання розрахунку балки може бути сформульовано як визначення таких значень конструктивних характеристик балки (шпинделя), які забезпечують задані значення коефіцієнтів запасу міцності при заданому навантаженні.

За допомогою модуля APM Beam здійснено розрахунок статичної міцності шпинделя, який включає в себе визначення моментів вигину і крутіння в обраних перетинах, а також розрахунок напружень вигину і крутіння. Результати розрахунку моментів вигину представляються у вигляді епюр, побудованих в двох взаємно перпендикулярних площинах (Рис.3, а) а міцність балки оцінюється

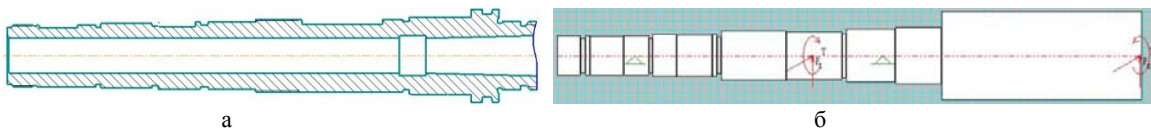


Рис. 1. Шпиндель багатоцільового токарного верстата:
а – ескіз; б – розрахункова схема

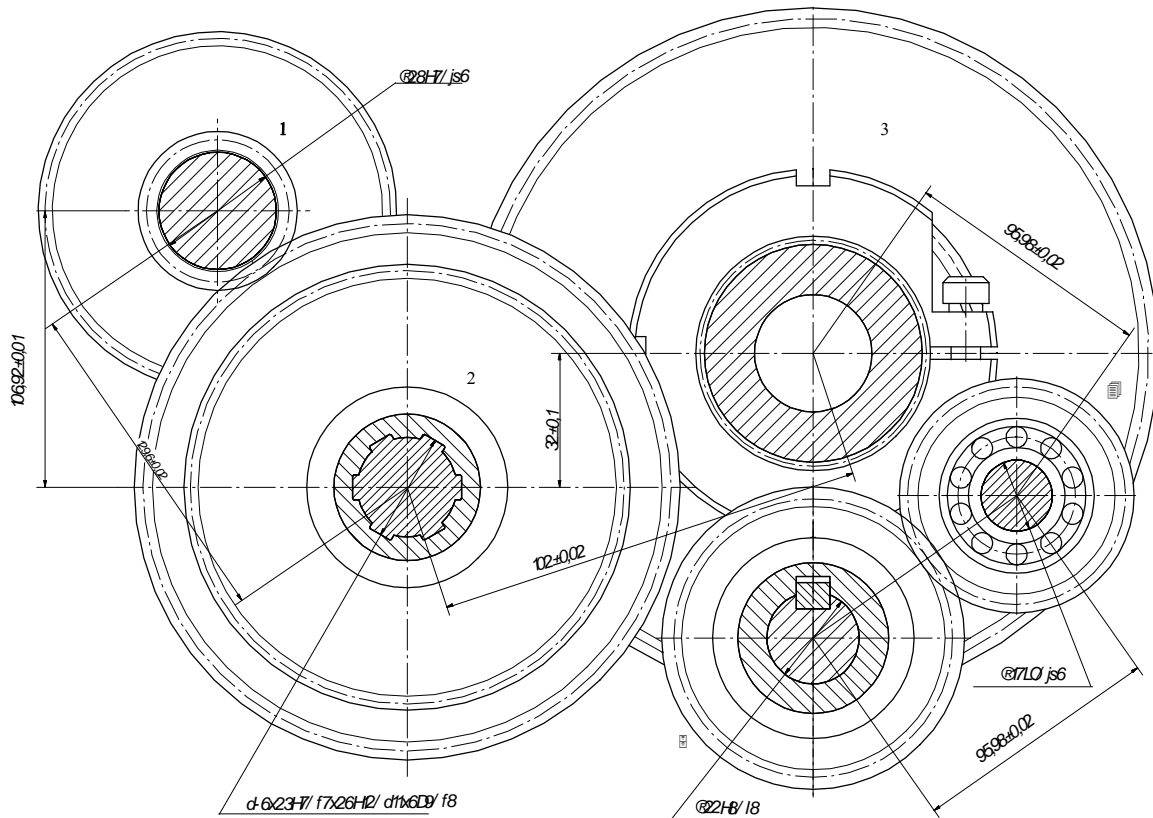


Рис. 2. Поперечна згортка верстата моделі MC03

величиною еквівалентних напружень, розрахованих виходячи з гіпотези максимальних дотичних напружень [23-25] (рис.3, б). Статична міцність даної конструкції є достатньою, тому що коефіцієнт запасу (відношення границі плинності матеріалу балки (шпинделя) до величини еквівалентного напруження в найбільш навантаженої точці перевищує допустимі значення в 1.5 ... 2.5).

Розрахунки напружень крутіння реалізуються методом кінцевих елементів, і дозволяють оцінити

розподіл еквівалентних напружень в поперечних перерізах [26-28]. Найбільші напруги діють в точках, найбільш віддалених від нейтральної осі балки (що відповідає відомим положенням про розподіл напружень в поперечних перетинах). Для поперечного перерізу (сегмент 11 - ступінь шпинделя під зубчасте колесо ($z = 80$; $m = 2$)) карта напруг із зображеною справа колірною шкалою напруг представлена на Рис.4.

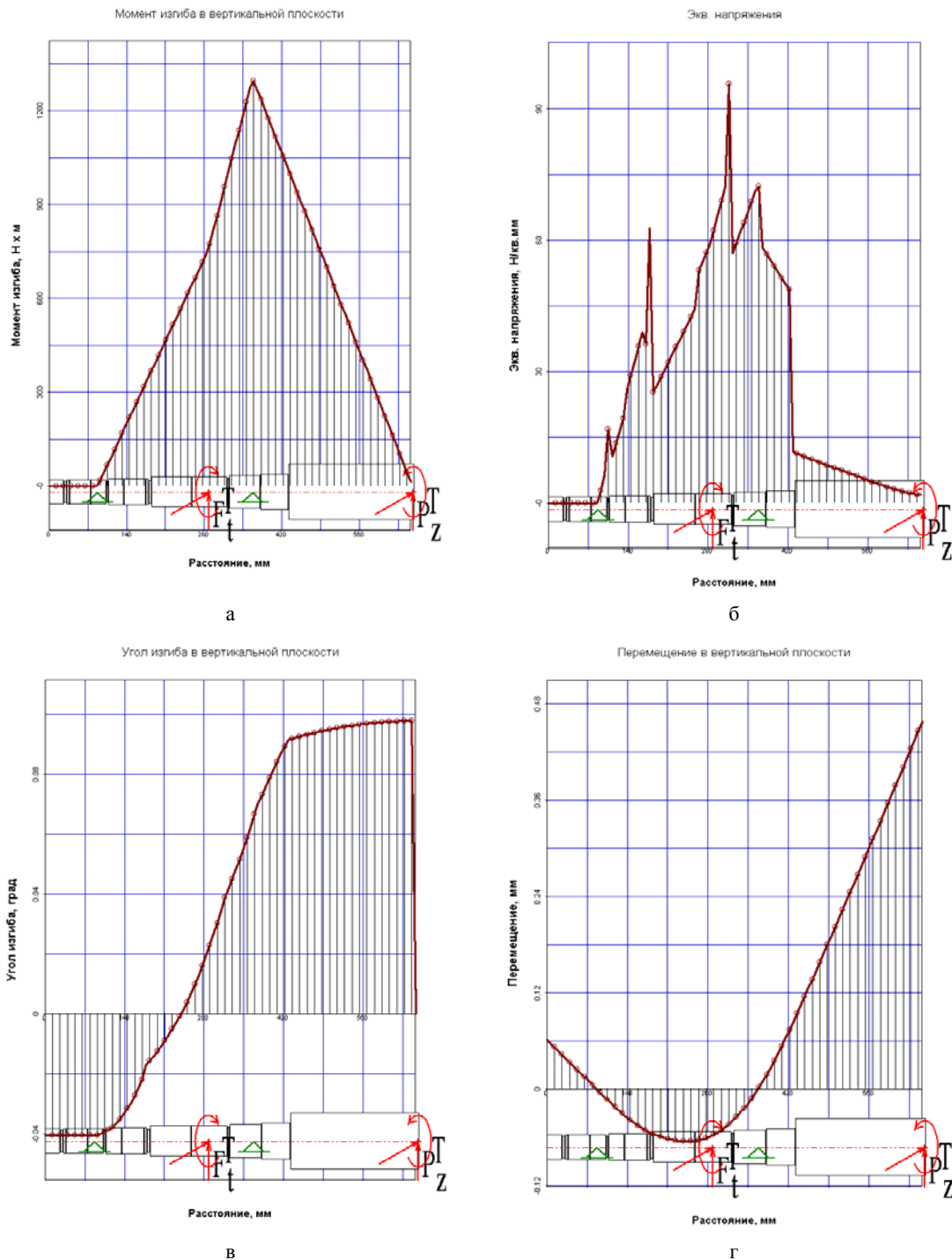
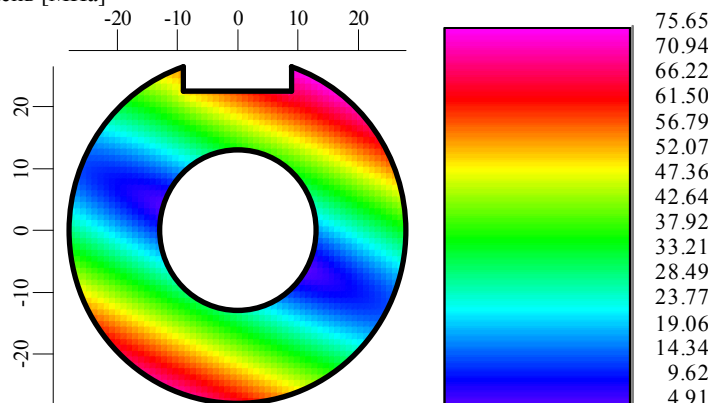


Рис.3. Розрахунок шпинделя в модулі APM Beam: а – епюри згинальних моментів; б – еквівалентних напружень; в – кутів вигину; г – переміщень у вертикальній площині

Сегмент 11

Діапазон кольорів напружень [МПа]



Параметри перетину:

Площа 1842.874 мм²;

Центр мас: X = -0.002; Y = -1.209 мм

Момент інерції навколо горизонтальної осі: 401529.856 мм⁴навколо вертикальної осі: 458053.015 мм⁴полярний момент інерції: 859582.87 мм⁴

Кут нахилу головних центральних осей: 0.132 град

Максимальна напруга в найбільш небезпечному перерізі: 75.653 МПа

Рис. 4. Карта напружень в поперечному перерізі шпинделя

Аналіз епюр (Рис. 3) показує достатню працездатність даної конструкції за критерієм міцності. Є достатній запас за показником еквівалентного напруження, що створює резерви для подальшого вдосконалення в напрямку рівномірності різних ступенів шпинделя [29, 30].

Застосування методу кінцевих елементів в модулі APM Beam показує картину розподілу напружень в рамках небезпечного поперечного перерізу. Поле напружень ілюструє відповідність цього розподілу наявних теоретичних даних

Висновки. В результаті проведених досліджень отримані наступні результати:

1. Розроблена комплексна процедура оцінки напружено-деформованого стану шпинделя багатоопераційного верстата на ранніх і заключних етапах проектування.

2. Виконана початкова оцінка працездатності конструкції шпинделя (матеріал Сталь 40X) шляхом розрахунку статичної міцності виходячи з гіпотези максимальних дотичних напружень. Аналіз отриманих епюр моментів вигину і еквівалентних напружень вигину показав, що максимальний рівень напруження знаходиться на рівні 90 МПа, а параметр жорсткості по куту повороту не перевищує 0.1 град, що свідчить про здатність формотворного вузла виконувати свої функції. При цьому для виявлення просторової системи сил побудована поперечна компоновка приводу головного руху токарного верстата MC03 з використанням інструментарію параметризації.

3. Проведено аналіз напружено-деформованого стану конструкції на заключних етапах створення проекту. Використовуючи метод кінцевих елементів в середовищі модуля APM Beam, отримані поля напружень, повний розрахунок вхідних параметрів, який показав уточнені дані - напруга в небезпечному

перерізі не перевищує 76 МПа, що свідчить про працездатність проектованої конструкції шпинделя.

4. Таким чином, проаналізовані можливості модуля APM Beam для дослідження і перевірконого розрахунку шпинделя багатоцільового токарного верстата. Перевага даного модуля полягає в тому, що його засобами здійснюється визначення напружено-деформованого стану шпинделя як балки на двох опорах в умовах довільного навантаження і закріплення. Отримані результати досить просто оцінити і намітити шляхи вдосконалення конструкцій за критеріями міцності і жорсткості. Використання модуля APM Beam для моделювання шпиндельних вузлів дозволяє збільшити продуктивність процесу проектування і підвищити технічний рівень прийнятих проектних рішень.

Література

1. Металлорежущие станки: Учебник для машиностроительных вузов/Под ред. В.Э. Пуша. Москва: Машиностроение, 1985. 575 с.
2. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем. Справ очник-учебник в 3-х т. Т.2. Ч.1. Расчет и конструирование узлов и элементов станков/А.С.Проников и др. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1995. 371с.
3. Gao X., Li B., Hong Ju., Guo Ju. Stiffness modeling of machine tools based on machining space analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 86, No. 5–8. P. 2093–2106.
4. Krol O., Sokolov V. 3D modelling of angular spindle's head for machining centre. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2019. 1278, 012002. VSPID-2018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1278/1/012002>
5. Попов В.И., Локтев В.И. Динамика станков. Київ: Техніка, 1975. 136 с.

6. Krol O., Sokolov V. Machine tool spindle dynamics for designers. Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2020. 143 p. <https://doi.org/10.7546/MTSDD.2020>
7. Замрий А.А. Практический учебный курс САД/САЕ АРМ WinMachine. Учебно-методическое пособие. Москва: Изд-во АПМ, 2004. 240 с.
8. Шелофаст В.В., Чугунова Т.Б. Основы проектирования машин. Примеры решения задач. Москва: Изд-во АПМ, 2004. 240 с.
9. Krol O.S., Sokolov V.I. [3D Modeling Of Machine Tools For Designers](https://doi.org/10.7546/3D_momtfd.2018). Sofia: Prof. Marin Drinov Academy Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. 140 p. https://doi.org/10.7546/3D_momtfd.2018
10. Руководство по использованию модуля АРМ Beam. Москва: Изд-во АПМ, 2005. 69 с.
11. Мицьк А.В., Федорович В.А. Развитие новых технологий вибрационной отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей общемашиностроительного применения. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків: НТУ «ХПІ», 2012. № 47 (953). С. 226 – 233.
12. Міцик А.В., Федорович В.О., Грабченко А.І. Механофізико-хімічне моделювання процесу руйнування поверхні деталі у вільному абразивному середовищі. Різання та інструмент в технологічних системах: Міжнар. наук.-техн. зб. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. Вип. 92. С. 62 – 67. <https://10.20998/2078-7405.2020.92.08>
13. Mitsyk A.V., Fedorovich V.A., Grabchenko A.I. The effect of a shock wave in an oscillating working medium during vibration finishing-grinding processing. Cutting & Tools in Technological System. Kharkiv: NTU “KPI”, 2020. Ed. 93. P. 43 – 55. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2020.93.06>
14. Кріль О.С., Кріль А.А., Бурлаков Е.И. Твердотельное моделирование и исследование шпиндельного узла обрабатывающего центра. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків: НТУ «ХПІ», 2013. № 16(989). С. 14–18.
15. Кріль О.С., Соколов В.І. Тривимірне моделювання металорізальних верстатів та інструментального оснащення. Севродонецьк: СНУ ім. В. Даля, 2016. 160 с.
16. Krol O., Sokolov V. Modeling of carrier system dynamics for metal-cutting machines. *IEEE Proceedings 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 2018. P. 1–5.
17. Krol O.S., Osipov V.I. Modeling of construction spindle's node machining centre SVM1F4/Commission of Motorization and Power Industry of Agriculture. – OL PAN, 2013, Vol.13, is.3, Lublin, Poland. – P. 108–113.
18. Кріль О.С., Синдеева Е.В., Кріль А.А. Моделирование конструкции четырехопорного вала в САПР АРМ «WinMachine». *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні*. Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2008. С. 139–143.
19. Кріль О.С., Кріль А.А. Расчет податливости станка СФ68ВФ4 и моделирование динамики формообразования. *Вісник СевНТУ*. 2011. Вип. 117. С. 81–84.
20. Кріль О.С. Параметрическое моделирование металлорежущих станков и инструментов. Монография. Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2012. 116 с.
21. Krol O., Sokolov V. Parametric modeling of machine tools for designers. Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. 112 p. <https://doi.org/10.7546/PMMTD.2018>
22. Krol O., Sokolov V., Tsankov P. Modeling of vertical spindle head for machining center. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, No. 1553. 012012. – VSPID-2019. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1553/1/012012>
23. Кріль О. С., Сухорутченко И. А. Трехмерное моделирование многооперационного станка модели СВМ1Ф4 в среде компас 3D. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. Т. 4. № 7 (70). С. 13–18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26250>
24. Kundrák J., Morgan M., Mitsyk A.V., Fedorovich V.A. The effect of the shock wave of the oscillating working medium in a vibrating machine's reservoir during a multi-energi finishing-grinding vibration processing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 106, p. 4339 – 4353 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04844-2>
25. Kharlamov, Y., Sokolov, V., Krol, O., Romanchenko, O.: Research of the mechanism of particles bonding with substrate during thermal spraying of coating. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 985, №. 1. P. 012037.
26. Kundrák J., Mitsyk A.V., Fedorovich V.A., Morgan M., Markopoulos A.P. The Use of the Kinetic Theory of Gases to Simulate the Physical Situations on the Surface of Autonomously Moving Parts During Multi-Energy Vibration Processing. *Materials* Vol. 12 (19), p. 1 – 26, (2019). <https://doi.org/10.3390/ma12193054>
27. Sokolov, V., Krol, O., Romanchenko, O., Kharlamov, Y., Baturin, Y.: Mathematical model for dynamic characteristics of automatic electrohydraulic drive for technological equipment. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1553. P. 012013.
28. Kharlamov, Y., Sokolov, V., Krol, O., Romanchenko, O. Analysis of physical and chemical transformations during thermal spraying of coatings based on carbides of tungsten and chromium. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 985, №. 1. P. 012036
29. Кріль О.С. Методи и процедури динаміки шпиндельних узлов: Монографія. Луганськ: ВНУ ім. В. Даля, 2014. 154 с.
30. Кріль О.С., Хмеловский Г.Л. Оптимизация и управление процессом резания: учебное пособие. Київ: УМК ВО, 1991. 140 с.

References

1. *Metallorzechuschie stanki: Uchebnik dlya mashinostroitelnykh vtuzov/Pod red. V.E. Pusha*. Moskva: Mashino-stroenie, 1985. 575 s.
2. *Proektirovanie metallorzechuschiy stankov i stanochnyykh sistem. Spravochnik-uchebnik v 3-h t. T.2. Ch.1. Raschet i konstruirovaniye uzlov i elementov stankov/A.S.Pronikov i dr.* Moskva: Izdatelstvo MGTU im. N.E. Bauman, 1995. 371s.
3. Gao X., Li B., Hong Ju., Guo Ju. Stiffness modeling of machine tools based on machining space analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 86, No. 5–8. P. 2093–2106.
4. Krol O., Sokolov V. 3D modelling of angular spindle's head for machining centre. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2019. 1278, 012002. VSPID-2018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1278/1/012002>
5. Popov V.I., Loktev V.I. *Dinamika stankov*. Kyiv: Tehnika, 1975. 136 s.
6. Krol O., Sokolov V. Machine tool spindle dynamics for designers. Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing

- House of Bulgarian Academy of Sciences, 2020. 143 p. <https://doi.org/10.7546/MTSDD.2020>
7. Zamriy A.A. *Prakticheskiy uchebnyiy kurs CAD/CAE APM WinMachine. Uchebno-metodicheskoe posobie.* Moskva: Izd-vo APM, 2004. 240 s.
 8. Shelofast V.V., Chugunova T.B. *Osnovniy proektirovaniya mashin. Primeryi resheniya zadach.* Moskva: Izd-vo APM, 2004. 240 s.
 9. Krol O.S., Sokolov V.I. *3D Modeling Of Machine Tools For Designers.* Sofia: Prof. Marin Drinov Academy Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. 140 p. https://doi.org/10.7546/3D_momtfd.2018
 10. *Rukovodstvo po ispolzovaniyu modulya ARM Beam.* Moskva: Izd-vo APM, 2005. 69 s
 11. Mitsyk A.V., Fedorovich V.O. *Razvitie novykh tekhnologiy vibratsionnoy otdelechno-zachistnoy i uprochnyayushhej obrabotki detalej obshhemashinostroitel'nogo primeneniya.* Visnik Nacional'nogo tekhnichnogo universitetu «HPI». Seriya: Novi rishenniya v suchasniy tekhnologiyah. Kharkiv: NTU «KPI», 2012. № 47 (953). S. 226 – 233.
 12. Mitsyk A.V., Fedorovich V.O., Grabchenko A.I. *Mehano-fiziko-himichne modeljuvannya procesu rujnuvannya poverhni detali u vil'nomu abrazivnomu seredovishhi. Rizannya ta instrument v tekhnologichniy sistemah: Mizhnar. nauk.-tehn. zb.* Kharkiv: NTU «KPI», 2020. Vip. 92. S. 62 – 67. <https://10.20998/2078-7405.2020.92.08>
 13. Mitsyk A.V., Fedorovich V.A., Grabchenko A.I. *The effect of a shock wave in an oscillating working medium during vibration finishing-grinding processing. Cutting & Tools in Technological System.* Kharkiv: NTU «KPI», 2020. Ed. 93. P. 43 – 55. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2020.93.06>
 14. Krol O.S., Krol A.A., Burlakov E.I. *Tverdetelnoe modelirovanie i issledovanie shpindelnoy uzla obrabatyvayushego tsentra. Visnik Natsionalnogo tekhnichnogo universitetu «HPI». Seriya: Novi rishenniya v suchasniy tekhnologiyah.* Harkiv: NTU «HPI», 2013. # 16(989). S. 14–18.
 15. Krol O.S., Sokolov V.I. *Trivimirne modelyuvannya metalorizalnih verstativ ta instrumentalnogo osnashchennya.* Severodonetsk: SNU im. V. Dalya, 2016. 160 s.
 16. Krol O., Sokolov V. *Modeling of carrier system dynamics for metal-cutting machines. IEEE Proceedings 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon).* 2018. P. 1–5.
 17. Krol O.S., Osipov V.I. *Modeling of construction spindle's node machining centre SVM1F4/Comission of Motorization and Power Industry of Agriculture.* – OL PAN, 2013, Vol.13, is.3, Lublin, Poland. – P. 108–113.
 18. Krol O.S., Sineeva E.V., Krol A.A. *Modelirovanie konstruktivnykh chetyrehopornogo vala v SAPR ARM «WinMachine». Resursozberigayuchi tekhnologiyi virobnitstva ta obrobki tiskom materialiv u mashinobuduvanni.* Lugansk: SNU Im. V.Dalya, 2008. S. 139–143.
 19. Krol O.S., Krol A.A. *Raschet podatlivosti stanka SF68VF4 i modelirovanie dinamiki formoobrazovaniya.* Visnik SevNTU. 2011. Vip. 117. S. 81–84.
 20. Krol O.S. *Parametricheskoe modelirovanie metallorizhuschih stankov i instrumentov.* Monografiya. Lugansk: SNU im. V. Dalya, 2012. 116 s.
 21. Krol O., Sokolov V. *Parametric modeling of machine tools for designers.* Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. 112 p. <https://doi.org/10.7546/PMMTD.2018>
 22. Krol O., Sokolov V., Tsankov P. *Modeling of vertical spindle head for machining center. Journal of Physics: Conference Series.* 2020, No. 1553. 012012. – VSPID-2019. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1553/1/012012>
 23. Krol O. S., Suhorutchenko I. A. *Trehmernoe modelirovanie mnogooperatsionnogo stanka modeli SVM1F4 v srede KOMPAS 3D. Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy.* 2014. T. 4. # 7 (70). S. 13–18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26250>
 24. Kundrák J., Morgan M., Mitsyk A.V., Fedorovich V.A. *The effect of the shock wave of the oscillating working medium in a vibrating machine's reservoir during a multi-energi finishing-grinding vibration processing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 106, p. 4339 – 4353 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04844-2>
 25. Kharlamov, Y., Sokolov, V., Krol, O., Romanchenko, O.: *Research of the mechanism of particles bonding with substrate during thermal spraying of coating. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2020. Vol. 985, №. 1. P. 012037.
 26. Kundrák J., Mitsyk A.V., Fedorovich V.A., Morgan M., Markopoulos A.P. *The Use of the Kinetic Theory of Gases to Simulate the Physical Situations on the Surface of Autonomously Moving Parts During Multi-Energy Vibration Processing. Materials* Vol. 12 (19), p. 1 – 26, (2019). <https://doi.org/10.3390/ma12193054>
 27. Sokolov, V., Krol, O., Romanchenko, O., Kharlamov, Y., Baturin, Y.: *Mathematical model for dynamic characteristics of automatic electrohydraulic drive for technological equipment. Journal of Physics: Conference Series.* 2020. Vol. 1553. P. 012013.
 28. Kharlamov, Y., Sokolov, V., Krol, O., Romanchenko, O. *Analysis of physical and chemical transformations during thermal spraying of coatings based on carbides of tungsten and chromium. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2020. Vol. 985, №. 1. P. 012036
 29. Krol O.S. *Metody i protseduryi dinamiki shpindelnykh uzlov: Monografiya.* Lugansk: VNU im. V. Dalya, 2014. 154 s.
 30. Krol O.S., Hmelovskiy G.L. *Optimizatsiya i upravlenie protsessom rezaniya: uchebnoe posobie.* Kyiv: UMK VO, 1991. 140 s.
- Кроль О.С., Жданок Г.Н. Оценка напряженно-деформированного состояния шпинделя многооперационного станка**
Предложена комплексная процедура анализа конструкции шпиндельного узла модернизированного токарного станка. Приведена конструктивная и расчетная схемы двухопорного полого шпинделя с использованием модуля анализа напряженно-деформированного состояния балок АРМ Beam. Рассмотрена поперечная свертка привода главного движения токарного станка и определена пространственная схема сил, действующих на шпиндель. Выполнен расчет статической прочности по величине эквивалентных напряжений, возникающих в конструкции шпинделя. Дана оценка урона касательных напряжений в поперечном сечении конструкции методом конечных элементов.
Ключевые слова: *формообразующий узел, привод многоцелевого станка, жесткость, балка, метод конечных элементов.*
- Krol O.S., Zhdanok G.M. Estimation of the stress-strain state of the multi-operation machine spindle**
A complex procedure for analyzing the design of the spindle assembly for a modernized lathe is proposed. A feature of the problem under consideration is the implementation

of an express procedure for assessing the structure spindle performance by the method of initial parameters at the initial stages of design. The effectiveness of the finite element method application at the final stages of design, including in verification calculations based on strength and stiffness criteria is shown. The structural and design schemes of a two-support hollow spindle using the module for analyzing the stress-strain state of beams APM Beam are presented. Attention is focused on the universality of the APM Beam module, which combines the algorithms of the matrix method of initial parameters and effective algorithms of finite elements. The sufficiency of the use for the strength problem classical analytical representation, solved by the method of initial parameters, in the case of considering the operations of finishing turning with an insignificant torque, is noted. The necessity of using the finite element method for technological operations such as face milling with a significant portion of the torque is shown. The transverse layout of the main motion drive of the lathe is considered and the spatial diagram of the forces acting on the spindle is determined. A feature of the procedure for constructing the transverse layout of this drive is the use of the parametric kernel of the APM Graph module. The calculation of the static strength according to the value of the equivalent stresses arising in the spindle structure is carried out. Diagrams of bending moments and stresses of bending and torsion are constructed, according to which it is possible to analyze the oper-

ability of the designed structure. An estimate of the shear stress level in the cross-section of the structure is given by the finite element method. The stress fields are plotted in the dangerous section of the spindle, reflecting the distribution of equivalent stresses over the selected cross section. It is noted that the greatest stresses act at the points farthest from the neutral axis of the beam, which corresponds to the known provisions on the distribution of stresses in cross-sections.

Keywords: Forming unit, multi-purpose machine drive, stiffness, beam, finite element method.

Кроль Олег Соломонович – к.т.н., доц., професор кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк)
krolos.snu.edu@gmail.com

Жданок Галина Миколаївна – студентка групи ГМ-17да, факультет інженерії, кафедра машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк)
galina.zhdanok@gmail.com

Стаття подана 01.02.2021 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-49-54>

УДК 681.5.015

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БУДІВЕЛЬ

Купіна О.А., Лорія М.Г., Целіщев О.Б.

COMPARATIVE ANALYSIS OF EXISTING METHODS OF INCREASING BUILDINGS ENERGY SUPPLY INDICATORS

Kupina O.A., Loriya M.G., Tselishev O.B.

У статті розглядаються найбільш розповсюджені та актуальні способи енергозбереження та оптимізації енергоспоживання в сучасних будівлях. Приведений опис аспектів системи енергозабезпечення пасивного будинку. Описані основні технічні рішення щодо підвищення енергоефективності окремих будівель з автономізацією систем його енергозабезпечення. Наведено короткий опис експлуатаційних можливостей комбінованої системи теплопостачання на основі використання теплонасосних технологій. Але такий підхід не дозволяє досягти значного підвищення енергоефективності систем, проведення термомодернізації, тільки за рахунок нарощування ізоляційного шару часто не призводить до плануемого зменшення рівня енерговитрат. Тому розглянутий напрямок енергозбереження, який пов'язаний з підвищенням показників термічного опору будівель і одночасним використанням для їх енергозабезпечення енергії альтернативних джерел. В даному випадку підвищення ефективності системи енергозабезпечення та кліматизації досягається завдяки використанню енергії сонячного випромінювання, тепла ґрунту і повітря (в тому числі вентиляційного). При цьому враховується специфіка процесів енергообміну, акумулювання теплової енергії. Такий підхід лежить в основі методу контролю температури будівлі з використанням кривої нагріву, яка не вимагає моделі процесу, а задача оптимізації вирішується тільки на рівні однієї ланки, а не всієї системи. Цей недолік усувається завдяки автоматичному контролю вентиляції, водопостачання, побутової техніки (система «Розумний будинок»). Для вирішення задач оптимізації доцільно використовувати комплексний підхід - це управління опаленням в поєднанні з контролем роботи вентиляційної системи і системи водопостачання. Це дозволяє реалізувати повноцінну підтримку певного клімату в будинку, з урахуванням вологості повітря і показниками температури в різних приміщеннях, пори року тощо, але потребує побудови певної математичної моделі. Даний огляд підтверджує актуальність подальшої роботи в напрямку вирішення задачі оптимізації з питань енергоспоживання та енерговитрат в сучасних будівлях.

Ключові слова: енергозабезпечення, оптимізація, математична модель, альтернативні джерела енергії, пасивний будинок, Розумний будинок.

Вступ. Протягом останніх десятиліть в Україні спостерігається характерна тенденція зростання як енергоспоживання в цілому, так і теплової енергії, зокрема. Той факт, що питома енергоємність валового внутрішнього продукту в Україні майже в 3 рази вище, ніж в розвинених економічно країнах, свідчить, що в країні неефективно використовуються паливо і енергія в цілому. Підвищення енергетичної ефективності комунальної та будівельної сфери сприятиме зниженню обсягу споживання паливно-енергетичних ресурсів до рівня, що дозволяє збільшити темп соціально-економічного розвитку взагалі.

Тобто, актуальною є вирішення задачі оптимізації енергозабезпечення. Завдання оптимізації є комплексним, тому що воно включає в себе як оптимізацію структури, так і оптимізацію режимів функціонування елементів.

Мета статті. Основною метою оптимізації є забезпечення найбільш високих техніко-економічних показників за рахунок досягнення оптимальних показників споживання енергії. Поняття «оптимізація» можна визначити в такий спосіб. Оптимізацією називається цілеспрямована діяльність, яка полягає в отриманні найкращих результатів при відповідних умовах. Оптимізація - процес досягнення найкращих або визначення (знаходження) найбільш сприятливих умов проведення будь-якого процесу (дії).

Вирішенню цієї задачі сприяє впровадження нових енергоефективних технологічних рішень, які орієнтовані не тільки на економію енергетичних ресурсів, але й на продуктивне використання енергії альтернативних джерел, тобто енергію сонячного випромінювання, тепло доквілля і ґрунту та ін.

При розробці систем енергозабезпечення та кліматизації будівель в даний час застосовується кілька варіантів, огляд яких наведений у статті.

Аналіз досліджень і публікацій. Результати досліджень.

Пасивний будинок. Основні зусилля спрямовані на «спрощений» підхід або «пасивне утеплення».

Основним джерелом теплоти для приготування води на потреби гарячого водопостачання є теплові сонячні колектори, встановлені на пілонах будинку. Холодна вода зі свердловини надходить на станцію підвищення тиску і далі закачується в баки-накопичувачі холодної та гарячої води. Останній відрізняється тим, що є бойлером непрямого нагріву з водяною «сорочкою» і вбудованим електричним нагрівачем. У внутрішню секцію надходить холодна вода зі станції підвищення тиску. У зовнішню секцію надходить нагріте в сонячних колекторах водний розчин етиленгліколю. За рахунок цього відбувається приготування гарячої води. Після заповнення обох баків станція підвищення тиску автоматично відключається в цілях економії електроенергії. У разі, коли немає надходження сонячної енергії, і відбувається охолодження гарячої води, в баки-накопичувачі автоматично включається електричний нагрівач[3].

При профіциті теплоти, отриманої від сонячних колекторів, нагрітий водний розчин пропіленгліколю прокачується через пластинчастий теплообмінник і, підігрівачи воду, відновлює тепловий стан ґрунтового акумулятора теплоти (масиву ґрунту). В перехідній і зимовий періоди ґрунтовий акумулятор теплоти використовується в якості низько потенційного джерела теплоти для теплового насоса. При даному підході приділяється особлива увага групі теплообмінників – джерел низькопотенціальної теплоти для теплового насоса.

Для перетворення енергії вітру в електричну енергію постійного струму напругою 48 В для заряду акумуляторних батарей можуть використовуватися вітрогенератори з вбудованим контролером заряду свинцево кислотних акумуляторних батарей[1].

Також для забезпечення електроенергією системи теплозабезпечення пасивних будівель використовуються фотовольтаїчні панелі на основі полікристалічних і 60 тонкоплівкових теллурид кадмієвих фотомодулів (номінальною потужністю 80 Вт кожна)[2].

Для запобігання аварійних режимів заряду акумуляторних батарей від фотоелектричних перетворювачів і збільшення ефективності використання енергії фотомодулів використовуються контролери заряду.

В даний час виконуються монтажні та пусконаладжувальні роботи по введенню в експлуатацію системи енергопостачання пасивного будинку, а також і установка контрольно-вимірювального обладнання в окремих приміщеннях .

При проектуванні і будівництві пасивного будинку орієнтація огорожувальних конструкцій виконана в суворій відповідності зі сторонами світла, використані відповідні архітектурні прийоми для мінімізації теплових втрат через огорожувальні конструкції. Зовнішні стіни виконані з комбінацій різних будівельних матеріалів (Конструктивно стіна являє собою багат шарову панель з утеплювачем з пінополістиролу). Для підвищення термічного опору світлопрозорих конструкцій приймають рішення виконання їх з двоєними в кожному звичайних прорізів з використанням трикамерного профілю товщиною 60 мм і двокамерних склопакетів, що включають в себе скла з низькоемісійним покриттям.

Але, як правило, такий підхід не дозволяє досягти значного підвищення енергоефективності цих систем на об'єктах ЖКГ. Проведення термомодернізації, тільки за рахунок нарощування ізоляційного шару часто не призводить до плануємого зменшення рівня енерговитрат.

Тому актуальні науково-технічні розробки, завдяки

яким визначаються нові технічні підходи до енергозбереження, в тому числі з використанням енергії альтернативних джерел.

Існують об'єкти з системами теплопостачання, в яких використані сонячні колектори і сезонні ґрунтові акумулятори тепла. Але ці системи є структурним об'єднанням окремих технічних елементів. Незважаючи на відносну простоту, цим варіантам систем енергозабезпечення притаманні такі недоліки як можливість перегріву будівлі в теплу пору року і інерційність системи кліматизації.

Використання альтернативних джерел тепла. Перспективним є інший напрямок енергозбереження. Він пов'язаний з підвищенням показників термічного опору будівель і одночасним використанням для їх енергозабезпечення енергії альтернативних джерел. При цьому будинок розглядається як система, яка, будучи взаємозалежною з навколишнім середовищем, активно сприймає розсіяну низькопотенційну енергію з подальшим доведенням її до необхідного рівня. Однак, механічне приєднання до об'єктів традиційної архітектури елементів, призначених для використання енергії відновлюваних джерел (сонячних колекторів, фотоелектричних батарей) призводить до недостатньої реалізації функціональних можливостей таких систем енергозабезпечення будівель, збільшення навантаження на їхню конструкцію, не завжди вдалої зміни тепло-технічних показників самої споруди та архітектури будівлі.

Для істотного зменшення питомих енерговитрат об'єктів ЖКГ пропонується одночасна корінна перебудова системи енергозабезпечення та така реконструкція, при якій пасивні огорожі трансформуються в енергоактивні (тобто перетворюють енергію альтернативних джерел - сонячну енергію, енергію навколишнього середовища, тепло вентиляційного повітря і ін.)[4].

В даному випадку підвищення ефективності системи енергозабезпечення та кліматизації досягається завдяки використанню енергії сонячного випромінювання, тепла ґрунту і повітря (в тому числі вентиляційного). При цьому враховується специфіка процесів енергообміну, акумулювання теплової енергії.

Для створення ефективних систем енергозабезпечення пропонується використовуватися комплексні інноваційні системи, що складаються з енергоактивних огорож, акумуляторів теплової енергії, теплових насосів і ін. Енергоактивні огорожі є елементом системи, який сприймає сонячне випромінювання, що потрапляє на його поверхню, перетворює його в теплову енергію завдяки нагріванню відповідного теплоносія. Це тепло через вертикальні трубчасті теплообмінники накопичується в ґрунтовому тепловому акумуляторі. В холодну пору року, накопичене тепло використовується для низькотемпературної системи опалення безпосередньо через теплообмінник за допомогою теплового насоса, який працює в цьому випадку в 1,5-2,5 рази ефективніше.

У теплу пору року елементи системи енергозабезпечення функціонують таким чином, що теплова енергія подається в зону акумулювання в ґрунт, а під час опалювального сезону йде процес її дозованого використання для енергозабезпечення і кліматизації. Тепловтрати акумульованої енергії мінімізуються шаром ґрунту, який є своєрідною теплоізоляцією. Дане технічне рішення дозволяє мінімізувати експлуатаційні витрати, підвищити ефективність використання енергетичних ресурсів.

В енергетичному балансі споруд основна кількість енергії припадає на теплову. Тому при заміні традиційних енергоносіїв енергією альтернативних джерел безпосереднє перетворення її в теплоту має істотно більший енергетичний ефект в порівнянні з перетворенням в електричну енергію і реалізується за допомогою досить нескладних і недорогих технічних пристроїв. Тому при розробці варіантів конструктивного виконання енергоактивних огорож використаний підхід, який полягає в тому, що найбільший сенс має отримання тепла невисокий потенціал, якого цілком достатньо для гарячої водопостачання та низькотемпературного опалення.

Для новобудов, зведених каркасно-модульним способом, доцільно використовувати енергоактивні огорожі у вигляді великогабаритних елементів - функціонально закінчених блоків, виготовлених в промислових умовах на спеціалізованих підприємствах.

Такий підхід лежить в основі методу контролю температури будівлі з використанням кривої нагріву, яка не вимагає моделі процесу [4]. Контроль при цьому здійснюється досить складними і дорогими контролерами з використанням правил «if-then-else». Ці правила відповідають за конкретну обмежену ділянку, наприклад, кімнату, аудиторію, тощо. При цьому завдання оптимізації на рівні всієї будівлі не вирішується. Саме цей факт і є основним

недоліком та призводить до зайвих економічних витрат.

Використання теплових математичних моделей. Розумний будинок. Наразі все більш актуальною є система «Розумний будинок».

Система «Розумний будинок» - це спосіб автоматичного контролю вентиляції, водопостачання, побутової техніки. В рамках такої системи можливо реалізувати і розумне опалення будинку.

На сьогоднішній день це вже не примха, подібні системи значно економлять енергоресурси, а як наслідок - гроші власника. В результаті господар будинку отримує бажаний комфорт для життя. При цьому розумна система опалення будинку знижує витрати на енергоспоживання в цілому. Робота системи полягає у наступному:

Теплопровідність стін і стель, якість вікон, наявність протягів і вологість повітря, тип опалювальної системи і спосіб подачі тепла - все це впливає на клімат всередині приміщення. Сучасні системи опалення можуть функціонально відрізнитися: це і класичні радіатори, і «теплі підлоги», і конвекторне опалення. У замських будинках встановлюються індивідуальні котли для обігріву та забезпечення гарячою водою, в квартирі ж можуть використовувати бойлер.

Все це може бути підконтрольне єдиній системі, яку і називають «розумним будинком». Це керуючий комп'ютерний блок, пов'язаний з побутовою технікою, а також з внутрішньої і зовнішньої системою датчиків температури. Згідно з даними датчиків і заданого режиму, така система здатна знижувати або підвищувати температуру в приміщенні, регулювати кількість гарячої води готової до використання в бойлері тощо.



Рис. 1. Приклад реалізації системи «Розумний будинок»

Розглянемо, наприклад, систему опалення: в системі «Розумний будинок» її можна реалізувати за допомогою декількох варіантів[5].

- На обігрівальні елементи і вузли опалення можна встановити контролери, пов'язані з температурними датчиками всередині приміщення. Після

цього обігрівальним приладам можна буде задати режим роботи (порядок включення і виключення за часом або при досягненні температурою певної величини).

Мінуси цього рішення наступні:

1. кожен такий прилад доведеться налаштувати окремо;
2. він не буде узгоджувати свою роботу з іншими системами будинку;
3. кожна окрема система не буде реагувати на зміну температури ззовні, оскільки таких даних у неї просто немає.

Більш ефективним рішенням є створення системи обігріву приміщення під управлінням єдиного контрольного блоку, яким можна буде задавати загальний режим роботи (з урахуванням особливостей функціонування для кожної групи обігрівальних приладів окремо).

Як для простої, так і для об'єднаної системи опалення, вдалим рішенням буде визначити температурні зони, задаючи окремі параметри опалення для кожної з них. Розумний будинок, опалення якого налаштоване так само, буде обігрівати сильніше житлові приміщення, з меншою активністю давати тепло гаражу, і стежити за тим, щоб не піднімалася температура в погребі.

- Погодозалежний регулятор опалення - один з ключових елементів для створення комфорту за допомогою «розумного будинку». Зовнішній температурний датчик дозволяє співвіднести температуру зовні приміщення і внутрішню, а потім по заданій кривій такого співвідношення визначити режим роботи без втручання людини.



Рис. 2. Погодозалежний регулятор

Погодозалежний регулятор опалення контролює обігрів приміщення, реагуючи на зміни погоди зовні: рівномірно підвищує температуру при похолоданні, або ж, може припинити обігрів, якщо на вулиці жарко.

Оскільки погодний регулятор опалення реагує на зовнішню температуру, він може за заданою про-

грамою підтримувати тепло і не допускати перевищувати. Розумне опалення замиського будинку знизить температуру, коли обігрівати приміщення не потрібно.

- Комплексне управління опаленням в системі «Розумний будинок»

Комплексний підхід - це управління опаленням в поєднанні з контролем роботи вентиляційної системи і системи водопостачання. Це дозволяє реалізувати повноцінну підтримку певного клімату в будинку, з урахуванням вологості повітря і показниками температури в різних приміщеннях.

Існує можливість задати різні сценарії роботи всім підконтрольним «Розумному будинку» системам, і реалізувати функцію оповіщення, якщо будь-яка з підсистем вийде з ладу.

Крім того, можна використовувати мобільний зв'язок, щоб давати команду системі. Розумне опалення замиського будинку почне підготовку житлових приміщень до прийому гостей за таким сигналом заздалегідь.

Комплексне управління опаленням, вентиляцією, водопостачанням і електрикою в системі «Розумний будинок» в результаті дає економію на енергоносіях і підвищує енергоефективність, що є дуже важливим моментом в умовах світової кризи енергоресурсів.

Управління опаленням за допомогою «розумного будинку» дозволяє домогтися наступного:

- клімат в будинку або будь-якому обраному приміщенні буде точно відповідати відчуттю комфорту господаря, відповідно до обраної ним програмою роботи нагрівальних приладів;
- автоматизований контроль опалювальної системи зможе істотно знизити витрату енергії;
- інтелектуальне управління побутових підсистем будинку дозволить їх контролювати дистанційно і не турбуватися про можливі несправності.

Мінусом же подібних технологій поки залишається доступність в силу досить високої вартості обладнання та установки системи.

Автоматизація управління тепlopостачанням приміщень в режимі розумного будинку. В основі моделі управління тепlopостачанням приміщень лежить нова методологія, яка об'єднує програмні інструменти моделювання енергоефективності з оперативним збором, обробкою і аналізом експериментальної і статистичної інформації.

Пропонований підхід ставить за мету економію енергії за рахунок інтелектуального контролю за температурним режимом всередині будівлі і погодними умовами. Енергетична ефективність досягається завдяки автоматизації управління тепlopостачанням для зниження температури усередині приміщень в нічний час і святкові дні до прийняттого мінімального рівня. Для досягнення цієї мети необхідно забезпечити автоматизоване вирішення таких основних завдань:

1. Безперервний моніторинг теплових характеристик внутрішніх приміщень, погодних умов і керованого теплового вузла центрального опалення;

2. Визначення (уточнення) значень необхідних теплофізичних параметрів і узагальнених характеристик температурного режиму як для будівлі в цілому, так і для окремих приміщень на підставі даних моніторингу;

3. Моделювання глобальних і локальних теплових процесів в будівлі з урахуванням реальних значень теплофізичних характеристик;

4. Визначення оптимального режиму теплопостачання для актуальних погодних умов на заданий проміжок часу на основі результатів моделювання.

Теоретичні результати за технологіями теплопостачання дозволяють очікувати досить високий відсоток ефективності від 10% до 30% [4] при використанні переривчасті режимів теплопостачання.

При цьому управління теплопостачанням може ґрунтуватися на теплової моделі конкретного будинку, що враховує специфіку як обігріву, так і охолодження окремих приміщень. Дослідження в цій області, як правило, спираються на глобальні моделі теплового балансу, в тому числі і з урахуванням погодних умов [6]. На додаток до прямих обчислень при відомих параметрах теплопередачі контроль і регулювання температурного режиму в розумному будинку на основі інтелектуальних мікроконтролерів можуть використовуватися дані оперативного моніторингу [6]. У той же час представляється, що для обліку всіх особливостей температурних режимів цей підхід необхідно доповнити, а саме використовувати можливості прогнозних моделей, отриманих методами машинного навчання. Ці моделі мають будуватися для всієї будівлі і окремих приміщень, а потім постійно уточнюватися за даними температурних датчиків. Особливу роль в цьому комбінованому підході грає імітаційне моделювання температурного режиму, що знайшло широке застосування в оптимізації енергоспоживання [6].

Висновок. В кінцевому рахунку стає можливим не тільки мінімізувати споживання енергії в окремій будівлі з центральним опаленням. Розробка і впровадження розподіленої системи дозволяє оптимізувати витрати на необхідне дооснащення та підвищити якість моделювання теплофізичних характеристик вже для групи будівель за рахунок єдиної диспетчерської служби і консолідації в єдиному диспетчерському центрі всієї необхідної інформації. Крім того, розробка єдиної моделі керування енергозабезпеченням будівлі дозволяє зменшити витрати на реалізацію системи «Розумний будинок» в цілому й підвищити доступність цієї системи. Що, в свою чергу, підтверджує актуальність подальшої роботи в цьому напрямку, зокрема доцільно створити оптимальну систему енергоспоживання, яка буде включати в себе як відновлювані джерела енергії, так і ті, що не відновлюються.

Література

1. Басок Б. І. Схемні рішення оснащення енергоефективного будинку системою теплозабезпечення / Б. І. Басок, О. М. Недбайло, М. В. Ткаченко, І. К. Божко, М. П. Новіцька // Пром. теплотехніка. – 2013. – Т. 35, №1. – С. 42–48.
2. Божко И. К. Комбинированная система теплоснабжения высокоэнергоэффективного дома / И. К. Божко, А. Н. Недбайло, М. В. Ткаченко, И. Г. Засецкий // Энергоэффективность в строительстве та архітектурі. – 2014. – Випуск 6. – С. 14–22.
3. Б. И. Басок «Технические аспекты системы энергообеспечения пассивного дома»/ Б.И. Басок, А.Н. Недбайло, И.К. Божко, М.В. Ткаченко // Энергоэффективность в строительстве та архітектурі – 2016. – Випуск 8 – С. 3-9.
4. Накашидзе Л. В., В. А. Габринец. "Основные элементы инновационной комплексной системы климатизации с использованием энергии альтернативных источников."/ Накашидзе, Л. В., В. А. Габринец.// Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Создание высокотехнологических экокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития 68 (2013): С. - 240-243
5. Захаров А. А., Захарова И. Г., Ромазанов, А. Р., Широких, А. В. (2018). «Моделирование теплового режима и управление теплоснабжением помещений умного здания.» Вестник Тюменского государственного университета: Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика, 4, С. - 105-119.
6. Петрова З. К. Технологии " Умного дома" и энергоэффективная малоэтажная жилая застройка. Architecture and Modern Information Technologies, 2010, 2 (11).

References

1. Basok B. I. Schematic solution equipping an energy efficient booth with a heat supply system / B. I. Basok, O. M. Nedbailo, M. V. Tkachenko, I. K. Bozhko, M. P. Novitska // Prom. heat engineering. - 2013. - T. 35, No. 1. - S. 42–48.
2. Bozhko IK Combined heat supply system for a high-energy house / IK Bozhko, AN Nedbailo, MV Tkachenko, IG Zasetkiy // Energy efficiency in architecture. - 2014. - Vipusk 6. - P. 14–22.
3. BI Basok "Technical aspects of the passive house power supply system" / BI. Basok, A.N. Nedbailo, I.K. Bozhko, M.V. Tkachenko // Energy efficiency in architecture and architecture - 2016. - Vipusk 8 - pp. 3-9.
4. Nakashidze L. V., V. A. Gabrinets. "The main elements of an innovative integrated air-conditioning system using the energy of alternative sources." / Nakashidze, L. V., V. A. Gabrinets. // Construction. Materials Science. Mechanical engineering. Series: Creation of high-tech eco-complexes in Ukraine based on the concept of balanced (sustainable) development 68 (2013): P. - 240-243
5. Zakharov A.A., Zakharova I.G., Romazanov, A.R., Shirokikh A.V. (2018). "Modeling the thermal regime and control of heat supply in the premises of a smart building." Bulletin of Tyumen State University: Physical and mathematical modeling. Oil, gas, energy, 4, S. - 105-119.
6. Petrova ZK Smart Home Technologies and Energy Efficient Low-Rise Residential Buildings. Architecture and Modern Information Technologies, 2010, 2 (11).

Купина О.А., Лорія М. Г., Целищев О. Б.
Comparative analysis of existing methods for increasing the indicators of energy supply to buildings.

В статье рассматриваются наиболее распространенные и актуальные способы энергосбережения и оптимизации энергопотребления в современных зданиях. Приведено описание аспектов системы энергообеспечения пассивного дома. Описаны основные технические решения по повышению энергоэффективности отдельных зданий с автономизацией систем его энергообеспечения. Приведено краткое описание эксплуатационных возможностей комбинированной системы теплоснабжения на основе использования теплонасосных технологий. Но такой подход не позволяет достичь значительного повышения энергоэффективности систем, проведение термомодернизации, только за счет наращивания изоляционного слоя часто приводит к планируемому уменьшению уровня энергозатрат. Поэтому рассмотрен направление энергосбережения, который связан с повышением показателей термического сопротивления зданий и одновременным использованием для их энергообеспечения энергии альтернативных источников. В данном случае повышение эффективности системы энергообеспечения и климатизации достигается благодаря использованию энергии солнечного излучения, тепла почвы и воздуха (в том числе вентиляционного). При этом враховується специфіка процесів енергообміну, накопичення теплової енергії. Такий підхід лежить в основі методу контролю температури будівлі з використанням кривої нагріву, яка не потребує моделі процесу, а задача оптимізації вирішується тільки на рівні одного звена, а не всієї системи. Цей недолік усувається завдяки автоматичному контролю вентиляції, водоснабження, побутової техніки (система «Умний дім»). Для рішення задач оптимізації цілеспрямовано використовувати комплексний підхід - це управління опаленням в поєднанні з контролем роботи вентиляційної системи і системи водоснабження. Це дозволяє реалізувати повноцінну підтримку визначеного клімату в домі, з урахування вологості повітря і показателями температури в різних приміщеннях, часу року і т.д., але потребує побудови певної математичної моделі. Даний огляд підтверджує актуальність подальшої роботи в напрямку рішення задачі оптимізації по питаннях енергопотреблення і енергозатрат в сучасних будівлях.

Ключевые слова: энергообеспечение, оптимизация, математическая модель, альтернативные источники энергии, пассивный дом, Умный дом.

Kupina O.A., Loriya M.G., Tselishev O.B.
Mathematical model of the node cooling and methanol condensation.

The article considers the most common and relevant ways to save energy and optimize energy consumption in modern buildings. A description of aspects of the energy supply system of a passive house is given. The main technical solutions for improving the energy efficiency of individual buildings with the autonomy of its energy supply systems are described. A brief description of the operational capabilities of the combined heat supply system based on the use of heat pump technologies is given. But this approach does not allow to achieve a significant increase in energy efficiency of systems, thermal modernization, only by increasing the insulation layer often does not lead to the planned reduction in energy consumption. Therefore the direction of energy saving which is connected with increase of indicators of thermal resistance of buildings and simultaneous use for their energy supply of energy of alternative sources is considered. In this case, increasing the efficiency of the energy supply and air conditioning system is achieved through the use of energy from solar radiation, soil heat and air (including ventilation). This takes into account the specifics of energy exchange processes, accumulation of thermal energy. This approach is the basis of the method of controlling the temperature of the building using a heating curve, which does not require a process model, and the optimization problem is solved only at the level of one link, not the whole system. This shortcoming is eliminated due to the automatic control of ventilation, water supply, household appliances ("Smart Home" system). To solve optimization problems, it is advisable to use a comprehensive approach - it is heating control in combination with control of the ventilation system and water supply system. This allows you to fully support a certain climate in the house, taking into account humidity and temperature in different rooms, seasons, etc., but requires the construction of a certain mathematical model. This review confirms the relevance of further work towards solving the problem of optimization of energy consumption and energy consumption in modern buildings.

Keywords: power supply, optimization, mathematical model, alternative energy sources, passive house, smart house.

Купина Оксана Анатоліївна – аспірантка кафедри електронні апарати, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, (м. Северодонецьк), kupina@snu.edu.ua

Лорія Марина Геннадіївна – д.т.н., доцент, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, (м. Северодонецьк), m_loria@snu.edu.ua.

Целищев Олексій Борисович – д.т.н., доцент, проректор з наукової роботи, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, (м. Северодонецьк), atp00@ukr.net.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-55-59>

УДК 629.463.62

ВИЗНАЧЕННЯ СТІЙКОСТІ РІВНОВАГИ ВАГОНА-ПЛАТФОРМИ З УРАХУВАННЯМ ЦИКЛІЧНОСТІ ПОСТРІЛІВ З ЗЕНІТНИХ УСТАНОВОК, РОЗМІЩЕНИХ НА НЬОМУ

Ловська А.О., Фомін О.В.

DETERMINATION OF THE STABILITY OF THE EQUILIBRIUM WAGON-PLATFORM TAKING INTO ACCOUNT THE CYCLICITY OF SHOOTERS FROM ANTI-AGENCY PLACES PLACED ON IT

Lovska A.O., Fomin O.V.

Досліджену динамічну навантаженість несучої конструкції вагона-платформи при веденні вогняної дії. Для цього складено математичну модель, яка враховує циклічність пострілів з зенітних установок, розміщених на вагоні-платформі. Розв'язок математичної моделі проведений в програмному комплексі MathCad. Прискорення, яке діє на несучу конструкцію вагона-платформи у вертикальній площині склало близько 5 м/с^2 . У поперечній площині прискорення склало близько 4 м/с^2 . Отримані величини прискорень враховано при визначенні коефіцієнту стійкості рівноваги вагона-платформи. Встановлено, що стійкість рівноваги вагона при пострілі забезпечується. Проведені дослідження сприятимуть створенню інноваційного рухомого складу, а як наслідок, підвищенню ефективності експлуатації залізничного транспорту та обороноздатності країни.

Ключові слова: вагон-платформа, несуча конструкція, динамічна навантаженість, стійкість рівноваги, комбіновані перевезення.

Вступ. На сьогоднішній день перед Україною, як машинобудівною країною з суттєвим транзитним потенціалом та внутрішньою розвинутою транспортною інфраструктурою, гостро стоять виклики економічного, соціального, технічного характеру, а також національної безпеки та оборони. Для залізничної складової, яка відіграє вирішальну роль в вирішенні проблем транспортної галузі ключовим завданням є створення інноваційних ресурсозберігаючих конструктивів вагонів, які могли б використовуватися і у військово-стратегічних цілях країни. Для створення таких конструкцій вагонів необхідним є визначення динамічної навантаженості при перевезенні військової техніки, а також можливості ведення з них вогняної дії.

Нормативна база у відповідності з якою здійснюється проектування рухомого складу не відображає питань динамічної навантаженості рухомого

складу при здійсненні з нього вогняної дії, що зумовлює необхідність її доповнення. Вирішення такого завдання сприятиме створенню інноваційного рухомого складу, а як наслідок, підвищенню ефективності експлуатації залізничного транспорту та обороноздатності країни.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Конструкційні особливості вагона-платформи для перевезення військової техніки моделі 13-192-01 висвітлюються у [1]. Вагон оснащений апарелю для завантаження/вивантаження військової техніки.

Вагон-платформа з осьовим навантаженням 27 т/вісь та візками з шириною колії 676 мм для перевезення колісної та гусеничної техніки розроблений Уралвагонзаводом (Росія). Вагон був представлений на виставці оборонного сектора в рамках виставки DefExpo 2020 в Лакхнау [2].

При цьому не оговорюється чи є можливість здійснювати вогняну дію з вагона-платформи при русі.

Вибір параметрів вагона-платформи для перевезення колісної техніки проводиться у [3]. Наведений огляд існуючих конструкцій вагонів-платформ для перевезення колісної техніки. Висвітлені особливості розробки нової конструкції вагона-платформи для контрейлерних перевезень.

Автором не висвітлюються питання можливості використання вагона-платформи для перевезення військової техніки, що на даний час є досить актуальним питанням.

Підвищення рівня надійності кріплення військової колісної техніки на залізничній платформі шляхом використання удосконалених технічних засобів проводиться у [4]. Описано конструкційні особливості тросової табельної розтяжки багаторазового використання. Однак не оговорюється чи

може дана розтяжка витримувати зусилля, які діють на неї при веденні вогняної дії з військової техніки.

Визначення показників міцності довгобазної конструкції вагона-платформи проводиться у [5]. Розрахунок здійснений для двох варіантів завантаження, при яких було отримано найбільші згинальні моменти. Визначення максимальних еквівалентних напружень у основних несучих елементах рами здійснено за методом скінчених елементів.

Аналіз конструкції інноваційного вагону для інтермодальних перевезень проводиться у [6]. Вагон призначений для перевезення вантажних автомобілів залізницею. Перевантаження автомобілів може здійснюватися за допомогою спеціальної обертової платформи з використанням сидельного тягача.

Однак в роботах не оговорюється чи є можливість здійснювати перевезення військової техніки на вагонах-платформах та проводити вогняну дію з них.

Особливості проектування залізничного вагона для інтермодальних перевезень з адаптованою завантажувальною платформою розглянуті у [7]. Прийняті конструкційні рішення обґрунтовані статичними та динамічними дослідженнями в програмних комплексах ANSYS та ADAMS/Rail.

В статті не висвітлюються питання можливості перевезення військової техніки на розробленій конструкції вагона-платформи.

Мета статті. Метою статті є моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи при веденні вогняної дії з нього з урахуванням циклічності пострілів з зенітних установок.

Для досягнення зазначеної мети визначені такі завдання:

- створити математичну модель для визначення динамічних навантажень, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи при веденні вогняної дії з нього з урахуванням циклічності пострілів;

- визначити коефіцієнт стійкості рівноваги несучої конструкції вагона-платформи при веденні вогняної дії з нього з урахуванням циклічності пострілів.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Для можливості ведення вогняної дії з несучої конструкції вагона-платформи при русі проведено математичне моделювання. Складено математичну модель (1), яка враховує коливання підсакування та бічну хитавицю. Розрахункова схема наведена на рис. 1.

Враховано, що вогняна дія ведеться з двох зенітних установок з дульною енергією 89 кДж.

$$\begin{cases} M_{\text{впф}} \cdot \ddot{q}_1 + c \cdot q_1 = P_{\text{тр}} \left(\text{sign}(\dot{\Delta}_1 - \dot{\Delta}_2) + \text{sign}(\dot{\Delta}_1 + \dot{\Delta}_2) \right) + P_n, \\ I_{\text{впф}} \cdot \ddot{q}_2 + c \cdot b \cdot q_2 = P_{\text{тр}} \cdot b \left(\text{sign}(\dot{\Delta}_1 - \dot{\Delta}_2) + \text{sign}(\dot{\Delta}_1 + \dot{\Delta}_2) \right) + M_n, \end{cases} \quad (1)$$

$$\Delta_1 = q_1 - b \cdot q_2, \quad \Delta_2 = q_1 + b \cdot q_2,$$

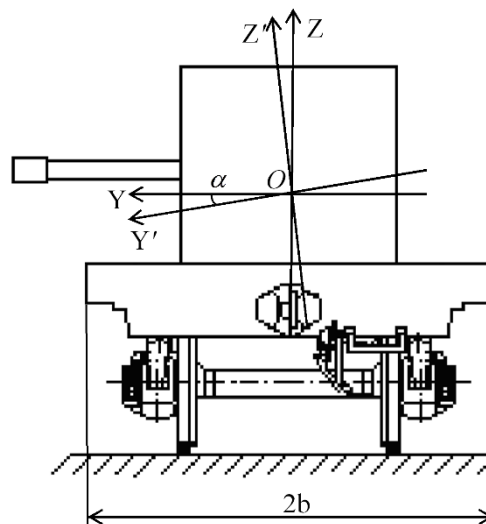


Рис. 1. Розрахункова схема вагона-платформи, завантаженого зенітними установками

де $M_{\text{впф}}$ – маса несучої конструкції вагона-платформи; $I_{\text{впф}}$ – момент інерції несучої конструкції вагона-платформи відносно повздовжньої осі; c – жорсткість пружин ресорного комплексу; $P_{\text{тр}}$ – сила сухого тертя у ресорному комплекті; b – напівширина несучої конструкції вагона-платформи; P_n – сила, яка передається на несучу конструкцію вагона-платформи при потрілі; M_n – момент сили, який діє на несучу конструкцію вагона-платформи при потрілі.

Розв'язок математичної моделі здійснений в програмному середовищі MathCad за методом Рунге – Кутта [8 – 10]. Для цього введено позначення

$$q_1 = y_1; \quad q_2 = y_2; \quad q_3 = \dot{y}_1 = y_3; \quad q_4 = \dot{y}_2 = y_4. \quad (2)$$

Тоді

$$F(t, y) = \begin{bmatrix} y_3 \\ y_4 \\ \frac{P_{\text{тр}} \left(\text{sign}(\dot{\Delta}_1 - \dot{\Delta}_2) + \text{sign}(\dot{\Delta}_1 + \dot{\Delta}_2) \right) - c \cdot y_1 + P_n}{M_{\text{впф}}} \\ \frac{P_{\text{тр}} \cdot b \left(\text{sign}(\dot{\Delta}_1 - \dot{\Delta}_2) + \text{sign}(\dot{\Delta}_1 + \dot{\Delta}_2) \right) - c \cdot b \cdot y_2 + M_n}{I_{\text{впф}}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$Z = \text{rkfixed}(Y0, tn, tk, n, F).$$

При цьому початкові умови прийняті [10 – 12]

$$Y0 = \begin{pmatrix} 0,004 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Матриця інерційних коефіцієнтів має вигляд

$$M = \begin{bmatrix} M_{\text{впф}} & 0 \\ 0 & I_{\text{впф}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Матриця пружних коефіцієнтів

$$C = \begin{bmatrix} 2 \cdot c & 0 \\ 0 & 2 \cdot c \cdot b \end{bmatrix} \quad (6)$$

На підставі проведених розрахунків отримано прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи при веденні вогняної дії у вертикальній площині (рис. 2) та поперечній (рис. 3).

Встановлено, що величина прискорення, яке діє на несучу конструкцію вагона-платформи у вертикальній площині складає близько 5 м/с^2 . У поперечній площині прискорення складо близько 4 м/с^2 .

Отримані величини прискорень враховано при визначенні коефіцієнту стійкості рівноваги вагона-платформи. Розрахункова схема наведена на рис. 4.

Умова рівноваги вагона-платформи при здійсненні пострілу з зенітних установок має вигляд:

$$k_c \geq \frac{M_{\text{відн}}}{M_{\text{пер}}}, \quad (7)$$

де $M_{\text{відн}}$ – величина відновлювального моменту, $M_{\text{пер}}$ – величина перекидального моменту.

Величина відновлювального моменту визначається

$$M_{\text{відн}} = P_{\text{бр}} \cdot b + P_n \cdot h_z, \quad (8)$$

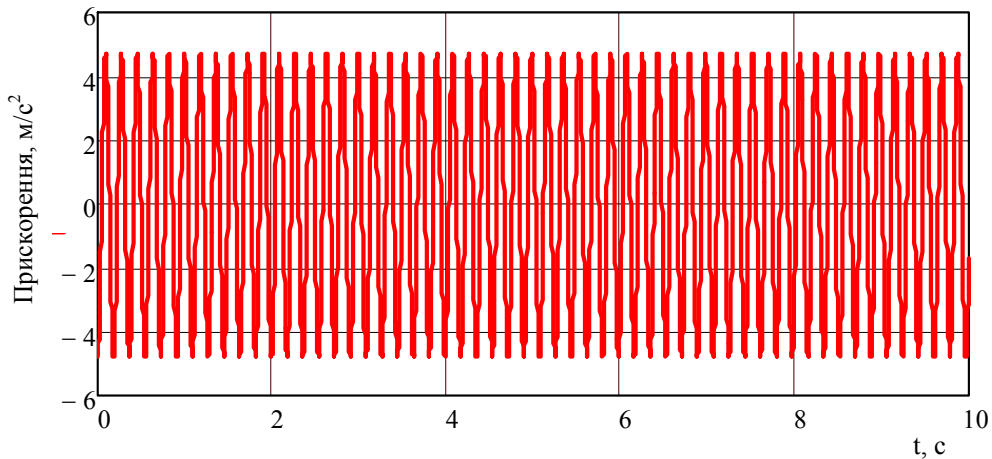


Рис. 2. Прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи у вертикальній площині

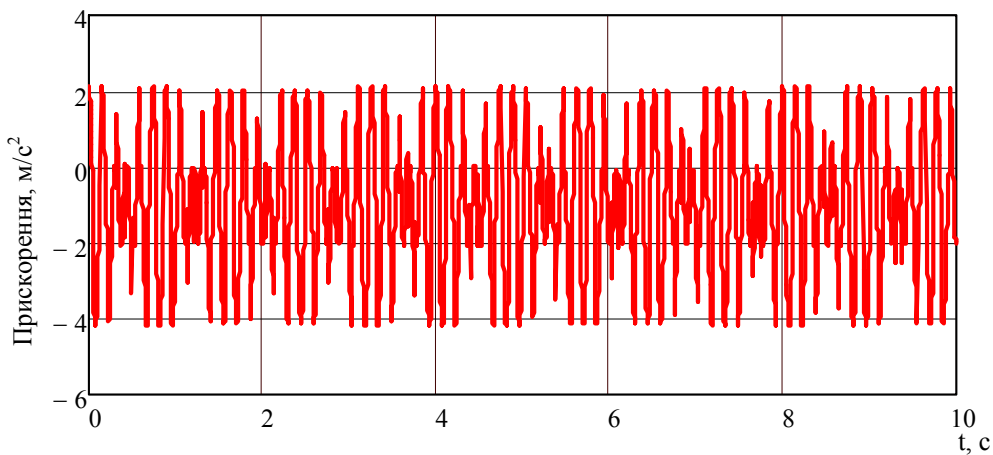


Рис. 3. Прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи у поперечній площині

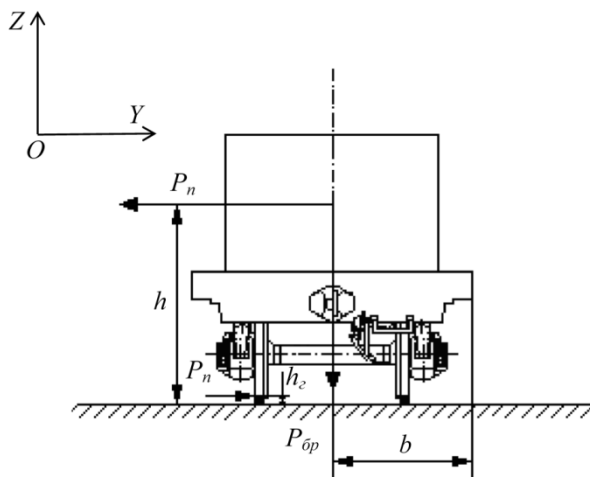


Рис. 4. Розрахункова схема вагона-платформи для визначення стійкості рівноваги

Величина перекидального моменту визначається

$$M_{пер} = P_n \cdot h, \quad (9)$$

де $P_{ор}$ – вага-брутто несучої конструкції вагона; b – напівширина вагона; P_n – навантаження, яке передається на несучу конструкцію при пострілі; h_c – висота гребеня колеса; h – відстань від центру ваги зенітної установки до рівня верху головки рейки.

На підставі проведених розрахунків встановлено, що коефіцієнт стійкості рівноваги несучої конструкції вагона-платформи при здійсненні вогняної дії однією зенітною установкою має значення близько 4, двома – близько 2. Отже стійкість рівноваги вагона при пострілі забезпечується.

Висновки:

1. Створено математичну модель для визначення динамічних навантажень, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи при веденні вогняної дії з нього з урахуванням циклічності пострілів. Враховано, що вогняна дія ведеться з двох зенітних установок. Встановлено, що величина прискорення, яке діє на несучу конструкцію вагона-платформи у вертикальній площині складає близько 5 м/с^2 . У поперечній площині величина прискорення складала близько $4,0 \text{ м/с}^2$.

2. Визначено коефіцієнт стійкості рівноваги несучої конструкції вагона-платформи при веденні вогняної дії з нього з урахуванням циклічності пострілів. При цьому коефіцієнт стійкості рівноваги несучої конструкції вагона-платформи при здійсненні вогняної дії однією зенітною установкою має значення близько 4, двома – близько 2.

Проведені дослідження сприятимуть створенню інноваційного рухомого складу, а як наслідок, підвищенню ефективності експлуатації залізничного транспорту та обороноздатності країни.

Подяка

Дані дослідження проведені в рамках наукової теми молодих вчених “Інноваційні засади створення ресурсозберігаючих конструктивів вагонів шляхом урахування уточнених динамічних навантажень та функціонально-адаптивних флеш-концептів”, яка виконується за рахунок коштів державного бюджету України з 2020 р.

Література

1. Платформу оснастили аппарелью / <http://www.ato.ru/content/platformu-osnastili-apparelyu.06.12.2006>.
2. Индийская концепция универсалов, представленная российским поставщиком / <https://www.railwaygazette.com/traction-and-rolling-stock/indian-wagon-concept-presented-by-russian-defence-supplier/55870.article>. 26.02.2020.
3. Бондаренко, А. И. Выбор параметров вагона-платформы для перевозки колесной техники / А. И. Бондаренко // Транспорт Российской Федерации. – 2013. – № 3 (46). – С. 18 – 20.
4. Костюк, В. В. Підвищення рівня надійності кріплення військової колісної техніки на залізничній платформі / В. В. Костюк, П. О. Русіло, Ю. В. Варванець, О. М. Калінін // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Транспортне машинобудування. – 2018. – № 29 (1305). – С. 56 – 61.
5. Кельріх, М. Б. Дослідження на міцність конструкції довгобазної платформи / М. Б. Кельріх, Д. В. Федосов-Ніконов // Вісник Східноукраїнського Національного університету імені Володимира Даля. – 2016. – № 1 (225). – С. 90 – 94.
6. Wiesław Krasoń. Innovative Project of Prototype Railway Wagon and Intermodal Transport System / Wiesław Krasoń, Tadeusz Niezgodą, Michał Stankiewicz // Transportation Research Procedia. – 2016. – Vol. 14. – P. 615 – 624.
7. Pavol Šťastniak. Design of a new railway wagon for intermodal transport with the adaptable loading platform / Pavol Šťastniak, Pavol Kurčík, Alfréd Pavlík // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 235(2): 00030.
8. Tkachenko, V. Research of resistance to the motion of vehicles related to the direction by railway / V. Tkachenko, S. Saprónova, I. Kulbovsky, O. Fomin // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 5, Issue 7 (89). – P. 65–72. doi: 10.15587/1729-4061.2017.109791
9. Ловська, А. О. Удосконалення несучої конструкції вагона-платформи для підвищення ефективності контейнерних перевезень / А. О. Ловська // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2017. – Вип. 1 (67) – С. 168 – 183.
10. Дьомін, Ю. В. Основи динаміки вагонів: навч. посіб. / Ю. В. Дьомін, Г. Ю. Черняк. Київ, КУЕТТ. – 2003. – 269 с.
11. Fomin, O. Experimental confirmation of the theory of implementation of the coupled design of center girder of the hopper wagons for iron ore pellets / O. Fomin, I. Kulbovsky, E. Sorochinska, S. Saprónova, O. Vambura // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 5, Issue 1 (89). – P. 11–19. doi: 10.15587/1729-4061
12. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). [Чинний від 2015-07-01]. Київ, 2015. 250 с.

References

- 1 Platformu osnastili apparelyu / <http://www.ato.ru/content/platformu-osnastili-apparelyu>. 06.12.2006
- 2 Indijskaya koncepcziya universalov, predstavennaya rossijskim postavshhikom / <https://www.railwaygazette.com/traction-and-rolling-stock/indian-wagon-concept-presented-by-russian-defence-supplier/55870.article>. 26.02.2020.
- 3 Bondarenko, A. I. Vybory parametrov vagona-platformy dlya perevozki kolesnoj tekhniki / A. I. Bondarenko // Transport Rossijskoj Federaczi. – 2013. – № 3 (46). – S. 18 – 20.
- 4 Kostyuk, V. V. Pidvishhennya rivnyny nadijnosti kriplennya vijskovoy kolisnoy tekhniki na zaliznichnij platformi / V. V. Kostyuk, P. O. Rusilo, Yu. V. Varvanecz, O. M. Kalinin // Visnik NTU «KhPI». Seriya:Transportne mashinobuduvannya. – 2018. – № 29 (1305). – S. 56 – 61.
- 5 Kelrikh, M. B. Doslidzhennya na micznist konstrukcziyi dovgobaznoy platformi / M. B. Kelrikh, D. V. Fedosov-Nikonov // Visnik Skhidnoukrayinskogo Nacziionalnogo universitetu imeni Volodimira Dalya. – 2016. – № 1 (225). – S. 90 – 94.
- 6 Wiesław Krasoń. Innovative Project of Prototype Railway Wagon and Intermodal Transport System / Wiesław Krasoń, Tadeusz Niezgodą, Michał Stankiewicz // Transportation Research Procedia. – 2016. – Vol. 14. – P. 615 – 624.
- 7 Pavol Šťastniak. Design of a new railway wagon for intermodal transport with the adaptable loading platform / Pavol Šťastniak, Pavol Kurčík, Alfréd Pavlík // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 235(2): 00030.
- 8 Tkachenko, V. Research of resistance to the motion of vehicles related to the direction by railway / V. Tkachenko, S. Saponova, I. Kulbovsky, O. Fomin // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 5, Issue 7 (89). – P. 65–72. doi: 10.15587/1729-4061.2017.109791
- 9 Lovska, A. O. Udoskonalennya nesuchoy konstrukcziyi vagona-platformi dlya pidvishhennya efektnosti kontejnernih perevezhen / A. O. Lovska // Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovskogo nacziionalnogo universitetu zaliznichnogo transportu. – 2017. – Vip. 1 (67) – C. 168 – 183.
- 10 Domin, Yu. V. Osnovy dinamiki vagoniv: navch. posib. / Yu. V. Domin, G. Yu. Chernyak. Kiyiv, KUETT. – 2003. – 269 s.
- 11 Fomin, O. Experimental confirmation of the theory of implementation of the coupled design of center girder of the hopper wagons for iron ore pellets / O. Fomin, I. Kulbovsky, E. Sorochinska, S. Saponova, O. Bambura // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 5, Issue 1 (89). – P. 11–19. doi: 10.15587/1729-4061
- 12 DSTU 7598:2014. Vagoni vantazhni. Zagalni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya novih i modernizovanih vagoniv koliyi 1520 mm (nesamohidnih). [Chinniy vid 2015-07-01]. Kiyiv, 2015. 250 p.

Ловская А.А., Фомин А.В. Определение устойчивости равновесия вагона-платформы с учетом цикличности выстрелов из зенитных установок, размещенных на нем

Исследовано динамическую нагруженность несущей конструкции вагона-платформы при ведении огневых действий. Для этого составлена математическая модель, учитывающая цикличность выстрелов из зенитных установок, размещенных на вагоне-платформе. Решение

математической модели проведено в программном комплексе MathCad. Ускорение, которое действует на несущую конструкцию вагона-платформы в вертикальной плоскости составило около 5 м/с^2 . В поперечной плоскости ускорение составило около 4 м/с^2 . Полученные величины ускорений учтены при определении коэффициента устойчивости равновесия вагона-платформы. Установлено, что устойчивость равновесия вагона при выстреле обеспечивается. Проведенные исследования будут способствовать созданию инновационного подвижного состава, а как следствие, повышению эффективности эксплуатации железнодорожного транспорта и обороноспособности страны.

Ключевые слова: вагон-платформа, несущая конструкция, динамическая нагруженность, устойчивость равновесия, комбинированные перевозки

Lovska A.O., Fomin O.V. Determination of the stability of the equilibrium wagon-platform taking into account the cyclicity of shooters from anti-aircraft places placed on it

Today, one of the main tasks of railway transport is to create innovative resource-saving constructions of cars that could be used not only for the carriage of goods by rail, but also for military and strategic purposes of the country. To create such structures of wagons, it is necessary to take into account the specified values of loads that can act on them in the transportation of military equipment, as well as the study of the possibility of conducting fire action on them. The normative base according to which the rolling stock is designed does not reflect the issues of dynamic loading of the rolling stock during its firing action, which makes it necessary to supplement it. Solving this problem will help to create innovative rolling stock. Mathematical modeling was carried out to allow firing action from the supporting structure of the wagon platform when moving. A mathematical model has been drawn up that takes into account the oscillation of the bounce and the lateral swing. It is taken into account that the fire action is conducted from two anti-aircraft installations. It is assumed that the shots are fired simultaneously from two anti-aircraft installations. The mathematical model is solved in the MathCad software environment using the Runge-Kutta method. It is established that the value of acceleration acting on the supporting structure of the wagon platform in the vertical plane when conducting fire action from it is about 5 m/s^2 . In the transverse plane, the acceleration was about 4 m/s^2 . The obtained values of accelerations are taken into account in determining the coefficient of equilibrium of the balance of the wagon-platform. Based on the calculations, it is established that the coefficient of equilibrium stability of the load-bearing structure of the wagon-platform during the firing action with one anti-aircraft unit has a value of about 4, two – about 2. Therefore, the stability of the balance of the car when fired is ensured. The conducted researches will contribute to creation of innovative rolling stock, increase of efficiency of operation of railway transport and defense capability of the country.

Keywords: wagon platform, load-bearing structure, dynamic loading, stability of balance, combined transportation.

Ловська Альона Олександрівна – к.т.н., доц., доцент кафедри інженерія вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту (м. Харків), alyonalovskaya.vagons@gmail.com
Фомін Олексій Вікторович – д.т.н., доц., професор кафедри вагони та вагонне господарство, Державний університет інфраструктури та технологій (м. Київ), fomin1985@ukr.net

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-60-63>

УДК 621.3.077

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ МЕДОГОНКИ НА ПЛАТФОРМИ ARDUINO

Логунів О.М.

HONEYCOMB ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEM ON ARDUINO PLATFORM

Logunov O.M.

Розглянуто сучасний стан типових засобів автоматизації пасік в Україні, показані вимоги до медоконок в цілому та до систем управління їх електроприводом зокрема, наведено графік обертів медогонки, надано опис системи управління електроприводом медогонки на платформі Arduino та схему її побудови для приводу з електродвигуном постійного струму, розглянуті типові модулі платформи Arduino, які можуть бути використаними для побудови систем управління електроприводом постійного струму та визначені ті з них, які придатні для побудови системи управління електроприводом медогонки, розрахована вартість системи управління, показані результати експлуатації цієї системи, визначені напрями удосконалення обладнання та подальших досліджень

Ключові слова: медогонка, Arduino, драйвер, датчик, електропривод, ШІМ, ПД-регулятор, стільник.

Вступ. В даний момент бджільництво є однією з небагатьох галузей в Україні, що постійно розвивається. Обсяги експортованого меду щороку зростають [1]. У той же час на відміну від інших країн — провідних світових виробників продукції бджільництва, в Україні переважна частина меду виробляється дрібними (20-200 вуликів) пасіками, які через свій обсяг і обмежений ресурс своїх власників погано піддаються механізації. Продовжують використовуватися ручні медогонки, вік яких часто становить десятки років, часто на них встановлюються електродвигуни різних типів і характеристик, при цьому управління електроприводом залишається ручним.

Останнім часом стали з'являтися медогонки з електроприводом і системами управління. Обладнання характеризується великою різноманітністю. Представлені медогонки з ручним і автоматичним управлінням електроприводом. Лідером на ринку України є продукція компанії «АВВ-100», медогон-

ки якої іноді комплектуються автоматичною мікропроцесорною системою управління електроприводом. Пропонується електропривод з двигуном постійного струму з напругою живлення 12 або 24 вольт [2]. Ця система управління має ряд недоліків. Схема реверсу двигуна реалізована на електромеханічних реле, які мають низький експлуатаційний ресурс. Кількість програм обмежена. Жодна з програм не має більше 4 стадій роботи. Системи контролю швидкості обертання барабана і зворотного зв'язку відсутні. В останніх версіях доданий ручний режим управління.

Завдання управління електроприводом відцентрової медогонки складається в підтримці кутової швидкості обертання барабана з касетами у такому діапазоні, щоб вона з одного боку дозволяла витягти мед з рамок за прийнятний час, а з іншого боку не створювала загрозу руйнування стільників. Оптимальна швидкість залежить від конструкції медогонки, розміру і стану стільників, в'язкості меду та інших факторів. На практиці в процесі відкачки меду швидкість обертання барабана поступово збільшується, а напрямок обертання неодноразово змінюється. Один з можливих графіків зміни швидкості зображений на рис.1.

Платформа Arduino [3] має ряд переваг, які роблять її перспективною для побудови системи управління електроприводом медогонки. Платформа орієнтована на непрофесіонала, екстремально дешева і проста у використанні. На ринку представлена велика кількість модулів мікроконтролерів, інтерфейсів, датчиків і силових модулів. У відкритому доступі надані документація і приклади коду, що реалізують взаємодію з обладнанням і реалізацію різних алгоритмів.

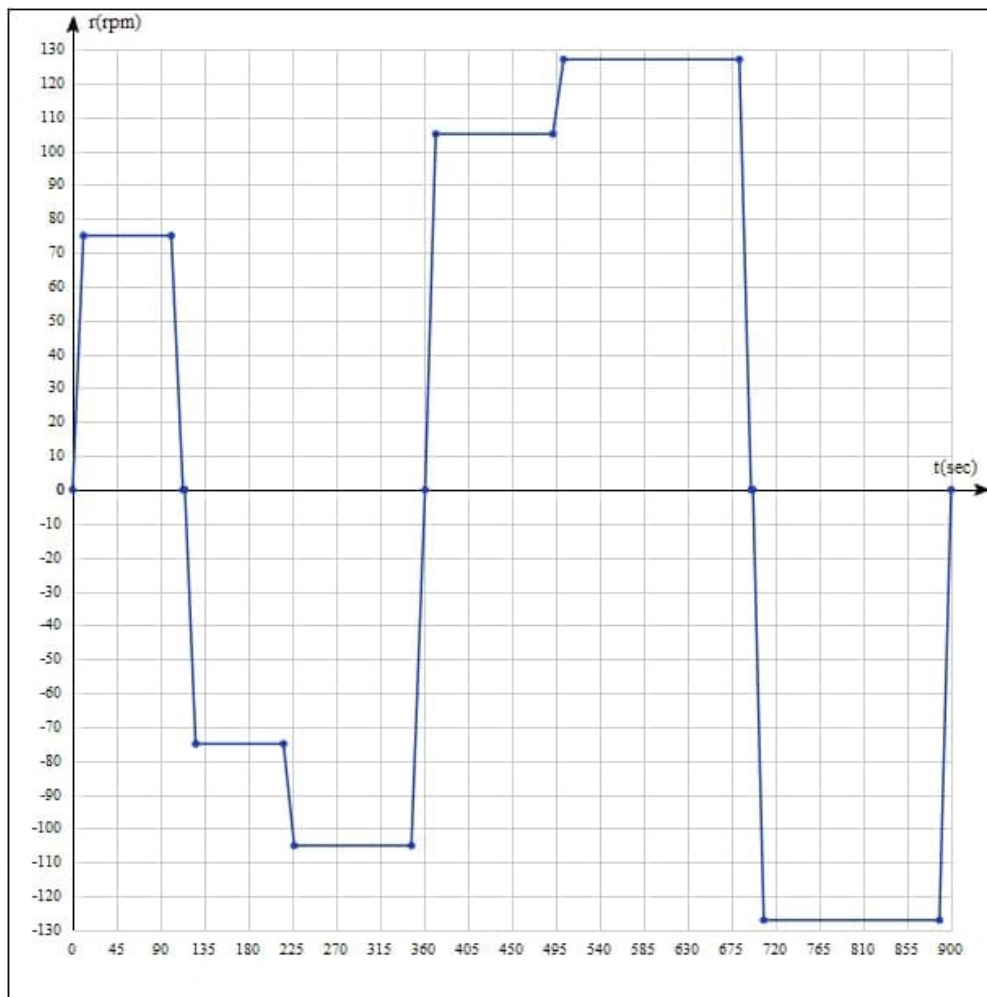


Рис. 1. Графік кутової швидкості обертання барабана відцентровою медогонки з оборотними касетами

Завдання дослідження - вибір компонентів і розробка схеми системи управління медогонкою на платформі Arduino з метою знизити вартість системи управління, підвищити можливості регулювання процесу відкачки меду, зробити обладнання придатним для модернізації неавтоматизованих медогонок, і згодом підвищити продуктивність праці, знизити втрати часу, меду і сот в процесі відкачування.

Опис системи управління. Система управління електроприводом постійного струму (рис. 2) складається з аналогічної Arduino UNO плати мікроконтролера (1), двох дисплеїв TM1637 (2 і 3), модуля датчика Холла 3144E (4), кнопки «Пуск» (5), динаміка (6), модуля драйвера електродвигуна BTS7960 (7) і макетної плати (9). На схемі також показаний сам електродвигун (8). Дисплеї використовуються для виведення поточного значення кутової швидкості барабана і часу, що залишився до закінчення циклу. На осі ротора медогонки встановлений диск з вісьмома постійними магнітами (на схемі не показаний). Магніти взаємодіють з датчиком Холла, дані з датчика Холла використовуються для визначення кутової швидкості ротора. Модуль

датчика Холла KY-024 виявився непридатним до експлуатації через «брязкоту». Велика кількість магнітів пов'язана з тим, що ротор медогонки має порівняно невелику (70-140 об / хв) кутову швидкість. Драйвер електродвигуна BTS7960 забезпечує управління струмом до 43 ампер і напругою до 27 вольт, чого достатньо для переважної більшості існуючих приводів постійного струму. Модуль обладнаний сигнальними виходами R_IS і L_IS, що дозволяють контролювати струм крізь драйвер. Напруга на сигнальному виводі в вольтах дорівнює силі току крізь драйвер в амперах. На практиці при підключенні 6-рамкової хордальної медогонки з електродвигуном номінальною потужністю 300 ват сила струму не перевищувала 10 ампер. Існує кілька варіантів підключення модуля BTS7960 до плати контролера, показана на рис.2 показана схема з постійно поданою на лінії R_EN і L_EN керуючою напругою. Така схема підключення забезпечує автоматичне гальмування двигуна і обрана з міркувань економії часу при зупинці барабана і меншій кількості використовуваних ліній підключення плати контролера.

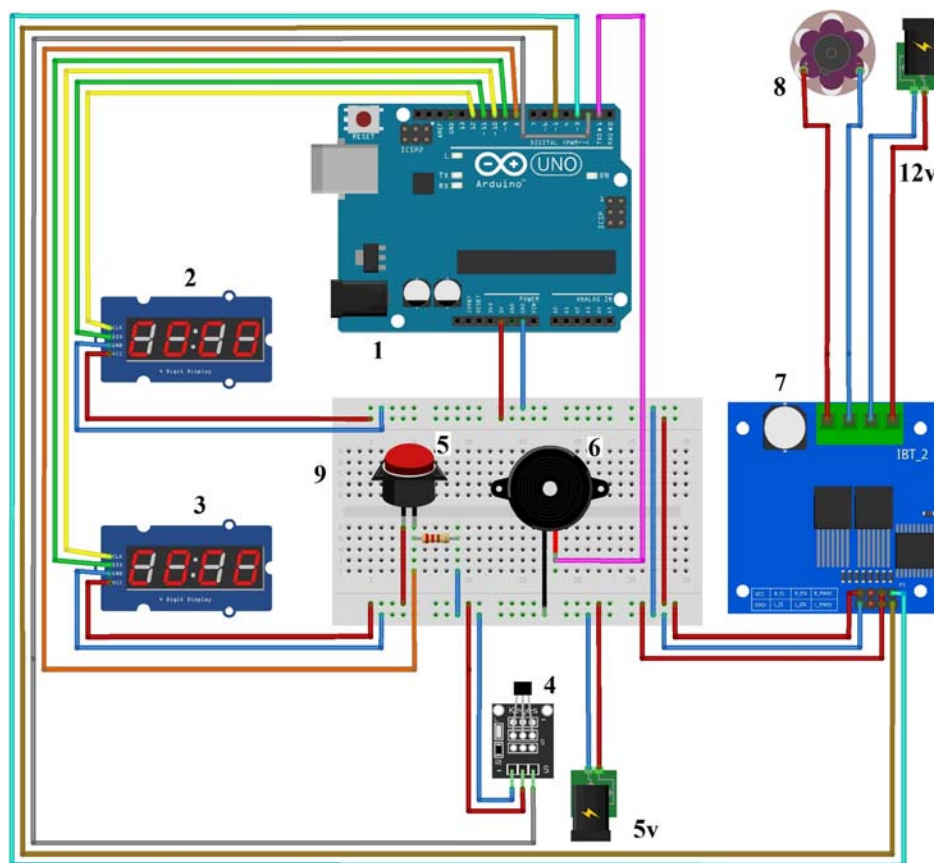


Рис. 2. Схема системи управління

Класичним способом управління колекторним двигуном постійного струму є використання широтно-імпульсної модуляції сигналу (ШІМ). Драйвер *bts7960* може працювати з керуючим сигналом частотою до 25 кілогерц, плата контролера Arduino UNO в штатному режимі працює з частотою сигналу ШІМ 490 герц. Для завдання швидкості і напрямку обертання ШІМ - сигнал подається на вхід *L_PWM* або *R_PWM* драйвера. Для вимірювання швидкості обертання ротора або проводиться опитування цифрового виходу датчика Холла в тілі функції `loop()` або використовується переривання.

Результати експлуатації. Була зібрана і підключена до електроприводу шестирамкової хордальної медогонки система управління, відповідна схемі рис. 2. Рівень керуючого ШІМ-сигналу на виході плати мікроконтролера встановлювався пропорційно функції, показаної на рис. 1. Коефіцієнт пропорційності був визначений емпірично на підставі даних про швидкість обертання, отриманих з датчика Холла при заданому фіксованому значенні керуючого ШІМ-сигналу. В процесі відкачування близько двох тонн меду ніяких проблем ані з системою управління, ані з медогонкою в цілому, не виникло. Додаткові налаштування програми не знадобилися. Швидкість відкачки меду перевищила швидкість ручної підготовки стільників. Пошкодження рамок в процесі відкачування зустрічалися рідко і були не-

значними. В процесі експлуатації вийшов з ладу модуль драйвера електродвигуна через перевищений напруги на виході блоку живлення електродвигуна (32 замість 24 вольт), був замінений.

Висновки. Платформа Arduino є перспективною для автоматизації обладнання пасік типових для України розмірів. Вартість компонентів системи управління склала близько 18 доларів. Можливостей базової плати мікроконтролера Arduino UNO з деяким запасом вистачає для побудови системи управління медогонкою. Використання плати драйвера електродвигуна дозволяє здійснювати реверс напрямку обертання без використання ненадійних механічних реле. Потужності базового драйвера електродвигуна *L293D* недостатньо, слід використовувати плату *BTS7960* або більш потужну. Модуль датчика Холла *KY-024* непридатний, слід використовувати *3144E*. Модульність системи дозволяє швидко замінити будь-який елемент в разі виходу з ладу.

Напрямки вдосконалення системи. Можлива установка потенціометра для регулювання обертів без зміни програми, а також датчиків струму і напруги для захисту модуля драйвера електродвигуна, який є найдорожчим (8 доларів) елементом системи управління. Установка модуля інтерфейсу для перемикання програм. Установка модуля бездротового зв'язку для управління медогонкою з комп'ютера або

смартфона. Перенесення датчика кутової швидкості з осі барабана на вісь електродвигуна.

Напрямки подальших досліджень. Здійснення зворотного зв'язку для автоматичного регулювання швидкості обертання барабана [4]. Визначення коефіцієнтів ПІД-регулятора. Визначення оптимальної для даного етапу відкачки швидкості обертання на основі зміни моменту інерції барабана.

Л і т е р а т у р а

1. <http://agroportal.ua/news/ukraina/itogi-goda-eksport-ukrainskogo-meda-ustanovil-absolyutnyi-rekord/>
2. http://avv-100.com.ua/index.php?route=product/category&path=72_114
3. <https://www.arduino.cc/>
4. Sokolov, V., Krol, O., Baturin, Y.: Dynamics Research and Automatic Control of Technological Equipment with Electrohydraulic Drive. 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE (2019). DOI: <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867652>

R e f e r e n c e s

1. <http://agroportal.ua/news/ukraina/itogi-goda-eksport-ukrainskogo-meda-ustanovil-absolyutnyi-rekord/>
2. http://avv-100.com.ua/index.php?route=product/category&path=72_114
3. <https://www.arduino.cc/>
4. Sokolov, V., Krol, O., Baturin, Y.: Dynamics Research and Automatic Control of Technological Equipment with Electrohydraulic Drive. 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE (2019). DOI: <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867652>

Л о г у н о в О.Н. Система управления электроприводом медогонки на платформе Arduino

Рассмотрены современное состояние типовых средств автоматизации пчел в Украине на примере медогонки и электроприводов производства компании АBB-100. Показаны требования к медогонкам в целом и к системам управления их электроприводом частности, приведен график изменения оборотов медогонки в процессе откачки меда, предоставлено описание системы управления электроприводом медогонки на платформе Arduino и схема ее построения для привода с электродвигателем постоянного тока. Рассмотрены типичные модули платформы Arduino, которые могут быть использованы для построения систем управления электроприводом постоянного тока и определены те из них, которые пригодны для построения системы управления электроприводом медогонки. Рассчитана стоимость системы управления, показаны результаты эксплуатации этой системы, определены направления совершенствования оборудования и дальнейших исследований.

Ключевые слова: медогонка, Arduino, драйвер, датчик, электропривод, ШИМ, ПИД-регулятор.

Logunov O.M. Control system for the electric drive of the honey extractor on the Arduino platform

Beekeeping in Ukraine is being developed. The export of honey is increasing. The greater part of honey is produced by small and medium sized apiaries. They are hard to mechanize. They continue using the manual honey extractors and manual electric actuator. The popular one is the "ABB-100" company management system. But it has a lot of drawbacks. The relays have a low resource. The amount of programs is limited. There are no control systems. The task of the manual electric extractor control. Honey must be extracted from the honeycomb. The honeycomb must not be damaged. Time should be minimal. The rotation speed must be gradually increased. The direction of rotation changes. The Arduino platform has a lot of advantages. The platform is aimed at the non-professional, it is very cheap and easy to use. There are many microcontroller modules, interfaces, sensors and power modules. Documentation and examples of code are in the public domain. System of electric actuator of DC consists of similar controller board of Arduino UNO, two displays TM1637, module of Hall 3144E sensor, a button, a BTS7960 motor driver module and a breadboard. The displays are used to show the current value of the drum angular velocity and time. There are magnets on the rotor axis of the honey extractor. The magnets interact with the Hall sensor. The data from the Hall sensor is used to determine the angular of the rotor's speed. The BTS7960 motor driver provides current control till 43 amperes and voltages up to 27 volts. In practice, when connected, the current strength did not exceed up to 10 amperes. In order to control a DC collector motor pulse-width modulation of the control signal (PWM). The control system was assembled and connected to the electric drive of the honey extractor. There were no any problems in the process of pumping out about two tons of honey. No program setup was required. The speed of extracting honey exceeded the speed of manual honeycomb unsealing. The damage of frames during pumping was insignificant. The fee of the system components cost about \$ 18. Using the motor driver board allows to reverse direction of rotation without using unreliable mechanical relays. Perspectives: it is possible to install a potentiometer in order to control the speed rotation without changing the program. Installing of the interface module for programs switching. Installation of a wireless module for controlling the honey extractor from a computer or smartphone. Transfer of the angular velocity sensor from the drum axis to the motor axis. Feedback for automatic regulation of the drum rotation speed. Selection of the PID controller coefficients. Determination of the optimal rotation speed for this pumping stage based on the determination of the drum inertia moment.

Keywords: honey extractor, Arduino, driver, sensor, electric drive, PWM, PID controller, honeycomb.

Логунов Олександр Миколайович – к.т.н., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк), logunov@snu.edu.ua

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-64-67>

УДК 621.923

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ВІБРООБРОБКИ МАЛОЖОРСТКИХ ДЕТАЛЕЙ

Мелконов Г.Л.

RESEARCH OF PROCESSES OF VIBRATION PROCESSING OF SMALL PARTS

Melkonov H.L.

У статті проаналізовані технології виготовлення мало-жорстких деталей в умовах одиничного і дрібносерійного виробництва. Підвищення ефективності та продуктивності технології віброобробки, яка належить до групи штучно стиральних операцій сприяє поліпшенню експлуатаційних властивостей маложорстких деталей, часткового або повного усунення прігіночних робіт, можливо-сті інтенсифікації режимів різання на наступних механічних операціях. Це, своєю чергою, знижує трудомісткість виготовлення деталей і складання машин, збільшує їх надійність. Розроблені методи управління процесом віброобробки та діагностики напружено-деформованого стану матеріалу при віброобробці, що враховують зміни значень власних частот на перших трьох формах коливань, що передбачають корекцію розташування щодо деталі точок прикладання впливу та опор, а також враховують зміни температурного поля деталі в процесі дії вібрації.

Ключеві слова: віброобробка, залишкові напруги, точність обробки.

Вступ. В машинобудуванні набули широкого поширення матеріали з високими показниками міцності і спеціальними властивостями. У зв'язку з цим є тенденція до зниження металоемності і маси машин, і як наслідок - утворення великої кількості мало-жорстких деталей з різними геометричними параметрами. Постійне підвищення вимог до якості, надійності і довговічності технічних виробів стає ключовим завданням сучасного машинобудування. Внаслідок створення все більш міцних і технологічних конструкцій вузлів і агрегатів, в сучасному машинобудуванні відбувається природне зниження металоемності продукції і, як результат, формування значного класу маложорстких деталей: вали, осі, ходові гвинти, шпинделі верстатів, гребні і т.д. Такі мало-жорсткі деталі найчастіше лімітують міжремонтні, міжсервісні і ресурсні інтервали виробів. Виробництво подібних деталей постійно збільшується, що обумовлено все зростаючою потребою в прецизійних машинах, зростанням швидкостей обертання технологічного обладнання в нафтовій, газовій, ав-

томобільної, суднобудівної та авіаційної промисловості.

Постановка проблеми. У сучасному машинобудуванні велика увага приділяється технології виготовлення маложорстких деталей типу «вал». В даний час машинобудівне виробництво в ЄС нарощує обсяг випуску маложорстких деталей, що обумовлено вдосконаленням розрахунків на міцність, оптимізацією форм і конструкцій деталей, зниженням металоемності виробів і все зростаючою потребою в прецизійних машинах [1].

Виготовлення маложорстких деталей з рівномірним і мінімальним рівнем залишкових напруг, характеризуються високою експлуатаційною точністю, тому тема дослідження процесів віброобробки таких деталей є актуальним питанням. Автоматизація віброобробки дозволяє використовувати цей процес в сучасній технології виготовлення маложорстких деталей поряд з автоматизованими операціями механічної обробки, які в даний час доведені до практичної реалізації.

Основною проблемою при виготовленні мало-жорстких деталей типу «вал», є наявність в матеріалі деталі значного рівня і нерівномірного розподілу внутрішніх залишкових напружень, поява яких в значною мірою зумовлено технологічними причинами. В результаті релаксації даних напружень відбувається викривлення виробів, причому процес релаксації нерідко значно розтягнутий у часі, а це може приводити до викривлення вже готового виробу. Тому боротьба з нерівномірним розподілом внутрішніх залишкових напружень, в маложорстких деталях, є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В роботах авторів [1, 2], продуктивність вібраційної обробки з ростом амплітуди збільшується, і тому, за їхнім твердженням, слід вибирати найбільші амплітуди коливань для підвищення інтенсивності знімання металу. Залежно від частоти коливань продуктивність процесу змінюється немонотонно. При

обробці різних матеріалів, в роботі [2], є діапазон частот, для яких характерний найбільший з'їм металу, а саме: при обробці на частотах 30 ... 40 Гц для деталей з бронзи, силуміну і сталі 3 він максимальний. Однак вже подальші дослідження [2 – 4] і результати обробки деталей в НДЛ «ОВА» СНУ ім. В. Даля, а також в рекомендаціях зарубіжних фірм Rosler, W. Trowal (Німеччина) зазначено, що обробку деталей доцільно проводити на частоті 50 Гц і вище.

Відомий ряд теоретичних залежностей, використовуваних для визначення величин знімання металу від часу при вібраційній обробці. Всі вони відмінні один від друга. Проведений аналіз літературних джерел, наведених в [4, 5], показав, що на сьогоднішній день рішення даного питання має два основних підходи: визначення знімання металу одним зерном абразивного інструменту та однієї гранулою певної геометричної форми [6 – 8]. Другий з перерахованих підходів більш прийнятний, так як властивий саме для фінішних методів обробки на верстатах без жорсткої кінематичного зв'язку, один з яких (вібраційна обробка на верстатах з U-подібним контейнером) розглядається в даній статті.

Автори [6, 7] в 1985 році внесли в технологічні процеси виготовлення базових корпусних деталей прецизійних токарних станків вібромеханічну обробку взамін низькотемпературного відпалу з метою стабільності геометричної форми. Отримані результати результатів цих досліджень говорять про доцільність застосування вібромеханічної обробки як енергозберігаючого методу, однак авторам не вдалося отримати геометричну стабільність такого ж рівня, як і після добре відроблених термінових операцій. Встановлений пристрій для реалізації способів вібромеханічної обробки характеризується низькою надійністю та низькою потужністю.

Мета статті. Метою роботи є дослідження процесу віброобробки для підвищення експлуатаційної точності малошорстких деталей, шляхом автоматичного управління напружено-деформованим станом матеріалу в ході технологічного процесу віброобробки.

Результати дослідження. Функціональна схема САУ віброобробки представлена на рис. 1. Після установки в вертикальному або горизонтальному положенні деталі, що переміщуються щодо останньої опори 1 і розміщення на деталі вібробуджувач і датчиків починають процес віброобробки з накладанням на деталь механічних коливань [8 – 10]. При цьому опори розміщують в зонах вузлів, і при переході до обробки на іншій своїй формі коливань їх перевстановлюють в будь-які з двох зон вузлів а вібробуджувач розміщують в зоні пучности відповідних власних форм коливань.

На першому етапі роботи САУ визначають резонансні частоти згинальних коливань і проводять, як правило, на третій формі згинальних коливань обробку до досягнення деякого мінімального і постійного значення відповідної власної частоти у часі.

На другому етапі проводять на цій змінній резонансній частоті додаткову віброобробку, при скорегованому значенні частоти збудження і при необхідності обробки деталі на іншій або інших власних формах коливань, повторюють вказаний цикл з періодичним коригуванням резонансних частот до тих пір, поки не буде досягнутий заданий або необхідний для даної деталі мінімальний рівень залишкових напружень.

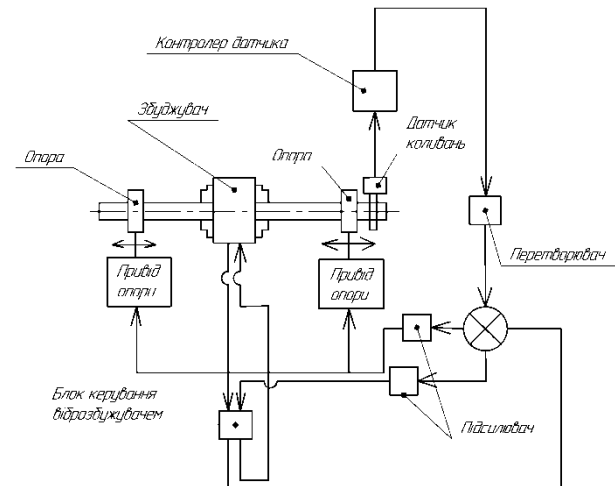


Рис. 1. Функціональна схема САУ

Для точного визначення чисельних значень залишкових напружень і впливу на їх значення і розподілу по довжині деталі була спроектована і виготовлена установка для віброобробки обробки малошорстких деталей довжиною до 6000 мм і діаметром до 80 мм. Для замірів викривлення валів була спроектована і виготовлена установка. Результати вимірів залишкових напружень валів, віброоброблених з використанням САУ, показали вирівнювання по довжині деталі і зниження рівня залишкових напружень в 3 – 5 разів в порівнянні з валами, віброобробленими без використання запропонованої системи.

На підставі досліджень процесів віброобробки малошорстких деталей, які показали значне нагрівання деталі при віброобробці, запропонований спосіб контролю процесу віброобробки малошорстких деталей, який включає вимір діючих значень параметрів процесу, причому про якість процесу віброобробки судять по зміні величини параметра, що характеризує побічно розподіл залишкових напружень в матеріалі деталі, в якості якого використовують температурне поле деталі, а процес віброобробки завершують при досягненні постійних в часі значень температури по всій довжині деталі, близьких до значень, що вимірюється в пучностях власних форм деталі. Температурне поле деталі в даному випадку запропоновано реєструвати безконтактним методом – із застосуванням тепловізора.

В ході віброобробки при впливі на вал обурює гармонійного зусилля з амплітудою $P = 400$ Н з частотою $f = 1 \dots 120$ Гц протягом 1 хвилини стався локальний розігрів заготовки в місцях пучности зсувів

від кімнатної температури (близько 20 °С) до 90 °С (максимальна температура).

У вузлах зсувів температура підвищилася незначно. При обробці на частоті 39 Гц розігрів стався в перерізі А (рис. 2, а)

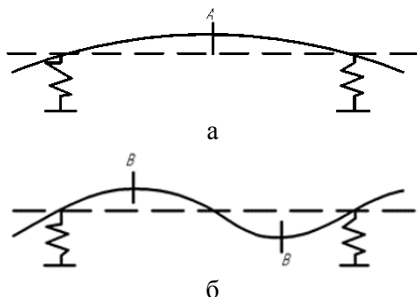


Рис. 2. Місця локального розігріву при віброобробці через 1 хв: (а) на частоті 39 Гц, (б) на частоті 98 Гц

При обробці на частоті 98 Гц розігрів стався в перетині В (рис. 2, б). після 10 хвилин віброобробки температура валу по його довжині поступово вирівнялася завдяки теплопровідності.

Висновки.

1. Проаналізовано чинники процесу вібраційної обробки, що впливають на підвищення його продуктивності. На сьогоднішній день немає єдиної думки про ступінь впливу таких чинників, як, маса абразивних гранул, маса деталей, амплітуда і частота коливань контейнера верстата.

2. Визначено, що при процесі обробки маложорстких деталей є необхідність застосування результатів чисельного моделювання процесу обробки і деформації деталі, на основі результатів якого можливе формування керуючої програми верстата з ЧПУ, що враховує спотворення геометрії при обробці заготовки.

3. Впровадження САУ дозволяє вирішити задачу підвищення експлуатаційної точності маложорстких деталей за рахунок загальної та рівномірної стабілізації і мінімізації залишкових напружень, отриманих виробом на всіх стадіях технологічного процесу.

Література

1. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии Ч. 2. Технология вибрационной обработки. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 1994. 89 с.
2. Венцкевич Г.ж. Влияние некоторых параметров абразивного наполнителя на эффективность процесса шлифования в вибрирующих резервуарах: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Одесский политехнический институт, Одесса, 1986. 175 с.
3. Бабичев А.П., Чукарина И.М., Рысева Т.Н., Мотренко П.Д. Справочник инженера-технолога в машиностроении. Ростов-на-Дону: «Феникс», 2005. 541 с.
4. Бранспиз Е.В. Повышение эффективности виброабразивной обработки путем рационального

выбора ее основных параметров: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / НТУ «ХПИ», Харьков, 2002. 265 с.

5. Fedorovich, V.A., Mitsyk, A. V. Mathematical Simulation of Kinematics of Vibrating Boiling Granular Medium at Treatment in the Oscillating Reservoir. *Key Engineering Materials*. 2013. Vol. 581. P. 456 – 461. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.581.456>
6. Дальский А.М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. М.: Машиностроение, 1975. 223 с.
7. Фролов К.В. Технология изготовления деталей машин: [энциклопедия] / А.Г. Сулов. М.: Машиностроение, 2000. 841 с.
8. Piechnik, S. Combined tension-bending creep for a solid bar *Tekniska hogskolan*. Stockholm, 1962. № 194
9. Krol O., Sokolov V. Parametric modeling of machine tools for designers. Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. 112 p. DOI: <https://doi.org/10.7546/PMMTD.2018>
10. Krol O.S., Porkuian O.V., Sokolov V.I., Tsankov P.G. Vibration Stability of Spindle Nodes in the Zone of Tool Equipment Optimal Parameters. *Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences*. Sofia: “Prof. Marin Drinov” Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2019. Vol. 72. No. 11. P. 1546 – 1556. DOI: <https://doi.org/10.7546/CRABS.2019.11.12>

References

1. Babichev A.P. *Osnovy vibracionnoj tehnologii* Ch. 2. *Tehnologija vibracionnoj obrabotki*. Rostov-na-Donu: DGTU, 1994. 89 s.
2. Venckevich Gzh. Vlijanie nekotoryh parametrov abrazivnogo napolnitelja na jeffektivnost' processa shlifovaniya v vibrirujushhh rezervuarah: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.02.08 / Odesskij politehnicheskij institut, Odessa, 1986. 175 s.
3. Babichev A.P., Chukarina I.M., Ryseva T.N., Motrenko P.D. *Spravochnik inzhenera-tehnologa v mashinostroenii*. Rostov-na-Donu: «Feniks», 2005. 541 s.
4. Branspiz E.V. *Povyshenie jeffektivnosti vibroabrazivnoj obrabotki putem racional'nogo vybora ee osnovnyh parametrov*: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.03.01 / NTU «HPI», Har'kov, 2002. 265 s.
5. Fedorovich, V.A., Mitsyk, A. V. Mathematical Simulation of Kinematics of Vibrating Boiling Granular Medium at Treatment in the Oscillating Reservoir. *Key Engineering Materials*. 2013. Vol. 581. P. 456 – 461. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.581.456>
6. Dal'skij A.M. *Tehnologicheskoe obespechenie nadezhnosti vysokotochnyh detalej mashin*. M.: Mashinostroenie, 1975. 223 s.
7. Frolov K.V. *Tehnologija izgotovlenija detalej mashin*: [jenciklopedija] / A.G. Suslov. M.: Mashinostroenie, 2000. 841 s.
8. Piechnik, S. Combined tension-bending creep for a solid bar *Tekniska hogskolan*. Stockholm, 1962. № 194
9. Krol O., Sokolov V. Parametric modeling of machine tools for designers. Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. 112 p. DOI: <https://doi.org/10.7546/PMMTD.2018>
10. Krol O.S., Porkuian O.V., Sokolov V.I., Tsankov P.G. Vibration Stability of Spindle Nodes in the Zone of Tool Equipment Optimal Parameters. *Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences*. Sofia: “Prof. Marin Drinov” Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2019. Vol. 72. No. 11. R. 1546 – 1556. DOI: <https://doi.org/10.7546/CRABS.2019.11.12>

Мелконов Г.Л. Исследование процессов виброобработки маложестких деталей

В статье проанализированы технологии изготовления маложестких деталей в условиях единичного и мелкосерийного производств. Повышение эффективности и производительности технологии виброобработки, которая относится к группе искусственно стирающих операций способствует улучшению эксплуатационных свойств маложестких деталей, частичному или полному устранению пригоночных работ, возможности интенсификации режимов резания на последующих механических операциях. Это, в свою очередь, снижает трудоемкость изготовления деталей и сборки машин, увеличивает их надежность. Разработанные новые методы управления процессом виброобработки и диагностики напряженно-деформированного состояния материала при виброобработке, учитывающие изменения значений собственных частот на первых трех формах колебаний, предусматривающие коррекцию расположения относительно детали точек приложения воздействия и опор, а также учитывающие изменения температурного поля детали в процессе вибровоздействия.

Ключевые слова: виброобработка, остаточные напряжения, точность обработки.

Melkonov H.L. Research of processes of vibration processing of small parts

Analysis manufacturing technology small parts in single and small batch productions revealed that practiced administered manual finishing operations and the use of several expensive thermal artificially oldness operations for predetermined items parameters. Such a path substantially increases the complexity of the processing required and does not guarantee product quality. Therefore, improvement operations artificially oldness group in manufacturing small parts technology is an important task of raising manufacturing efficiency and quality of engineering products. Improving the efficiency and productivity vibration treatment technology, which refers

to a group artificially oldness operations improves operational properties small parts, partial or complete elimination of the fitting works, the possibilities for intensification of the cutting subsequent mechanical operations. This, in turn, reduces the complexity of the manufacture of parts and assembly machines, increasing their reliability. New methods have been developed for controlling the process of vibration treatment and diagnostics of the stress-strain state of the material during vibration treatment, taking into account changes in the values of natural frequencies in the first three modes of vibration, providing for the correction of the location of the points of application of the action and supports relative to the part, and also taking into account changes in the temperature field of the part during vibration. The quality of the vibration treatment process is judged by the change in the value of the parameter, which indirectly characterizes the distribution of residual stresses in the material of the part, which is used as the temperature field of the part, and the vibration treatment process is completed when the temperature constant over the entire length of the part is reached, close to the values measured in the antinodes of its own part forms. The factors of the vibration treatment process influencing the increase of its productivity are analyzed. To date, there is no consensus on the degree of influence of such factors as the mass of abrasive granules, the mass of parts, the amplitude and frequency of oscillations of the machine tool container.

Keywords: vibration treatment, residual stresses, processing precision.

Мелконов Григорій Леонідович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк), g.melkonov78@gmail.com

Стаття подана 02.02.2021 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-68-74>

УДК 624.9.048

РОЗВИТОК ВІБРАЦІЙНОЇ ОЗДОБЛЮВАЛЬНО-ЗАЧИЩУВАЛЬНОЇ ОБРОБКИ В СЕРЕДОВИЩІ ВІЛЬНИХ АБРАЗИВНИХ ГРАНУЛ

Міцик А.В.

DEVELOPMENT OF VIBRATION FINISHING AND CLEANING IN THE ENVIRONMENT OF FREE ABRASIVE GRANULES

Mitsyk A.V.

Розглянуто перспективи розвитку вібраційних технологій і обладнання в сучасному машинобудуванні. Викладена фізична і практична сутність і закономірності процесу оздоблювально-зачищувальної віброобробки. Наведено відмінні риси процесів мікрорізання і пружнопластичного деформування оброблюваних поверхонь. Проведено структурне механо-фізичне моделювання процесу руйнування поверхневого шару матеріалу оброблюваної деталі. Викладено технологічні можливості та вказані шляхи інтенсифікації віброобробки скороченням допоміжного часу механізацією завантаження і вивантаження середовища з резервуара та відділенням деталей від робочого середовища.

Ключові слова: віброобробка, робоче середовище, одинична гранула, оброблювана деталь, мікрорізання, пружнопластичне деформування, модель віброобробки.

Вступ. У сучасному машинобудуванні основний вплив на якісні та експлуатаційні показники деталей здійснюють операції оздоблювально-зачищувальної обробки, завдання підвищення продуктивності якої пов'язані з удосконаленням наявних та розробкою нових ефективних способів [1 – 5].

Оздоблювально-зачищувальна обробка об'єднує групу технологій безрозмірної обробки, що переслідують своєю метою видалення дефектів з поверхонь деталей, отриманих методами лиття, гарячого і холодного штампування, а також різальним інструментом на металорізальних верстатах.

Кількість деталей машинобудівних виробництв, що підлягають оздоблювально-зачищувальним операціям, становить 85 – 95 % від загальної кількості виготовлених деталей. У зв'язку зі зростаючими вимогами до якості виробів, є підстави вважати, що відсоток деталей, які підлягають оздоблювально-зачищувальним операціям, буде ще більшим. До теперішнього часу згадані операції на 60 % і більше виконуються із застосуванням мало-механізованої ручної праці, що робить проблему пі-

двищення ефективності оздоблювально-зачищувальної обробки своєчасною та актуальною.

Метою статті є представлення загальних відомостей про сутність вібраційної технології, її фізичні особливості та закономірності, пов'язаних з процесами мікрорізання і пружнопластичного деформування, а також шляхи вдосконалення наявних і створення нових способів оздоблювально-зачищувальної обробки, спрямованих на поповнення парку вітчизняних металообробних виробництв прогресивними технологіями та обладнанням.

Перспективи розвитку вібраційних технологій і обладнання. Безперервне вдосконалення процесів оздоблювально-зачищувальної обробки, науковий і виробничий пошук шляхів їх інтенсифікації та розширення технологічних можливостей вимагає створення, вивчення та промислового впровадження нових різновидів високоефективних способів формування поверхонь деталі, пов'язаних зі зміною форми та розмірів, якості поверхні, стану і властивостей вихідного матеріалу.

Вібраційні технології та обладнання, вирішуючи поставлені завдання з точки зору отримання необхідного результату за своїм фізичним змістом істотно відрізняються від традиційних способів обробки. Причому такий нетрадиційний підхід дозволяє створювати нові способи обробки та технологічні процеси, що характеризуються високою ефективністю, оригінальними якісними показниками, а також сприяють проектуванню екологічно чистих ресурсозаощаджувальних технологій.

Великий інтерес до цього процесу пояснюється широкими технологічними можливостями та суттєвими техніко-економічними перевагами. Область використання віброоброблюючих технологій в різних галузях виробництва досить багатогранна і має тенденцію до подальшого розширення.

Безперервний розвиток галузі технології машинобудування призводить до вдосконалення наяв-

них та проектування нових різновидів віброобробки. Передумовою до їх створення є принцип комбінування різних схем обробки та впливів різних видів енергії. Модернізуючи наявні способи віброобробки та створюючи нові, можна підвищити продуктивність і поліпшити якість виробів, що випускаються, знизити собівартість їх виготовлення.

Комбіновані процеси дозволяють не тільки інтенсифікувати відомі технології, але і реалізувати нові фізико-хімічні ефекти при обробці деталей. Тому створення нових комбінованих методів віброобробки є вельми перспективним напрямком в розвитку науки та створенні нової техніки.

Сутність і закономірності процесу віброобробки. Фізична сутність механічних і фізико-механічних явищ при віброобробці визначається:

- фізичними властивостями абразивних гранул;
- характеристикою матеріалу оброблюваних деталей;
- динамічними параметрами процесу, що відображають режим обробки;
- кількісним і якісним складом хімічно-активної рідини;
- умовами ведення процесу.

Практична сутність віброобробки, а також результати досліджень її різних аспектів показують, що продуктивність процесу знаходиться в тісній залежності від механічних властивостей оброблюваного матеріалу, режимів обробки, форми та розмірів застосовуваних резервуарів виброверстатів, способу розміщення деталі в резервуарі, характеристики абразивного середовища, виду хімічно-активних розчинів [6 – 11].

Вібраційна обробка в залежності від характеру застосовуваного робочого середовища являє собою механічний або хіміко-механічний процес зйому частинок металу і його окислів з оброблюваної поверхні, а також згладжування мікронерівностей шляхом їх пластичного деформування гранулами робочого середовища, які здійснюють в процесі роботи коливальний рух [12 – 16].

Практична сутність вібраційної обробки, (рис. 1) полягає в наступному. Оброблювані деталі 2 і гранули робочого середовища 3 завантажують в резервуар 1 виброверстата, що має, наприклад «U» – подібну форму поперечного перерізу. Резервуар 1, встановлений на пружній підвісці 4, 7, може здійснювати коливальні рухи в різних напрямках. Резервуар 1 отримує коливання від інерційного віброзбудувача 9 з частотою до 50 Гц і амплітудою від 0,5...8 мм. В процесі обробки деталі 2 і гранули робочого середовища 3 переміщуються відносно один одного здійснюючи два види рухів, коливальний рух і повільне обертання всього завантаження, тобто циркуляційний рух.

Від стінок резервуара 1 коливання передаються прилеглим шарам робочого середовища 3, які повідомляють подальшим шарам і т.д. В процесі обробки деталі 2 займають різне положення в робочому середовищі 3, що забезпечує досить рівномірну об-

робку всіх поверхонь. Велика кількість ударів які діють на оброблювану деталь одночасно в різних напрямках, сприяє утриманню її в підвішеному стані, виключаючи грубі забоїни та пошкодження [4, 5].

Процеси обробки в гранульованих робочих середовищах здійснюються широким комплексом механо-фізико-хімічних явищ, обумовлених різними технологічними схемами взаємодії середовища з оброблюваною поверхнею, різноманіттям характеристик робочих середовищ і технологічних рідин, параметрів режимів обробки.

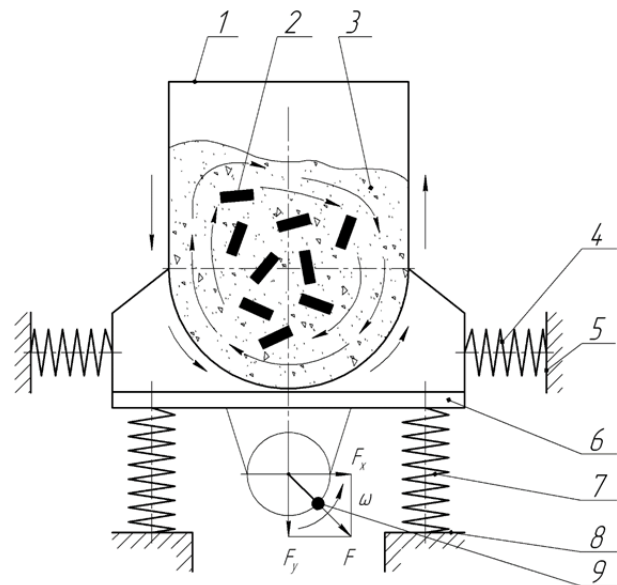


Рис. 1. Принципова схема процесу віброобробки в резервуарі з «U» – подібною формою перерізу в площині коливаль: 1 – резервуар; 2 – оброблювані деталі; 3 – робоче середовище; 4, 7 – горизонтальна і вертикальна пружні підвіски; 5, 8 – жорсткі опори; 6 – віброплатформа; 9 – віброзбудувач

Більшість операцій віброобробки проводиться з безперервною або періодичною подачею хімічно-активного розчину. Це створює умови протікання хімічних і електрохімічних процесів.

Взаємодія середовища з оброблюваною поверхнею супроводжується пластичною деформацією і мікрорізанням, тертям, тепловими явищами, хімічною взаємодією.

Особливості взаємодії гранульованого середовища та оброблюваної деталі дозволяють оцінити технологічні можливості й закономірності відповідного способу обробки. При вивченні процесів обробки деталей в гранульованих середовищах особлива увага приділяється контактній взаємодії робочого середовища з оброблюваною поверхнею, тобто локальним контактам і їх інтегральному прояву у вигляді мікрорізання і пружнопластичного деформування.

Більшість способів оздоблювально-зачищувальної обробки характеризується динамічною взаємодією гранульованого середовища з робо-

чою поверхнею, при якому має місце ударний контакт гранули з поверхнею деталі, утворення слідів обробки та мікрорельєфу поверхні.

Особливості процесів мікрорізання і пружнопластичного деформування в процесах віброобробки. Аналіз явищ в зоні зіткнення гранул середовища з поверхнею оброблюваної деталі показує, що під дією коливань має місце ударний контакт абразивної гранули з поверхнею деталі. При цьому гранули абразиву своїми зернами проникають в оброблювану поверхню. Вони різняться станом своїх активних зерен, шорсткістю, формою, розмірами, в слідстві чого на характер їх механічного контакту з оброблюваною поверхнею впливають різні за величиною нормальні сили F_i/N , де N – число контактуючих зерен. Кожне з зерен гранули здатне розвивати до зміни свого положення щодо сусідніх гранул деяку силу τ_i/N , спрямовану паралельно оброблюваної поверхні (рис. 2). Контакт абразивної гранули з оброблюваною поверхнею здійснюється на площадках малої величини, яка визначається силою зіткнення, кількістю і станом активних зерен, рівнем їх закріплення, розмірами, а також фізико-механічними властивостями матеріалу [17].

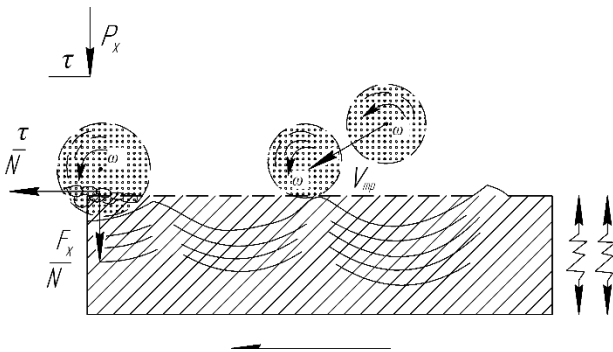


Рис. 2. Схема взаємодії абразивної гранули вільного середовища з оброблюваною поверхнею деталі

Розглядаючи одиничну гранулу, що переміщується відносно оброблюваної поверхні, можна відзначити, що її профіль складається з зерен, які здійснюють як мікрорізання, так і таких, що не беруть участь в обробці. Характер впливу цих зерен на метал залежить від геометричних параметрів робочого контуру гранули. Залежно від орієнтації різальних кромek абразивних зерен відносно твірної гранули має місце три види взаємодії зерна з оброблюваною поверхнею: різання; пластичне деформування; тертя. При цьому кожне абразивне зерно в процесі обробки може спочатку виконувати тільки тертя, потім пластичне деформування і нарешті здійснювати різання та навпаки.

Таке чергування роботи, що здійснюється абразивними гранулами, пов'язане з характером їх переміщення по поверхні оброблюваної деталі. Встановлено, що гранули можуть залишати на контактній поверхні складні за контурами сліди, які різняться за

глибиною і розташуванню на поверхні. Глибина сліду змінюється в напрямку руху гранули та визначається швидкістю її переміщення, силою і частотою впровадження за час контакту.

При віброобробки відбувається взаємодія поверхні двох тіл, робочої поверхні окремої гранули та оброблюваної деталі. Характер механічних і фізико-механічних процесів визначається: властивостями різальних зерен; розмірами та формою зерен; кількістю і розташуванням зерен на поверхні гранули; характеристикою оброблюваного матеріалу і його властивостями; параметрами віброобробки.

Процес віброобробки залежить від характеру локального контактування робочих зерен абразивної гранули з тонким поверхневим шаром оброблюваної деталі. В контактній зоні з абразивними гранулами, які коливаються і переміщуються по поверхні деталі, відбувається взаємне інтенсивне руйнування поверхонь твердих тіл, тобто процес притирки.

Характер динамічних навантажень [18–22] в зонах контакту гранул робочого середовища і деталей відрізняє спосіб віброобробки від інших відомих способів оздоблювально-зачищувальної обробки. До відмітних ознак віброобробки можна віднести наступне:

- навантаження зерен абразивних гранул відбувається рівномірно при стабільній глибині проникнення кожного з них;
- забезпечується чергування деформуючих і різальних зерен;
- наявність коливань забезпечує зменшення сил тертя на контактних поверхнях системи «гранула – деталь»;
- абразивна гранула просочує хімічно-активним розчином оброблювані деталі та забезпечує його подачу в зону контакту з оброблюваною поверхнею.

Більшість з характерних ознак обумовлено характерним для віброобробки процесом саморегулювання, який дозволяє гранулі, що переміщується, з впровадженими в поверхню металу зернами займати оптимальне положення і рівномірно наносити на оброблювану поверхню елементарні сліди обробки. При цьому створюються умови однорідного поверхневого шару, усувається можливість виникнення грубих слідів руйнування. Відзначається, що в точках контакту тіл виникає складний спектр напруг, а також відбувається мікрорізання та пружнопластичне деформування.

Слід зазначити і особливості протікання процесу за часом. Руйнування матеріалу починається після закінчення деякого періоду, протягом якого протікають процеси утворення слідів обробки, наклеп поверхні, зародження мікротріщин і т.п. Тривалість цього періоду залежить від фізико-механічних властивостей матеріалів і умов обробки.

У зв'язку з наявністю актів багаторазового пружнопластичного деформування ділянок оброблюваної поверхні поряд з процесом прямого руйнування проявляється процес багаточиклового пласти-

чного деформування і полідеформаційного руйнування, який повторюється з частотою зіткнення гранул середовища з оброблюваною поверхнею.

Структурне механо-фізичне моделювання процесу віброобробки. Аналіз процесу руйнування поверхні деталей в середовищі абразивних гранул, що вільно коливаються, дозволяє побудувати модель процесу віброобробки яка полягає в наступному:

- ударний механічний контакт, в процесі якого має місце пружна, пластична, пружнопластична деформація і руйнування поверхневого шару з видаленням частинок металу;
- утворення активного шару металу;
- взаємодія активного шару металу з навколишнім середовищем, впродовж якого відбувається утворення ослаблених вторинних структур;
- руйнування вторинних структур з подальшими ударами гранул;
- утворення мікрорельєфу у вигляді шару дрібнороздріблених частинок.

У зв'язку з розглянутою моделлю руйнування поверхневого шару оброблюваної деталі становить інтерес визначення співвідношення частки кожного з них у загальному процесі обробки. Необхідно відзначити, що співвідношення процесу мікрорізання і пружно деформування орієнтовно становить 30...35 та 70...65 % [5].

Таким чином інтенсивність зйому металу при віброобробці залежить від інтенсивності механічного та хімічного впливу і здатності матеріалу деталі чинити опір дії процесів запропонованої моделі руйнування поверхні деталі.

Технологічні можливості процесу віброобробки. У літературних джерелах наведені порівняння технологічних процесів обробки деталей до високих класів чистоти поверхні, що графічно проілюстровано порівнянням ефективності технологічних процесів обробки деталей з вуглецевих сталей (рис. 3) [4].

Технологічний процес, рекомендований НДІТМ (Ростов-на-Дону, РФ), складається з п'яти переходів, для яких наведені режими обробки та абразивний матеріал (крива I). В цьому випадку отримання мікрошорсткості, відповідних $Ra = 0,32...0,16$ мкм при початковій $Rz = 80...40$ мкм досягається за 12 ... 16 годин обробки в середовищі абразивних гранул певної зернистості для кожного переходу. Остаточна обробка поверхонь деталей здійснюється повстяними пижами, шаржовані пастою ГОІ.

ЕНІМВ (Москва, РФ) пропонує ряд технологічних процесів вібраційного шліфування та полірування деталей. Для отримання поверхонь з мікрошорсткістю $Ra = 0,32$ мкм обробку рекомендовано проводити в три етапи з подальшим зменшенням розміру гранул робочого середовища. Загальна тривалість обробки складає 12 ... 14 годин (крива II).

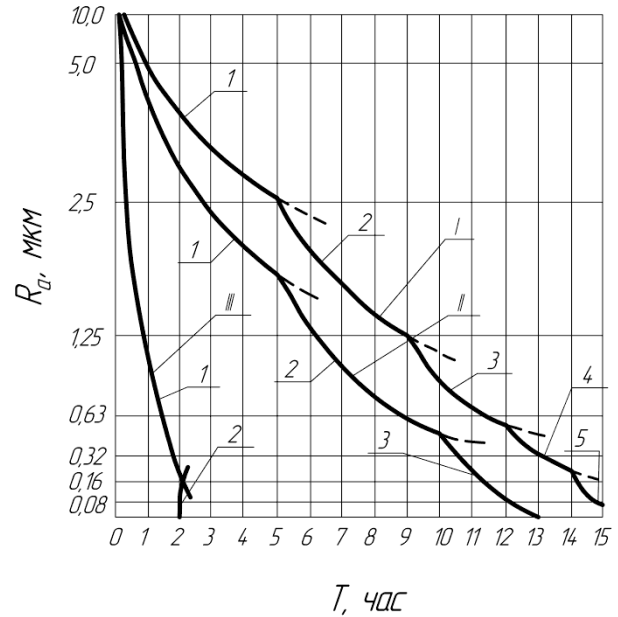


Рис. 3. Порівняльна ефективність технологій віброобробки виробів з вуглецевих сталей: I – технологія НДІТМ, 1, 2, 3, 4, 5 – технологічні переходи [1]; II – технологія ЕНІМВ, 1, 2, 3 – технологічні переходи [34]; III – технологія СНУ ім. В. Даля, 1, 2 – технологічні переходи

Звісно, що такі багатостадійні технологічні процеси віброобробки отримали обмежене промислове застосування.

Хімічно-активний розчин, розроблений в НДЛ «ОВА» СНУ ім. В. Даля дозволяє усунути багаторазові перевантаження вмісту резервуара та отримати чистоту обробленої поверхні, відповідну $Ra = 0,32...0,16$ мкм при початковій $Rz = 80...40$ мкм за 1,5 години обробки (крива III). Таким чином процес отримання на поверхнях деталей з вуглецевих сталей чистоти, відповідної мкм може здійснюватися за одну операцію, друга операція обробки потрібна при необхідності отримання чистоти поверхні до $Ra = 0,16...0,08$ мкм.

Шляхи інтенсифікації процесу віброобробки. Серед напрямків розвитку віброоброблюючої техніки і технології можна виділити наступне.

1) Скорочення допоміжного часу обробки створенням пристроїв для механізації завантаження і вивантаження середовища з резервуара, а також відділення деталей від робочого середовища. Вбудовування таких пристроїв в конструкції виброверстата підвищує його вартість і обмежує сферу застосування. Скорочення допоміжного часу також йде шляхом механізації наливу робочих розчинів в резервуар, їх зливу і наступного промивання робочого середовища. Заходи за цим напрямком підвищують продуктивність на 25 ... 30 %.

2) Якісні зміни процесів віброобробки та створення виброверстатів з метою значного скорочення основного і допоміжного часу проведення операцій. В НДЛ «ОВА» створена технологія та устаткування для обробки деталей зустрічнорухомими потоками

робочого середовища в резервуарі, який оснащений додатковою робочою поверхнею у вигляді дефлектора, що створює складні траєкторії руху гранул середовища. Змінюючи положення дефлектора, можна управляти процесом обробки, оптимізуючи умови, як для чорнових операцій з великим зйомом металу, так і для чистових операцій з отриманням високих класів чистоти поверхні. Така конструкція обладнання розширює технологічні можливості віброобробки на 50 ... 60 %.

Висновки.

Інформація, викладена в статті, може бути корисна фахівцям, зайнятим розвитком та впровадженням способів оздоблювально-зачистувальної обробки. Представлений матеріал є результатом аналітичних досліджень вітчизняних і закордонних вчених, опублікованих в літературних джерелах по актуальній проблемі металообробних виробництв, і може послужити основою для наступних висновків.

1. У загальному випадку віброобробка характеризується наступними явищами: динамічним впливом робочого середовища у вигляді безлічі зіткнень його гранул з поверхнею оброблюваної деталі, механохімічною взаємодією середовища та матеріалу деталі, акустичним впливом ударних хвиль. Такі явища не можна розглядати ізольовано. Вони діють в тісному взаємозв'язку, доповнюючи один одного, підсилюючи або послаблюючи той чи інший ефект.

2. Віброобробка є комплексом взаємопов'язаних явищ, в яких беруть участь мікрорізання 30 ... 35 %, пружнопластичне деформування 65 ... 70 %, активація поверхневого шару металу, утворення і руйнування вторинних структур, що повторюються з частотою дії вимушених коливань.

3. Запропоновані конструктивні способи інтенсифікації віброобробки вирішують завдання, пов'язані зі зміною динаміки руху гранул робочого середовища, що призводить до підвищення в 1,3 ... 1,6 раза силових факторів контакту гранул з деталями.

4. Скорочення в 1,5 ... 1,8 і більше разів допоміжного часу обробки досягається створенням пристроїв для механізації завантаження і вивантаження середовища з резервуара, а також відокремлення оброблених деталей від робочого середовища. Вбудовування таких пристроїв в конструкції виброверстатів підвищує їх вартість обмежуючи сферу застосування.

5. Застосування мультиенергетичних технологій та введення в резервуар дефлекторів робочого середовища сприяє усуненню зон зі зниженою ефективністю обробки, забезпечує рівномірність динамічного впливу гранул на оброблювані деталі та розширює технологічні можливості віброоброблюючих верстатів підвищуючи їх продуктивність на фінішних операціях у 2 ... 2,3 раза. Це є найбільш перспективним рішенням з точки зору інтенсифікації процесу.

Література

1. Мицьк А.В., Федорович В.А. Пути интенсификации отделочно-зачистной обработки комбинированием схем энергетических воздействий на рабочую среду и детали. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. Харків, НАУ ім. М.С. Жуковського «ХАІ», 2011. № 6 (83). С. 26 – 34.
2. Мицьк А.В., Федорович В.А. Развитие новых технологий вибрационной отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей обшемашиностроительного применения. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: нові рішення в сучасних технологіях. Харків, НТУ «ХП», 2012. № 47 (953). С. 226 – 233.
3. Мицьк А.В., Фадеев В.А., Федорович В.А. Развитие вопросов кинематики и динамики процессов отделочно-зачистной обработки в колеблющемся резервуаре. *Різання та інструменти в технологічних системах*. Харків, НТУ «ХП», 2012. № 82. С. 171 – 182.
4. Карташов И.Н., Шаинский М.Е., Власов В.А. Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах. Киев: Вища школа, 1975. 188 с.
5. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. Ростов-на-Дону, 2008. 694 с.
6. Носко П.Л., Калмиков М.О., Ніколаєнко А.П., Лубенська Л.М. Застосування вібраційної обробки для підвищення якості виробів: монографія. Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля. Луганськ: Ноулідж, 2009. 292 с.
7. Калмиков М.О., Шумакова Т.О., Струтинський В.Б., Лубенська Л.М. Інструмент для обробки деталей вільними абразивами. Київ – Луганськ: «Ноулідж», 2010. 214 с.
8. Струтинський В.Б., Калмыков М.А., Шумакова Т.А. К вопросу разработки математического аппарата определения оптимальной формы гранулы. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2010. № 3 (59). С. 109 – 114.
9. Ніколаєнко А.П. Совершенствование конструкции вибрационных станков с U-образной формой контейнера. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: нові рішення в сучасних технологіях. Харків, НТУ «ХП», 2013. № 56. С. 15 – 21.
10. Шумакова Т.А., Мельникова Е.П., Чесноков И.А. Влияние формы абразивных гранул на производительность процесса вибрационной обработки. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2010. № 2 (58). С. 219 – 233.
11. Николаенко А.П. Формирование поверхности изделия при вибрационной обработке. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2010. № 2 (58). С. 167 – 181.
12. Kundrák, J., Morgan, M., Mitsyk, A., Fedorovich, V. The effect of the shock wave of the oscillating working medium in a vibrating machine's reservoir during a multi-energy finishing-grinding vibration processing. *Int J Adv Manuf Technol* 106, 4339–4353 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04844-2>
13. Kundrák, J.; Mitsyk, A. V.; Fedorovich, V. A.; Morgan, M.; Markopoulos, A. P. The Use of the Kinetic Theory of Gases to Simulate the Physical Situations on the Surface of Autonomously Moving Parts During Multi-Energy Vibration Processing. *Materials*. 2019, 12, 3054. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12193054>
14. Міцьк А.В., Федорович В.О. Методичні основи теоретичного та експериментального оцінювання процесу віброобробки деталей технологічними системами комбінованого динамічного впливу вільного абразивного середовища. *Різання та інструменти в технологічних системах*. Харків, НТУ «ХП», 2018. № 89. С. 100 – 108.

15. Бабичев А.П., Мотренко П.Д., Гиллеспи Л.К. Применение вибрационных технологий на операциях отделочно-зачистной обработки деталей (очистка, мойка, удаление облоя и заусенцев, обработка кромок). Ростов-на-Дону: ДГТУ. 2010. 289 с.
 16. Николаенко А.П., Калмыков М.А. Обоснование выбора математической модели процесса вибрационной упрочняющей обработки. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2008. № 5/4 (35). С. 53 – 57.
 17. Міцик А.В., Федорович В.О., Грабченко А.І. Механофізико-хімічне моделювання процесу руйнування поверхні деталі у вільному абразивному середовищі. *Різання та інструменти в технологічних системах*. Харків, НТУ «ХПІ», 2020. № 92. С. 62 – 67.
DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2020.92.08>
 18. Харламов Ю.А., Соколов В.И., Кроль О.С. Трибологическая надежность металлорежущих станков. Северодонецк: ВНУ им. В. Даля, 2017. 320 с.
 19. Кроль О.С. Методы и процедуры динамики шпиндельных узлов: монография. Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2014. 154 с.
 20. Кроль О.С., Соколов В.И. Методы и процедуры инженерного прогнозирования в станкостроении. Северодонецк: ВНУ им. В. Даля, 2017. 116 с.
 21. Кроль О.С. Параметрическое моделирование металлорежущих станков и инструментов: монография. Луганск: СЧУ им. В. Даля, 2012. 116 с.
 22. Krol O., Sokolov V. Parametric modeling of machine tools for designers. Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. 112 p. DOI: <https://doi.org/10.7546/PMMTD.2018>
- References**
1. Mitsyk A.V., Fedorovich V.A. Puti intensifikacii otdelochno-zachistnoj obrabotki kombinirovaniem shem jenergeticheskikh vozdeystvij na rabochuju sredu i detalj. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologija*. Kharkiv, NAU im. M.E. Zhukovskogo «HAI», 2011. № 6 (83). С. 26 – 34.
 2. Mitsyk A.V., Fedorovich V.A. Razvitie novyh tehnologij vibracionnoj otdelochno-zachistnoj i uprochnjajushhej obrabotki detalej obshhemashinostroitel'nogo primenenija. *Visnik NTU «KhPI»*. Serija: novi rishennja v suchasnih tehnologijah. Kharkiv, NTU «KhPI», 2012. № 47 (953). С. 226 – 233.
 3. Mitsyk A.V., Fadeev V.A., Fedorovich V.A. Razvitie voprosov kinematiki i dinamiki processov otdelochno-zachistnoj obrabotki v kolebljushhemsja rezervuare. *Rizannja ta instrumenti v tehnologichnih sistemah*. Kharkiv, NTU «KhPI», 2012. № 82. С. 171 – 182.
 4. Kartashov I.N., Shainskij M.E., Vlasov V.A. *Obrabotka detalej svobodnymi abrazivami v vibrirujushhijh rezervuarah*. Kiev: Vishha shkola, 1975. 188 s.
 5. Babichev A.P., Babichev I.A. *Osnovy vibracionnoj tehnologii*. Rostov-na-Donu, 2008. 694 s.
 6. Nosko P.L., Kalmikov M.O., Nikolaenko A.P., Lubens'ka L.M. Zastosuvannja vibracijnoi obrabotki dlja pidvishhennja yakosti virobiv: monografija. Shidnoukr. nac. un-t im. V. Dalja. Lugans'k: Noulidzh, 2009. 292 s.
 7. Kalmykov M.O., Shumakova T.O., Strutinskij V.B., Lubens'ka L.M. *Instrument dlja obrabotki detalej vil'nimi abrazivami*. Kiiv – Lugans'k: «Noulidzh», 2010. 214 s.
 8. Strutinskij V.B., Kalmykov M.A., Shumakova T.A. K voprosu razrabotki matematicheskogo apparata opredelenija optimal'noj formy granuly. *Vibracii v tehnicji ta tehnologijah*. 2010. № 3 (59). С. 109 – 114.
 9. Nikolaenko A.P. Sovershenstvovanie konstrukcii vibracionnyh stankov s U-obraznoj formoj kontejnera. *Visnik NTU «KhPI»*. Serija: novi rishennja v suchasnih tehnologijah. Kharkiv, NTU «KhPI», 2013. № 56. С. 15 – 21.
 10. Shumakova T.A., Mel'nikova E.P., Chesnokov I.A. Vlijanie formy abrazivnih granul na proizvoditel'nost' processa vibracionnoj obrabotki. *Vibracii v tehnicji ta tehnologijah*. 2010. № 2 (58). С. 219 – 233.
 11. Nikolaenko A.P. Formirovanie poverhnosti izdelija pri vibracionnoj obrabotke. *Vibracii v tehnicji ta tehnologijah*. 2010. № 2 (58). С. 167 – 181.
 12. Kundrák, J., Morgan, M., Mitsyk, A., Fedorovich, V. The effect of the shock wave of the oscillating working medium in a vibrating machine's reservoir during a multi-energy finishing-grinding vibration processing. *Int J Adv Manuf Technol* 106, 4339–4353 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04844-2>
 13. Kundrák, J.; Mitsyk, A.V.; Fedorovich, V.A.; Morgan, M.; Markopoulos, A.P. The Use of the Kinetic Theory of Gases to Simulate the Physical Situations on the Surface of Autonomously Moving Parts During Multi-Energy Vibration Processing. *Materials*. 2019, 12, 3054. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12193054>
 14. Mitsyk A.V., Fedorovich V.O. Metodichni osnovi teoretichnogo ta eksperimental'nogo ocinjuvannja processu vibroobrobki detalej tehnologichnimi sistemami kombinovanogo dinamichnogo vplivu vil'nogo abrazivnogo seredovishha. *Rizannja ta instrumenti v tehnologichnih sistemah*. Kharkiv, NTU «KhPI», 2018. № 89. С. 100 – 108.
 15. Babichev A.P., Motrenko P.D., Gillespi L.K. Primenenie vibracionnyh tehnologij na operacijah otdelochno-zachistnoj obrabotki detalej (ochistka, mojka, udalenie obloja i zausenecv, obrabotka kromok). Rostov-na-Donu: DGTU. 2010. 289 s.
 16. Nikolaenko A.P., Kalmykov M.A. Obosnovanie vybora matematicheskoi modeli processa vibracionnoj uprochnjajushhej obrabotki. *Vostochno-evropejskij zhurnalпередовых технологий*. 2008. № 5/4 (35). С. 53 – 57.
 17. Mitsyk A.V., Fedorovich V.O., Grabchenko A.I. Mеханофізико-хімічне моделювання процесу руйнування поверхні деталі у вільному абразивному середовищі. *Різання та інструменти в технологічних системах*. Харків, НТУ «ХПІ», 2020. № 92. С. 62 – 67.
DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2020.92.08>
 18. Kharlamov Yu.A., Sokolov V.I., Krol O.S. *Tribologicheskaja nadezhnost' metallovezhushhijh stankov*. Severodoneck: VNU im. V. Dalja, 2017. 320 s.
 19. Krol O.S. *Metody i procedury dinamiki shpindel'nyh uzlov: monografija*. Lugansk: VNU im. V. Dalja, 2014. 154 s.
 20. Krol O.S., Sokolov V.I. *Metody i procedury inzhenerного прогнозирования в станкостроении*. Severodoneck: VNU im. V. Dalja, 2017. 116 s.
 21. Krol O.S. *Parametricheskoe modelirovanie metallovezhushhijh stankov i instrumentov: monografija*. Lugans'k: SNU im. V. Dalja, 2012. 116 s.
 22. Krol O., Sokolov V. *Parametric modeling of machine tools for designers*. Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. 112 p. DOI: <https://doi.org/10.7546/PMMTD.2018>

Мицык А.В. Развитие вибрационной отделочно-зачистной обработки в среде свободных абразивных гранул

Рассмотрены перспективы развития вибрационных технологий и оборудования в современном машиностроении. Изложена физическая и практическая сущность и закономерности процесса отделочно-зачистной виброобработки. Приведены отличительные особенности процессов микрорезания и упругопластического деформирования обрабатываемых поверхностей. Проведено структурное механо-физическое моделирование процесса разрушения поверхностного слоя материала обрабатываемой детали. Изложены технологические возможности и указаны пути интенсификации виброобработки сокращением вспомогательного времени механизацией загрузки и выгрузки среды из резервуара и отделением деталей от рабочей среды.

Ключевые слова: виброобработка, рабочая среда, единичная гранула, обрабатываемая деталь, микрорезание, упругопластическое деформирование, модель виброобработки.

Mitsyk A.V. Development of vibration finishing and cleaning in the environment of free abrasive granules

It has been established that vibration treatment is characterized by the dynamic action of the working medium in the form of a multitude of collisions of its granules with the surface of the workpiece, the mechanochemical interaction of the medium and the material of the workpiece, and the acoustic effect of shock waves. It is noted that the technological capabilities of processing with a free abrasive medium in oscillating tanks, as well as its productivity and efficiency when performing finishing and stripping operations, have provided widespread use in modern mechanical engineering. A structured analysis of vibration processing methods is carried out and a classification of operations used in metalworking industries is given. Methods of cleaning and washing treatment for removing molding sand residues, scale, burns, corrosion, sol-

der, sludge and various contaminants after casting, forging, hot stamping and heat treatment are identified. A controlled processing parameter has been established, which is the degree of purity of parts from metallic and non-metallic defects. The influence of the duration of vibration treatment on the cleanliness of the surface of the castings is revealed. It is indicated that finishing methods of vibration processing are technologies for removing burrs, burrs from the surface of a part, rounding off sharp edges after casting, cold and hot stamping, as well as processing with a blade tool on metal-cutting machines. On the basis of the physics of the microcutting process, it was determined that the intensity of vibration processing depends on the kinematic and dynamic characteristics of the tank movement, the physical and technological characteristics of the circulation of the working medium granules, the quantitative and qualitative composition of the chemically active solution, the physical and mechanical properties of the material of the workpiece. The operations of vibration grinding and vibration polishing are described, which are used to reduce the surface roughness of the processed parts and prepare them for galvanic and paint coatings. It has been established that the productivity of these operations is determined by the amplitude, frequency of oscillations of the reservoir, machine processing time, mass, geometric dimensions and shape of the working medium granules, as well as the composition of chemically active solutions.

Keywords: vibration treatment, working environment, single granule, workpiece, microcutting, elastoplastic deformation, vibration treatment model.

Мицик Андрій Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк), an.mitsyk@gmail.com

Стаття подана 01.02.2021 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-75-82>

УДК 629.463:629.4.027.35

ПІДВИЩЕННЯ ДОЛГОВІЧНОСТІ ВДОСКОНАЛЕНИХ ФРИКЦІЙНИХ АПАРАТІВ ВАНТАЖНОГО ПІВВАГОНА

Могила В.І., Потапенко О.О., Кортєва О.В.

INCREASE DURABILITY IMPROVED FRICTIONAL DEVICES OF THE FREIGHT GONDOLA CAR

Mogila V.I., Potapenko O.O., Kortieva O.V.

Визначено, проаналізовано та представлено результати досліджень напружено-деформованого стану елементів фрикційного апарату візка вантажного піввагону моделі 12-7019 КрВЗ та удосконалених конструкцій під дією статичного навантаження засобами комп'ютерного моделювання, а саме: еюра переміщень; графік зміни прогину комплекту пружин від дії вертикальних навантажень; еквівалентні напруги комплекту пружної підвіски; діаграма пропорційного розподілу навантажень; графік поглинання енергії гасителя коливань; результати впливу конструкцій ресорного комплексу на динамічну поведінку вантажного піввагону при швидкостях руху в діапазоні від 10 до 200 км/год. Підтверджено доцільність використання удосконалених конструкцій гасителя коливань. Відповідно до результатів дослідження динаміки вантажного піввагону у «порожньому» режимі руху засобами комп'ютерного моделювання, при порівнянні характеристик «типової» та удосконаленої конструкції систем ресорного підвішування встановлено, що проведені конструктивні зміни забезпечують стабільний рівень динамічних показників у межах допустимих нормативних значень до швидкості $v = 110$ км/год.

Знайдене конструктивне удосконалення фрикційного гасителя коливань візка вантажного вагону зі зниженою концентрацією напруг, дозволяє покращити передачу навантажень, виникаючих у ресорному підвішуванні, підвищити динамічні характеристики візка, довговічність вузла гасіння коливань та збільшити міжремонтний термін експлуатації.

Ключові слова: *клиновий гаситель коливань, удосконалена конструкція, тарілчаста пружина, прогин, жорсткість, напруга, енергія поглинання, динамічні показники.*

Актуальність дослідження. На сучасному етапі найбільш затребуваний при здійсненні масових вантажних і пасажирських перевезень є залізничний транспорт. Основними структурними елементами залізничних перевізних процесів є сукупність залізничного рухомого складу (локомотиви, вагони) і залізниці. Для безперервної реалізації використан-

ня роботи залізничного транспорту з метою зниження економічних витрат на транспортування, об'єкти, які входять до загального комплексу, повинні забезпечувати надійність функціонування всієї системи [1-3].

Постановка проблеми. Удосконалення конструкції вантажних вагонів, особливо вагонів з підвищеним навантаженням на вісь, поліпшення їх динамічних якостей, системи демпфірування і гасіння коливань, зниження силового впливу на елементи верхньої будови колії одне з найважливіших питань, яке постійно досліджується [15,21].

Застосовувані в даний час системи ресорного підвішування візків вантажних вагонів не відповідають сучасним вимогам експлуатації і тим більш перспективним, тобто унеможливають збільшення швидкості поїздів [7]. Елементи структури вантажного візка, що труться, є критичними частинами [16].

Теоретичний аналіз дослідження. Теоретичний аналіз проблеми дослідження, а також досвід експлуатації показав, що однією з умов, яка обмежує підвищення швидкості руху і поліпшення динамічних показників ресорного підвішування екіпажу, і перш за все, фрикційних клинових гасителів коливань, є силові фрикційні зв'язки ходових частин рейкових екіпажів, які обумовлюють швидкісні якості рухомого складу [14].

Проведений аналіз літературних джерел [1-19] і патентної документації та розроблена класифікація конструкційних особливостей фрикційних клинів дозволили визначити напрямки конструктивних змін клинового гасителя коливань та вибору параметрів ресорного підвішування візків вантажних вагонів, направлених на удосконалення конструкції робочої поверхні фрикційного клину та використанні модифікованого пружинного комплексу.

Мета та задачі дослідження. Метою проведення досліджень роботи фрикційного апарату вантажного вагона удосконаленої конструкції є визначення його напружено-деформованого стану під дією статичного навантаження (в порожньому і вантажному режимі) засобами комп'ютерного моделювання, пошук раціональних характеристик ресорного підвішування з урахуванням конструктивних змін та забезпечення підвищення їх довговічності.

До задач дослідження відносяться визначення характеристик жорсткості пружного комплексу, розподіл зусиль, які передаються на його окремі елементи, напружено-деформований стан складових підвіски, енергія поглинання коливань та оцінювання динамічної поведінки після проведених конструктивних змін.

Основний матеріал дослідження. Об'єктом дослідження є підвіска пружно-фрикційного пристрою моделі-аналога візка 18-100 вантажного вагона. Згідно виконаного проекту модернізації пружно-фрикційний пристрій має ряд певних конструктивних особливостей (рис. 1), де 1 – клин, 2 – надресорна балка, 3 – змінна накладка, 4 – бічна рама, 5 – фрикційна планка, 6 – зовнішня натискна пружина, 7 – внутрішня натискна пружина, 8 – тарілчаста пружина (ресора), 9 – технологічний отвір, 10 – металева кільцева прокладка.

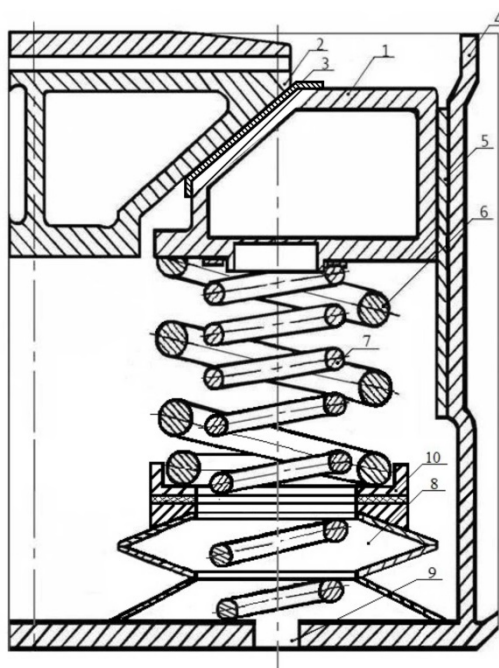


Рис. 1. Удосконалений пружинно-фрикційний пристрій

Так, на відміну від «класичного» варіанту [11], модернізована підвіска складається з вкороченої зовнішньої натискної пружини 6, яка спирається через металеву кільцеву прокладку 10 на комплект з тарілчастих пружин 8. Робоча поверхня фрикційного клина має напівсферичну форму, яка дозволяє сприймати навантаження від верхньої надбудови ві-

зка та розподіляти його по змінній контактній площині.

Відповідно до геометричних розмірів, за проектом модернізації, розроблено комп'ютерну модель пружної підвіски з використанням програмно-апаратного забезпечення SolidWorks (Dassault Systèmes) [17].

Дослідження напружено-деформованого стану елементів підвіски пружно-фрикційного пристрою візка вантажного вагона також проводились в середовищі SolidWorks.

Оцінка міцності елементів відповідальних конструкцій, що проектуються, передбачає застосування сучасних методів визначення напруженого стану, серед яких найбільш поширеним є метод кінцевих елементів (надалі – МКЕ).

Розрахунок напружено-деформованого стану окремих елементів підвіски зведено до визначення переміщень вузлів у створеній сітці моделі. Для отримання єдиного рішення, глобальна матриця жорсткості кінцевих елементів доповнюється граничними умовами, які забезпечують нерухомість кінцево-елементної моделі в просторі і запобігають виродженню матриці жорсткості внаслідок недостатньої кількості зв'язків. Необхідною умовою визначення параметрів елементів підвіски є наявність вхідних даних: геометрії дослідного конструктивного елемента, механічних характеристик конструкційного матеріалу; відомостей про діючі навантаження та умови закріплення окремих точок досліджуваного елемента.

Для моделювання поведінки конструкції рівняння стану можна записати у вигляді:

$$C(x) \cdot F = U, \quad (1)$$

де $C(x)$ – глобальна матриця жорсткості кінцевих елементів конструкції; F – вектор розмірності n перемінних стану; U – вектор приведених навантажень у вузлах кінцево-елементної моделі.

Обмеження можуть бути представлені наступним чином:

$$\begin{cases} \xi_i(x, F) = \frac{[g_i]}{g_i \cdot (x, F)} - 1 \geq 0, \quad i = 1, j_1 \\ a_i < x_i < b_i, \quad i = 1, j_2 \end{cases} \quad (2)$$

де $[g_i]$, $\xi_i(x, F)$ – відповідно нормативні і дійсні значення параметрів стану в i -му елементі конструкції підвісу (напруги, прогини, деформації); a_i , b_i – обмеження на значення параметрів вузла дослідження; j_1 , j_2 – обмеження на параметри стану та розміри об'єкту.

Порядок визначення напруженого стану за МКЕ передбачає створення комп'ютерної моделі дослідного зразка, встановлення попередніх граничних умов дослідження, побудову сітки на твердому тілі з

використанням МКЕ, послідовне дослідження пружних елементів підвіски при дії вертикального навантаження залежно від завантаженості вагона (розглянуто «порожній» та «вантажний» режим).

За дійсною методикою, при встановлених режимах навантаження, для типового та модернізованого комплекту ресорного підвищування візка вантажного вагона визначаються вихідні параметри – напруги, деформації, переміщення його елементів.

Під час проведення досліджень напружено-деформованого стану підвіски пружно-фрикційного пристрою типового комплекту ресорного підвищування візка вантажного вагона визначено, що при дії вертикального навантаження, яке відповідає «вантажному» режиму величина переміщень типового пружного комплекту становить $\Delta_{cm} = 43,99 \text{ мм}$, переміщення модернізованого пружного комплекту дорівнює $\Delta_m = 32,8 \text{ мм}$, переміщення модернізованого пружного комплекту зі «стандартним» клином дорівнюють $\Delta_{m+cm} = 36,4 \text{ мм}$.

Максимальне вертикальне навантаження згідно [4] та [8], що передається від верхньої надбудови вагона на ресорні комплекти візків визначено як:

$$P_{\text{верт. max}} = P_{cm} (1 + K_d), \quad (3)$$

де P_{cm} – статичне навантаження, що діє на пружні комплекти; K_d – коефіцієнт вертикальної динаміки, $K_d = 0,388$ [8].

Статичне навантаження розраховане, у відповідності до технічних характеристик піввагона моделі 12-7019, складає $P_{cm \text{ 12-7019}} = 85,66 \text{ т}$ у «вантажному» режимі, тоді вертикальне навантаження становить:

$$P_{\text{верт. max}}^{\text{вант}} = 85,66 \cdot (1 + 0,388) = 118,9 \text{ т.}$$

Вертикальне навантаження, що діє на один комплект, визначено за формулою:

$$P_{\text{верт. max 1}}^{\text{вант}} = \frac{P_{\text{верт. max}}^{\text{вант}}}{k}, \quad (4)$$

де k – кількість пружинних комплектів вантажного піввагона.

$$P_{\text{верт. max 1}}^{\text{вант}} = \frac{118,9}{28} = 4,246 \text{ т.}$$

Для «порожнього» режиму вертикальне навантаження, що передається на один комплект, становить $P_{\text{верт. max 1}}^{\text{порож}} = 0,8464 \text{ т}$. У цьому режимі величина переміщень типового пружного комплекту становить $\Delta_{cm} = 8,77 \text{ мм}$, переміщення модернізованого пружного комплекту дорівнює $\Delta_m = 6,55 \text{ мм}$,

переміщення модернізованого пружного комплекту зі «стандартним» клином дорівнює $\Delta_{m+cm} = 7,28 \text{ мм}$.

Еквівалентні напруги, що виникають у комплекті пружної підвіски приведені в табл.1.

Таблиця 1

Еквівалентні напруги

Типовий комплект, МПа	Модернізований комплект, МПа	Модернізований зі стандартним клином, МПа	Допустимі напруги σ_m , МПа
Порожній режим			750
81,2	58,7	60,1	
Вантажний режим			
572,5	504,1	510,3	

Умовою розрахунку пружних характеристик об'єкту дослідження є наявність вихідних даних технічних характеристик витих циліндричних пружин модернізованої підвіски та тарілчастої пружини, зведених до табл. 2, 3.

Таблиця 2

Технічні характеристики циліндричних пружин

Параметр, розмірність	Внутрішня пружина	Зовнішня пружина
Висота, мм	249 $\frac{\pm 7}{-2}$	190,1
Середній діаметр пружини D , мм	111	170
Діаметр прутка d , мм	21	30
Кількість повних витків n , од.	7,95	4,5
Марка сталі	60С2	60С2
Модуль зсуву E , МПа	$8 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^4$

Таблиця 3

Характеристики тарілчастої пружини

Параметр, розмірність	Величина
Модуль пружності E , МПа	$2,06 \cdot 10^5$
Коефіцієнт Пуассона μ	0,3
Зовнішній діаметр пружини D_1 , мм	220
Внутрішній діаметр пружини D_2 , мм	140
Розрахунковий коефіцієнт A	1,57
Розрахунковий коефіцієнт Y	0,563
Ширина опорної поверхні (площини) b , мм	1,2
Максимальна ширина опорної поверхні (площини) b_{max} , мм	2,4
Максимально допустима деформація пружини S , мм	6,0
Максимально деформація пружини S_3 , мм	7,5
Товщина пружини t , мм	9,0

Жорсткість складових комплекту визначено відповідно до [12] і становить для зовнішньої пружини типової конструкції підвіски $C_1 = 300 \frac{H}{мм}$, модернізованої – $C_1 = 366,35 \frac{H}{мм}$.

$$C_1 = 366,35 \frac{H}{мм}$$

Розрахована жорсткість тарілчастої пружини [7] відповідає значенню $C_{тарел.} = 5084,5 \frac{H}{мм}$.

Загальну жорсткість трьох послідовно з'єднаних тарілчастих пружин визначено за формулою:

$$\frac{1}{C_{тарел.}} = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{C_{тарел.i}}, \quad (5)$$

У результаті розрахунку, маємо

$$C_{тарел.3} = 1694,83 \frac{H}{мм}$$

Тоді для випадку з'єднання зовнішньої вкороченої витой циліндричної пружини з пакетом тарілчастих пружин жорсткість складе:

$$C_{III} = \frac{C_1 \cdot C_{тарел.3}}{C_1 + C_{тарел.3}}, \quad (6)$$

$$C_{III} = \frac{366,35 \cdot 1694,83}{366,35 + 1694,83} = 301,3 \frac{H}{мм}$$

Для визначення розподілу навантажень на окремі одиниці пружного комплекту запропоновано метод, за яким зв'язок зусиль між складовими визначається за рахунок введення коефіцієнту перерозподілу зусиль. Його розрахунок здійснюється шляхом вирішення системи рівнянь (6):

$$\begin{cases} F = k \cdot F_1 + F_2 \\ F = k \cdot C_{III} \cdot S_1 + C_2 \cdot S_2 \end{cases}, \quad (7)$$

де F_2 – зусилля, що передається на внутрішню пружину, Н; C_2 – жорсткість внутрішньої пружини ресорного комплекту, Н/мм; S_2 – прогин пружини під зовнішнім навантаженням, мм.

Енергія, яка поглинається фрикційним гасителем коливань під дією вертикального навантаження дорівнює площі петлі гістерезису. Аналітично поглинання енергії може бути представлено наступним чином [12]:

$$S_{погл.енергії} = \int_a^b (f_1(x) - f_2(x)) dx, \quad (8)$$

Відповідно до проведеного розрахунку площа трикутника визначає величину поглинутої енергії

від дії статичного навантаження вагона при гранично завантаженому стані ($F = 42460$ Н) для різних типів комплектів підвішування.

Тоді за формулою (7) отримаємо величину поглинання енергії:

– для стандартного (типового) комплекту:

$$\int_0^{44} \frac{7874}{44} x dx = \frac{7874}{44} \frac{x^2}{2} \Big|_0^{44} dx = \frac{7874}{44} \cdot \frac{44^2}{2} - \frac{7874}{44} \cdot \frac{0^2}{2} = 173228 H \cdot мм$$

$$\int_0^{44} \frac{34586}{44} x dx = \frac{34586}{44} \frac{x^2}{2} \Big|_0^{44} dx = \frac{34586}{44} \cdot \frac{44^2}{2} - \frac{34586}{44} \cdot \frac{0^2}{2} = 760892 H \cdot мм$$

Отже

$$S_{погл.енергії} = 760892 - 173228 = 587664 H \cdot мм = 587,664 H \cdot м \approx 588 Дж$$

– для модернізованого комплекту:

$$\int_0^{33} \frac{5870}{33} x dx = \frac{5870}{33} \frac{x^2}{2} \Big|_0^{33} dx = \frac{5870}{33} \cdot \frac{33^2}{2} - \frac{5870}{33} \cdot \frac{0^2}{2} = 96855 H \cdot мм$$

$$\int_0^{33} \frac{36590}{33} x dx = \frac{36590}{33} \frac{x^2}{2} \Big|_0^{33} dx = \frac{36590}{33} \cdot \frac{33^2}{2} - \frac{36590}{33} \cdot \frac{0^2}{2} = 603735 H \cdot мм$$

Тому

$$S_{погл.енергії} = 603735 - 96855 = 506880 H \cdot мм = 506,880 H \cdot м \approx 507 Дж$$

– для модернізованого комплекту зі стандартним клином:

$$\int_0^{37} \frac{6518}{37} x dx = \frac{6518}{37} \frac{x^2}{2} \Big|_0^{37} dx = \frac{6518}{37} \cdot \frac{37^2}{2} - \frac{6518}{37} \cdot \frac{0^2}{2} = 120583 H \cdot мм$$

$$\int_0^{37} \frac{35942}{37} x dx = \frac{35942}{37} \frac{x^2}{2} \Big|_0^{37} dx = \frac{35942}{37} \cdot \frac{37^2}{2} - \frac{35942}{37} \cdot \frac{0^2}{2} = 664927 H \cdot мм$$

Тоді

$$S_{погл.енергії} = 664927 - 120583 = 544344 H \cdot мм = 544,344 H \cdot м \approx 545 Дж$$

Для дослідження динамічної поведінки вагона з урахуванням конструктивних змін ресорного комплекту в програмному комплексі «Universal Mechanism» [18] з використанням методу підсистем розроблено комп'ютерну модель динаміки вагона, аналогом якого є піввагон моделі 12-7019.

Для оцінки показників динаміки вантажного вагона в розробленій моделі сформовано групи вихідних величин:

– коефіцієнти запасу стійкості $k_{ст}$ від сходу з рейок;

– рамні сили, що діють від рами візка на колісну пару;

– коефіцієнти вертикальної динаміки;

– горизонтальні поперечні та вертикальні прискорення кузова і рам візків;

– бокові та вертикальні сили, що діють від коліс на рейки.

Оцінку впливу конструктивних змін ресорного комплексу на динамічні показники вантажного вагону проведено при швидкостях руху в діапазоні від 10 до 200 км/год з кроком 10 км/год. Моделювання виконано при незношених профілях коліс та задовільному стані колії в «порожньому» режимі, як найбільш несприятливому.

Аналіз динамічних показників виконано за їх статистичними оцінками, обчисленими для кожної реалізації, залежно від прийнятого режиму руху. Для кожного розрахункового дослідження визначалися екстремальні значення вихідних величин. Отримані результати дослідження показників динаміки вантажного піввагону засобами комп'ютерного моделювання приведено на рис. 2. На рис. 2, а показано мінімальні значення коефіцієнта запасу стійкості проти сходу з рейок, де зелений колір – до модернізації, червоний колір – після модернізації.

На рис. 2, б показано максимальні значення коефіцієнтів вертикальної динаміки першого ступеня підвішування візка вагону, де чорний колір – до модернізації, червоний колір – після модернізації. На рис. 2, в показано максимальні значення вертикальних прискорень кузова, де синій колір – до модернізації, червоний колір – після модернізації. На рис. 2, г показано максимальні значення горизонтальних прискорень кузова, де зелений колір – поперечні прискорення, чорний колір – повздовжні прискорення; позначення X – до модернізації, позначення 0 – після модернізації.

Небезпечний мінімальний рівень запасу стійкості колісних пар проти сходу з рейок при русі вантажного піввагону в «порожньому» стані становить 1,24 за умови швидкості руху вагону $v = 110$ км/год (відповідно до [9] $k_{ст} > 1,3$).

Отримані значення коефіцієнтів вертикальної динаміки першого ступеня підвішування візка «порожнього» піввагона свідчать про перевищення гранично допустимої межі при швидкості руху $v = 110$ км/год (згідно [9] $k_{дв1} < 0,8$) і знаходяться в діапазоні від 0,82 до 1,04.

Максимальні значення вертикальних прискорень кузова вагону знаходяться в межах нормативних значень до $v = 110$ км/год (за вимогами [9] $a_z = 0,7g$), горизонтальних повздовжніх прискорень кузова в розрахунковому інтервалі швидкостей до $v = 130$ км/год включно, а горизонтальних поперечних прискорень – до $v = 90$ км/год (за вимогами [9] $a_z = 0,3g$).

Висновки. 1. За результатами проведених досліджень встановлено, що запропонована конструктивна зміна елементів ресорного підвішування візка вантажного вагону призводить до зменшення напруг, що виникають у пружно-фрикційному пристрої під дією зовнішніх навантажень, приблизно на 28% у «порожньому» режимі, та практично на 12% у «вантажному», та підвищити довговічність порівняно з існуючою конструкцією.

2. Запропонований метод перерозподілу навантажень для пружних елементів ресорного підвішу-

вання дозволяє визначати зусилля, що діють на його окремі складові. При цьому введений коефіцієнт перерозподілу зусиль, який має змінний характер, надає можливість встановлювати пропорційність зміни зусиль між елементами, залежно від діючого навантаження.

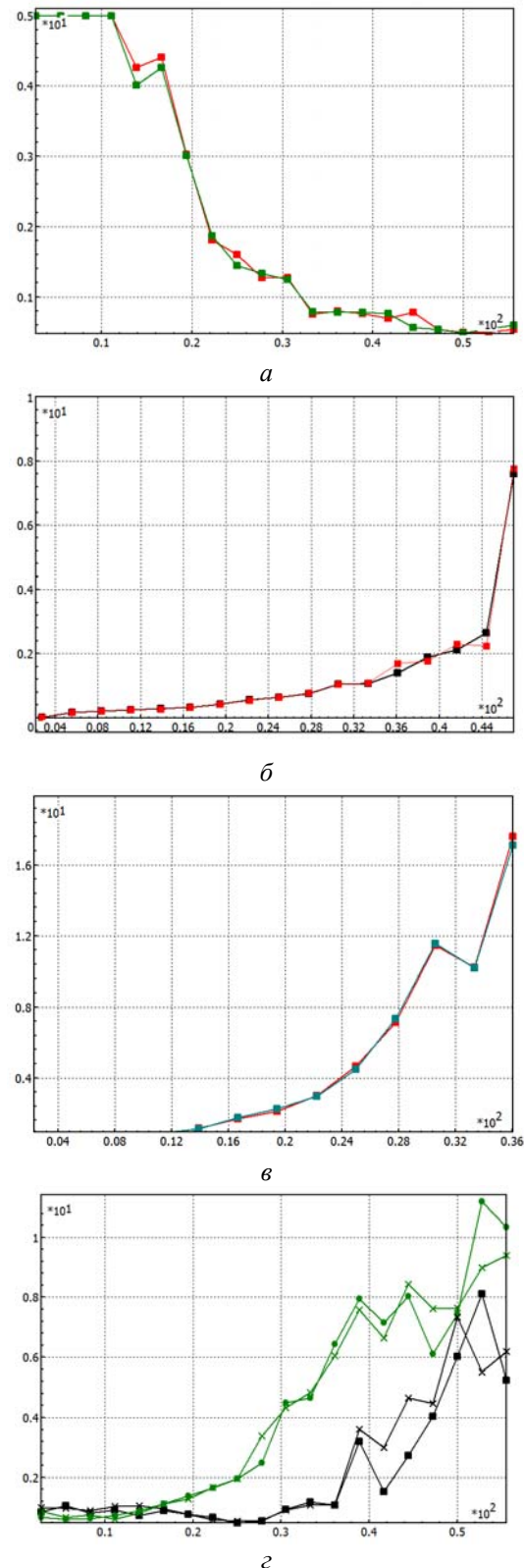


Рис. 2. Показники динаміки вантажного піввагону

3. Відповідно до результатів дослідження динаміки вантажного піввагона у «порожньому» режимі руху засобами комп'ютерного моделювання, при порівнянні характеристик «типової» та удосконаленої конструкції систем ресорного підвішування встановлено, що проведені конструктивні зміни забезпечують стабільний рівень динамічних показників у межах допустимих нормативних значень до швидкості $v = 110$ км/год.

4. Знайдене конструктивне удосконалення фрикційного гасителя коливань візка вантажного вагону зі зниженою концентрацією напруг, дозволяє покращити передачу навантажень, виникаючих у ресорному підвішуванні, підвищити динамічні характеристики візка, довговічність вузла гасіння коливань та збільшити міжремонтний термін експлуатації.

Література

1. Бороненко Ю.П., Орлова А.М. Опыт проектирования трехэлементных тележек // Железнодорожный транспорт. 2006. №5. С. 58 – 62.
2. Борщ Б.В. Повышение долговечности фрикционного клинового гасителя колебаний тележек грузовых вагонов: Дис. к-та техн. наук: 05.02.01 / Борщ Борис Васильевич. М.: ВНИИЖТ, 2009. 153 с.
3. Новая тележка для грузовых вагонов // Бубнов В.М., Бороненко Ю.П., Орлова А.М., Рудакова Железные дороги мира. 2005. №7. С. 45 – 48.
4. Вершинский С.В. Динамика вагона. М.: Транспорт, 1991. 360 с.
5. Габец А.В., Гавриков Д.В. Совершенствование конструкции подклиновой пружины узла гашения колебаний тележки грузового вагона средствами 3D-моделирования // Инженерный вестник Дона. 2015. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2015/3450
6. ГОСТ 3057 – 90. Пружины тарельчатые. Общие технические условия / Межгосударственный стандарт. – Утв. и введен в действие пост. № 2266 от 25.07.90. – Взамен ГОСТ 3057 - 79. М.: (Изд-во стандартов, 1990). Переиздан ИПК Изд-во стандартов, 2003. 37 с.
7. Игембаев Н.К. Перспективные направления по улучшению динамических качеств длиннобазных грузовых вагонов // Хабаршысы Вестник. 2011. №3 (70). С. 5 – 11.
8. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М.: Гос. НИИВ-ВНИИЖТ, 1996. 319 с.
9. Нормы допускаемых скоростей движения подвижного состава по железнодорожным путям колеи 1520 (1524) мм федерального железнодорожного транспорта // Приказ МПС России № 41 от 12 ноября 2001 г. М.: Транспорт, 2001. 127 с.
10. Орлова А.М. Влияние конструктивных схем и параметров тележек на устойчивость, ходовые качества и нагруженность грузовых вагонов: Автореферат дис. д-ра техн. наук: 05.22.07 / Орлова Анна Михайловна. С.-П. ФГБОУ ВО ПГУПС, 2008. 34 с.
11. Шадур Л.А. Вагоны. Учебник для вузов жд. тр-та. М.: Транспорт, 1980. 439 с.
12. Шнейдер В.Е. Краткий курс высшей математики. Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. школа, 1972. 640 с.

13. Blokhin Y.P., Pshin'ko O.M., Myamlin S.V. Optimization of parameters of spring suspension of the freight car three-piece bogies // Proc. Of the 5-th Int'l. Conf. on Railway Bogies and Running Gears. Budapest: BUTE, 2001. P. 84 – 86.
14. Boronenko Yu., Orlova A., Rudakova E. Influence of construction schemes and parameters of three-piece freight bogies on wagon stability, ride and curving qualities // Vehicle System Dynamics. 2006. 44. P. 402 – 414.
15. Mogila V., Potapenko O. Analysis and Study of the Problems Arising in Movable Joints of Freight Car Bogies // TEKA Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. 2016. 16, No.2. P. 27 – 32.
16. Mogila V., Nozhenko V., Kireev A. The detection of discontinuity flaws of metal in power brackets heels of locomotive servicing by ultrasonic echo method on shallow depths // TEKA Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture. 2010. V, No.XB. P. 43 – 48.
17. Paul Kurowski. Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation. 2016. 500 p.
18. Pogorelov D.Yu. Simulation of Rail Vehicle Dynamics with Universal Mechanism Software // Rail vehicle dynamics and associated problems. Gliwice: Silesian University of Technology, 2005. P. 13 - 58.
19. Varacuta E. Reliability parameters of railways rolling – stock functioning researching during its exploitation // TEKA Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture. 2010. V, No.XD. P. 25 – 30.
20. Wickens A.H. Steering and stability of the bogie: vehicle dynamics and suspension design // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. – Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 1991. №205. P. 109 – 122.
21. Olga Potapenko, Nikolay Gorbunov, Valentin Mogyla, Yuriy Scherbina, Vladimir Hauser. Function Evaluation of Common and Proposed Friction Shock Absorbers for Open Box Wagon 12-7019 KRVZ. Manufacturing Technology. Usti and Laben, Czech Republic. 2019, Vol 19, № .. P.303 – 307.

References

1. Boronenko YP, Orlova AM Experience in designing three-element carts // Railway transport. 2006. №5. P. 58 - 62.
2. Borsch BV Increase of durability of a frictional wedge damper of fluctuations of carts of freight cars: Dis. to-that tech. Sciences: 05.02.01 / Borsch Boris Vasilyevich. - M. - VNIIZHT, 2009. - 153 с.
3. A new cart for freight cars // Bubnov VM, Boronenko YP, Orlova AM, Rudakova EA Railways of the world. 2005 №7. P. 45 - 48.
4. Verzhinsky SV Car dynamics. - M.: Transport, 1991. 360 с.
5. Gabets AV, Gavrikov DV Improving the design of the wedge spring of the vibration damping unit of the freight car cart by means of 3D modeling // Engineering Bulletin of Don. 2015 - №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2015/3450
6. GOST 3057 - 90. Disc springs. General technical conditions / Interstate standard. - Approved. and put into effect the post. № 2266 dated 25.07.90. - Instead of GOST 3057 - 79. - M.: (Publishing House of Standards, 1990). Reprinted by IPK Standards Publishing House, 2003. 37 p.
7. Igembaev NK Perspective directions on improvement of dynamic qualities of long-base freight cars // Khabarshysy Vestnik. - 2011. №3 (70). P. 5 - 11.
8. Norms for calculation and design of railway cars of the Ministry of Railways of 1520 mm gauge (non-self-propelled). M.: Gos. NIIV-VNIIZHT, 1996. 319 p.

9. Standards of permissible speeds of rolling stock on the railway tracks of 1520 (1524) mm of federal railway transport // Order of the Ministry of Transport and Communications of Russia № 41 of November 12, 2001 Moscow: Transport, 2001. 127 p.
10. Orlova AM Influence of constructive schemes and parameters of carts on stability, running qualities and loading of freight cars: the Author's abstract dis. Dr. Tech. Sciences: 05.22.07 / Orlova Anna Mikhailovna. С.-П. FGBOU VO PGUPS, 2008. 34 p.
11. Shadur L.A. Wagons. Textbook for universities of railways tr-ta. М.: Транспорт, 1980. 439 с.
12. Schneider V.E. A short course in higher mathematics. Textbook. manual for universities. М.: Higher. school, 1972. 640 p.
13. Blokhin YR, Pshin'ko OM, Myamlin S.V. Optimization of parameters of spring suspension of the freight car three-piece bogies // Proc. Of the 5th Int'l. Conf. on Railway Bogies and Running Gears. Budapest: BUTE, 2001. P. 84 - 86.
14. Boronenko Yu., Orlova A., Rudakova E. Influence of construction schemes and parameters of three-piece freight bogies on wagon stability, ride and curving qualities // Vehicle System Dynamics. 2006. 44. P. 402 - 414.
15. Mogila V., Potapenko O. Analysis and Study of the Problems Arising in Movable Joints of Freight Car Bogies // TEKA Commission of Motorization and Energy in Agriculture. 2016. 16, No.2. P. 27 - 32.
16. Mogila V., Nozhenko V., Kireev A. The detection of discontinuity flaws of metal in power brackets heels of locomotive servicing by ultrasonic echo method on shallow depths // TEKA Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture. 2010. V, No.XV. P. 43 - 48.
17. Paul Kurowski. Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation. 2016. 500 p.
18. Pogorelov D.Yu. Simulation of Rail Vehicle Dynamics with Universal Mechanism Software // Rail vehicle dynamics and associated problems. Gliwice: Silesian University of Technology, 2005. P. 13 - 58.
19. Varacuta E. Reliability parameters of railways rolling - stock functioning researching during its exploitation // TEKA Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture. 2010. V, No.XD. P. 25 - 30.
20. Wickens A.H. Steering and stability of the bogie: vehicle dynamics and suspension design // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. - Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 1991. №205. P. 109 - 122.
21. Olga Potapenko, Nikolay Gorbunov, Valentin Mogyla, Yuriy Scherbina, Vladimir Hauser. Function Evaluation of Common and Proposed Friction Shock Absorbers for Open Box Wagon 12-7019 KRVZ. Manufacturing Technology. Usti and Laben, Czech Republic. 2019, Vol 19, P.303 - 307.

Могіла В.І., Потапенко О.А., Кортєва Е.В. ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ Усовершенствованных фрикционных аппаратов грузового полувагона

Впервые определены, проанализированы и представлены результаты исследований напряженно-деформированного состояния элементов фрикционного аппарата тележки грузового полувагона модели 12-7019 КрВЗ и усовершенствованных конструкций под действием статической нагрузки средствами компьютерного моделирования, а именно: эюра перемещений; график изменения прогиба комплекта пружин от действия вертикальных нагрузок; эквивалентные напряжения комплекта пружинной подвески; диаграмма пропорциональ-

ного распределения нагрузок; график поглощения энергии гасителя колебаний; результаты влияния конструкций рессорного комплекта на динамическое поведение грузового полувагона при скоростях движения в диапазоне от 10 до 200 км/ч. Подтверждена целесообразность использования усовершенствованных конструкций гасителя колебаний. Согласно результатам исследования динамики грузового полувагона в «пустом» режиме движения средствами компьютерного моделирования, при сравнении характеристик «типового» и усовершенствованной конструкции систем рессорного подвешивания установлено, что проведенные конструктивные изменения обеспечивают стабильный уровень динамических показателей в пределах допустимых нормативных значений до скорости $v = 110$ км / ч. Найдено конструктивное усовершенствование фрикционного гасителя колебаний тележки грузового вагона с пониженной концентрацией напряжений, позволяет улучшить передачу нагрузок, возникающих в рессорного подвешивания, повысить динамические характеристики тележки, долговечность узла гашения колебаний и увеличить межремонтный срок эксплуатации.

Ключевые слова: клиновой гаситель колебаний, усовершенствованная конструкция, тарельчатая пружина, прогиб, жесткость, напряжение, энергия поглощения, динамические показатели.

Mogila V.I., Potapenko O.O., Korteve O.V. Increase durability improved frictional devices of the freight gondola car

The article is devoted to the study of the operation of the advanced and serial friction damper of the freight gondola cart and presents the results obtained by means of computer modeling. The relevance of the study is beyond doubt, as the organization of high-speed transportation depends on the technical characteristics of the rolling stock and is largely determined by the design schemes and parameters of the running gear of the wagon Results of researches of the intense deformed condition of elements of the frictional device of the cart of the freight gondola car of the KRVZ model 12-7019 and advanced designs under the influence of static loading are for the first time defined, analyzed and presented by means of computer modeling, namely: epyura of movements; the schedule of change of a deflection of a set of springs from action of vertical loadings; equivalent tension of a set of an elastic pendant; chart of proportional distribution of loadings; schedule of absorption of energy of quencher of fluctuations; results of influence of designs of a spring set on dynamic behavior of the freight gondola car at speeds of the movement in the range from 10 to 200 km/h. The expediency of using the improved design of the vibration damper has been confirmed. According to the results of the study of the dynamics of the freight gondola in the "empty" mode by computer simulation, comparing the characteristics of "typical" and improved design of spring suspension systems found that the design changes provide a stable level of dynamic performance within acceptable values up to speed $v = 110$ km / year. The expediency of using the improved design of the vibration damper has been confirmed. The found constructive improvement of the frictional damper of vibrations of the truck of the freight car with the lowered concentration of pressures allows to improve transfer of the loadings arising in a spring suspension, to increase dynamic characteristics of the truck, durability of knot of damping of vibrations and to increase service life. The sources cited in this article reflect the current point of view on the problem under study, the essence of which is the need to improve the design of freight cars, especially with increased axle load, im-

prove their dynamic properties, damping and vibration damping systems.

Key words: *wedge quencher of fluctuations, improved design, belleville springs, deflection, rigidity, tension, energy of absorption, dynamic indicators.*

Могіла Валентин Іванович – к.т.н., проф., професор кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк), vimogilal@ukr.net

Потапенко Ольга Олександрівна – к.т.н., доцент, доцент кафедри вагони та вагонне господарство, Державний університет інфраструктури та технологій (м. Київ), potapenkoolga@gmail.com

Кортєва Олена Вікторівна – асистентка кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк), elenakorteva@gmail.com

Стаття подана 15.02.2021 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-83-89>

УДК 621.929 (678.053.3+66.05)

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗУСИЛЬ ЩО ДІЮТЬ НА РОБОЧИ ЕЛЕМЕНТИ ЗМІШУВАЧІВ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

Модестов В.Б.

RESEARCH ON LOAD THAT ACTS ON THE WORKING ELEMENTS OF BULK MATERIAL MIXERS

Modestov V.B.

В статті досліджено залежність опору руху робочих елементів змішувачів сипких матеріалів з горизонтальним циліндричним корпусом від геометричних розмірів корпусу та конфігурації елементів що змішують, частоти обертання ротора, коефіцієнта заповнення корпусу, фізико-механічних властивостей матеріалу що змішується. Перевірена експериментально математична модель для розрахунку опору руху робочих елементів з застосуванням методу динамічного тензометрування. Пропоновані рекомендації що до конструкції та режимів експлуатації змішувачів з горизонтальним циліндричним корпусом.

Ключові слова: змішувачі сипких матеріалів, горизонтальний корпус, плужні, стрічкові, динамічне тензометрування, потужність.

Вступ. Провідною організацією по тематиці «змішувачі для сипучих і пастоподібних матеріалів» в Міністерстві хімічного машинобудування був Северодонецький НДІХІММАШ.

Відділ змішувального обладнання, в якому робив автор, виконував дослідження і розробку змішувачів, погодження проектів з заводами - виробниками, впровадженням дослідних зразків у виробництво і вирішенням технічних проблем, що виникають при їх експлуатації, обстеженні вітчизняних та імпортованих змішувачів на діючих виробництвах, літературне дослідження з питань змішування сипких і пастоподібних матеріалів, проведення патентних досліджень в даній області.

Однією з поширених конструкцій є плужні змішувачі.

Дослідники змішувачів призводять емпіричні формули, розроблені на підставі експериментальних даних вимірювання потужності, споживаної електродвигуном приводу [1]. У даній роботі проведено вивчення навантажень на окремий робочий орган (плуг) під час його руху в сипучому матеріалі.

Це стало можливим завдяки застосуванню методу динамічного тензометрування. Отримані результати дозволили перевірити теоретичні формули для розрахунку навантажень на окремі робочі елементи і витрати енергії, виведені аналітично автором [2].

Виникла ідея уніфікації цих змішувачів, яка поки не реалізована [3].

Результати теоретичних і експериментальних робіт, досвід експлуатації змішувачів, показали, що при проектуванні змішувачів сипких матеріалів, крім підбору потужності приводу, необхідно враховувати пусковий момент, що діє на ротор. Обслідування на виробництві показали, що адже провідні світові виробники змішувачів мають проблеми від неврахування цього фактору.

Експерименти підтвердили, що характер навантажень при змішуванні сипучих матеріалів дуже сильно залежить від їх дисперсності, на що багато дослідників просто не звертають увагу.

Мета статті. Розробка рекомендацій щодо проектування змішувачів з горизонтальним корпусом.

Завдання дослідження. При проектуванні змішувачів, як правило, підлягають вивченню такі питання:

1. Ефективність процесу змішування.

2. Енергетичні витрати.

3. Умови запуску змішувача в роботу.

4. Зручність обслуговування: завантаження, вивантаження, очищення.

5. Дотримання заходів безпеки.

6. Номенклатура типорозмірного ряду.

7. Стандартизація та уніфікація.

У даній роботі розглядаються друге і третє питання.

Основна частина.

Методика определения момента сопротивления и мощности на перемешивание

Зазвичай, потужність що споживається на перемішування визначається як різниця потужності, що замірено ватметром під навантаженням N_u і потужністю холостого хода N_{xx} на тих же обертах

$$N = N_u - N_{xx} \quad (1)$$

Перевагою цього методу вимірювання потужності є простота його здійснення. Однак його точність невисока, так як в виміряну потужність, входять втрати на тертя в приводі, в сальниках, на нагрівання обмоток двигуна, гістерезис і вихрові струми.

Формула (1) передбачає, що всі ці втрати не залежать від навантаження на привід і приймаються постійними для даної швидкості обертання робочих органів. Крім того, неможливо вимір пускового моменту і пусковий потужності, так як привід і електричні прилади мають інерцію.

Недоліком є також зниження точності вимірювання при роботі двигуна на верхньої і нижньої межі обертів.

Нижче розглянутий метод динамічного тензометрування крутного моменту заснований на визначенні моменту опору руху одного з робочих органів (плужка) [2, 4]. Метод дозволяє зняти осцилограму крутного моменту. По відтарірованій осцилограмі можна визначити роботу одного плужка за оборот. Потужність, споживана змішувачем, визначиться як множення роботи одного плужка за оберт на швидкість обертання ротора (об/с) та на кількість плужків.

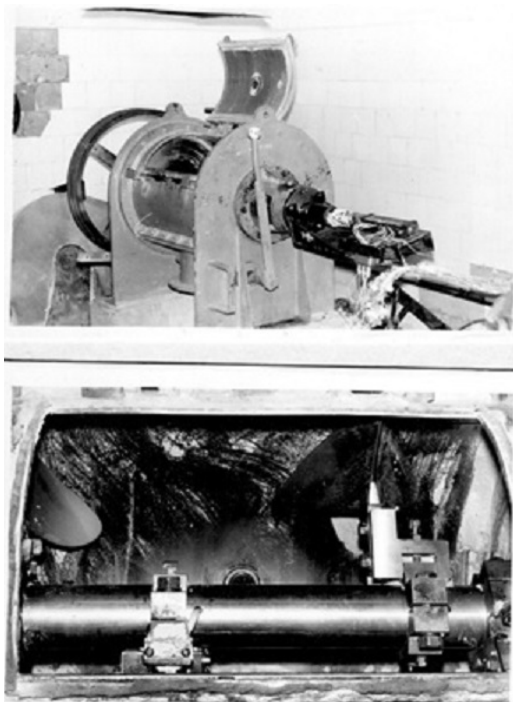


Рис. 1. Плужний змішувач Пж-130

Переваги динамічного виміру крутного моменту по зрівнянню с електричним методом:

1. На точність вимірювань не впливають втрати в приводі і ущільненнях змішувача.

2. Виявляється не тільки усереднена величина споживаної потужності, але і характер навантаження на привід і кожен плуг як під час пуску змішувача, так і після виходу його на робочий режим.

До недоліків методу слід віднести більшу трудомісткість і значні матеріальні витрати на його здійснення.

Система динамічного вимірювання опору руху робочого органу показана на рис.2. Вузол динамічного тензометрування укріплений на валу змішувача, струмознімач змонтований на спеціальній стойці, а його ротор з'єднаний з валом змішувача.

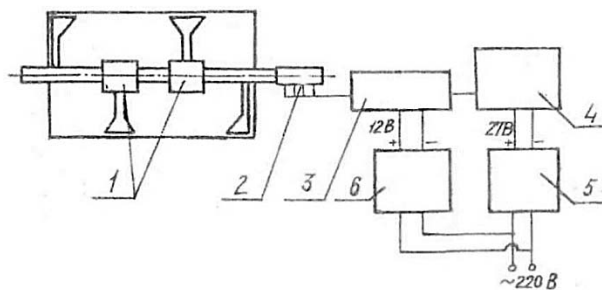


Рис. 2. Система динамічного вимірювання опору руху робочого органу: 1 - вузли динамічного тензометрування, 2 - струмоз'ємник, 3 - підсилювач, 4 - осцилограф світлопроменевий, блоки живлення: 5 - для осцилографа, 6 - для підсилювача

Вузол динамічного тензометрування зображено на рис. 3.

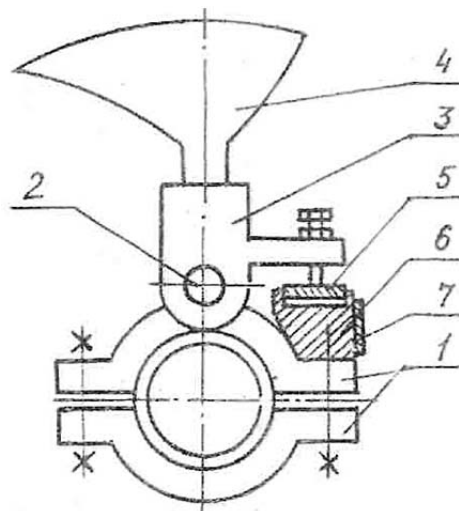


Рис. 3. Вузол динамічного тензометрування

Він складається з хомутів 1, які стягуються на валу змішувача двома болтами. Хомути утримуються від провертання силами тертя, без будь-яких стопорів, тому їх можна встановити в будь-якому місці по довжині вала. На хомуті шарнірно установлений

на осі 2 важіль 3. На важелі укріпленний плужок 4. Важіль тисне в центр пластинки 5, що спирається з двох сторін на краю виїмки, зробленої в опорному бруску 6. При зануренні в сипкий матеріал робочий орган відчуває опір. Зі збільшенням моменту, що діє на важіль з боку робочого органу, збільшується прогин пластинки 5, Товщина її підібрана таким чином, що деформація знаходиться в межах пружності. На нижній поверхні пластинки паралельно наклеєні три тензорезистора 2ПКБ-10-100ГВ. Провід від цих тензорезисторів через порожнистий вал з'єднані з струмознімачем. Простір між пластиною 5 і бруском 6 ущільнено поролоном. Шарнірна конструкція вузла тензометрування дозволяє виробляти більш точне вимірювання крутного моменту в порівнянні з застосовуваним зазвичай способом наклеювання датчиків на стійку. Складові від осьових і радіальних сил, які не впливають на момент опору ротора, в такому разі не враховуються. Наявність трьох тензодатчиків наклеєних на пластину 5, які реєструють одну і ту ж величину, підвищує надійність вимірювань. На брусок 6 кріпиться пластина 7, котра не піддається механічним навантаженням, з наклеєними на неї компенсаційними тензорезисторами. Струмознімач є ротор з бронзовими кільцями, що обертається разом з валом. З'їм струму здійснюється за допомогою сталевих контактів, що стикаються з кільцями.

На рис. 4 показана принципова схема з'єднання однієї з шести ланцюгів тензорезисторів.

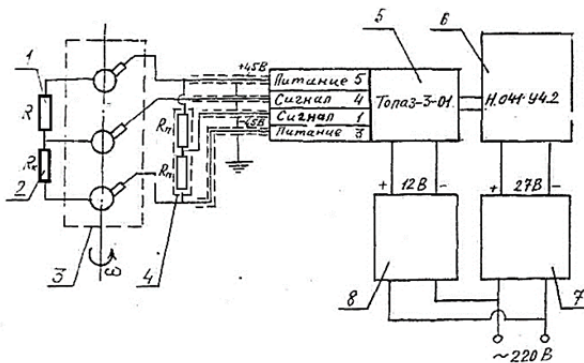


Рис. 4. Принципова схема з'єднання тензорезисторів

У схему входять:

- 1, 2 - резистори опору, відповідно робочий і компенсаційний;
- 3 - контакти на струмознімачах;
- 4 - перехідник НП 12 С-І;
- 5 - підсилювач "Топаз-3-01";
- 6 - світлопроменевий осцилограф Н.041.У4.2;
- 7 - блок живлення підсилювача, 12 В;
- 8 - блок живлення осцилографа, 27 В.

У процесі досліджень змінювалися: коефіцієнт заповнення корпусу, частота обертання ротора, матеріали що змішуються, при цьому фіксувалися на осцилограму навантаження, що діють на плужок.

Для вимірювання опору використаний метод безпосереднього відліку. Робочий 1 і компенсацій-

ний 2 опіри утворюють напівміст. Разом з опірами перехідника 4 вони створюють повний міст, одне з плечей якого живиться від підсилювача 5 постійною напругою 4,5 В. При деформації робочого опору 1 відбувається розбаланс моста і в іншому його плечі з'являється сигнал. Цей сигнал передається по екранованим проводам на підсилювач 5 і потім на шлейфовий осцилограф 6, де фіксується на фотопері. Тарування системи проводилося за допомогою спеціального важеля, встановленого на місце робочого органу, і вантажів. Важіль, який ви бачите на рис. 5, навантажувався силою 100, 200, 250 Н. Сигнал що з'являється реєстрували на осцилографі і будували тарувальну шкалу, за якою визначався момент опору переміщенню одного робочого органу. Після проведення тарування робочий орган знову встановлювали на своє місце.

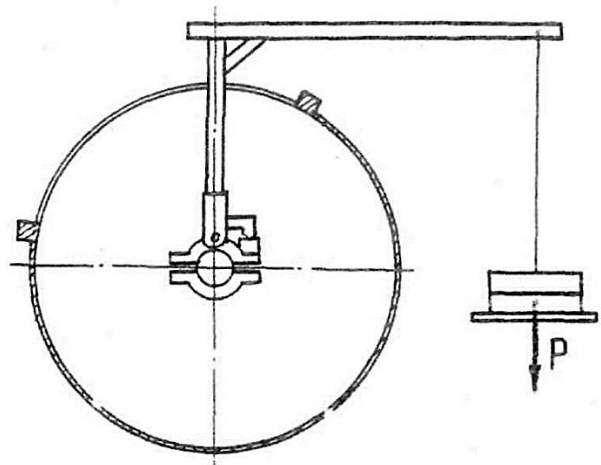


Рис. 5. Схема тарування вимірювальної системи

На рис. 6 наведено приклад осцилограми.

Робота, що здійснена одним плужком за оборот, визначалася графічно по осцилограмі. Вона чисельно дорівнює площі діаграми, що граничено кривий, яка описує момент опору за один цикл навантаження.

Робота одного плужка за оборот визначається за формулою

$$A_i = \frac{M_{max}}{2} \cdot f$$

Якщо врахувати, що

$$f = \frac{2 \cdot \pi \cdot l_y}{L_y}$$

де M_{max} – максимальне значення моменту опору руху плужка, Н·м; f - кут, на якому робочий орган відчуває опір, рад; l_y - еквівалентна куту f довжина на діаграмі, на якій робочий орган відчуває опір, м; L_y – довжина на діаграмі, еквівалентна одному оберту плужка, м,



Рис. 6. Осцилограма. Великодисперсний пісок, коефіцієнт заповнення корпусу -0,45, швидкість обертання ротора - 15,7 рад / с.

То

$$A_i = \frac{M_{\max} \cdot \pi \cdot l_{\text{ц}}}{L_{\text{ц}}} \quad (3)$$

Споживану змішувачем потужність можливо визначити з вираження

$$N = A_i \cdot \frac{Z_i}{2} \cdot \frac{\omega}{2 \cdot \pi}, \text{ Вт} \quad (4)$$

де Z_i – кількість робочих елементів в змішувачі (в ПЖ-130 їх 6 - по 2 у кожного з плужка, розташованих в корпусі і по одному біля торцевих стін); ω - кутова швидкість обертання ротора, рад/с.

Порівняємо потужність, визначену за формулою (1), з потужністю розрахованої за методом динамічного тензометрування (4), (рис. 8).

Метод динамічного тензометрування найбільш точний, так як він усуває більшість джерел помилок вимірювань. Найбільша відносна різниця результатів виходить при малих частотах обертання ротора, до 50%, але на високих частотах вона не перевищує 20%.

При виконанні вищезазначеної науково-дослідницької роботи виникла ідея конструкції ротора змішувача, яка дозволила б зменшити витрати енергії на змішування сипких матеріалів в змішувачах з горизонтальним корпусом (рис.9) [5].

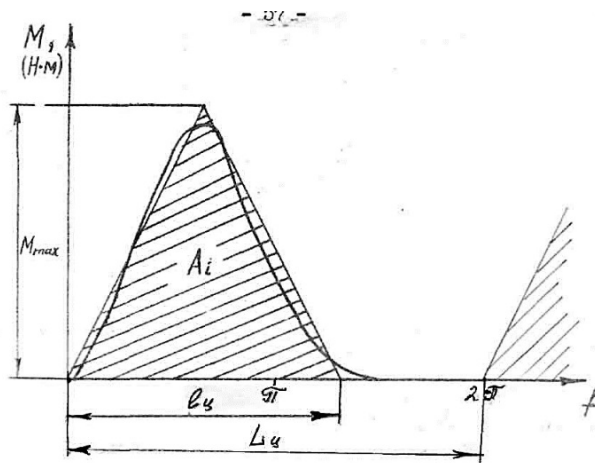


Рис. 7. Графічне визначення роботи, що здійснюється плужком за оберт

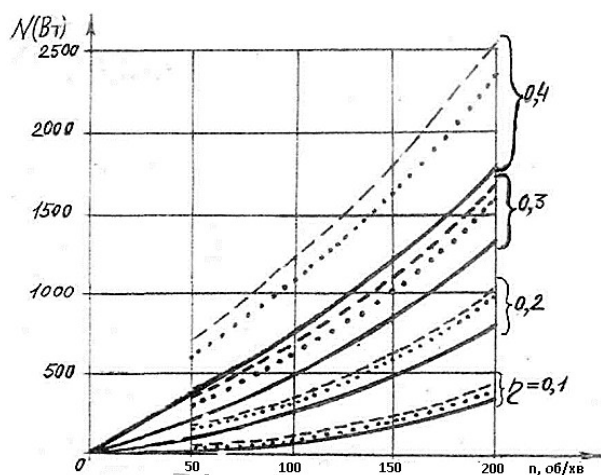


Рис. 8. Потужність на перемішування, що визначена: - - - - - електричним методом; з урахуванням теплових втрат в електродвигуні; ————— методом динамічного тензометрування

Змішувач містить горизонтальний циліндричний корпус 1, по осі якого розташований вал 2, на якому встановлені змішувальні елементи 4 що закріплені на штангах 3. Елементи 4 мають гостру передню кромку яка розміщена в одній площині зі штангою.

Змішувальні елементи 4 виконані в виді розміщених під кутом одна до одної пружних пластин, гостра передня кромка яких закріплена на штангах. На кінцях штанг закріплені скребки.

Змішувач робить наступним чином.

У процесі перемішування сипких матеріалів при обертанні кожна штанга 3 входить в матеріал. При цьому пластини 4 по мірі занурення відчувають все зростаючий тиск з боку матеріалу, в результаті чого вони через згин, зменшують лобовий опір, що призводить до зниження величини опору їх руху.

У міру наближення змішувальних елементів 4 до поверхні матеріалу знижується тиск на них, вони розпрямляються, збільшується кут атаки.

Таким чином, при входженні робочих елементів в сипкий матеріал має місце зменшення опору їх руху, а на виході, де опір низький, пластини розпрямляються і змінення інтенсифікується. Спостерігається згладжування навантаження на робочі органи і, отже, на привід змішувача.

Скребки 5 служать для очищення стінок і зменшення застійних зон в корпусі. Вони мають невеликий опір руху, а прямолінійна кромка дозволяє витримувати малий зазор між корпусом і ротором.

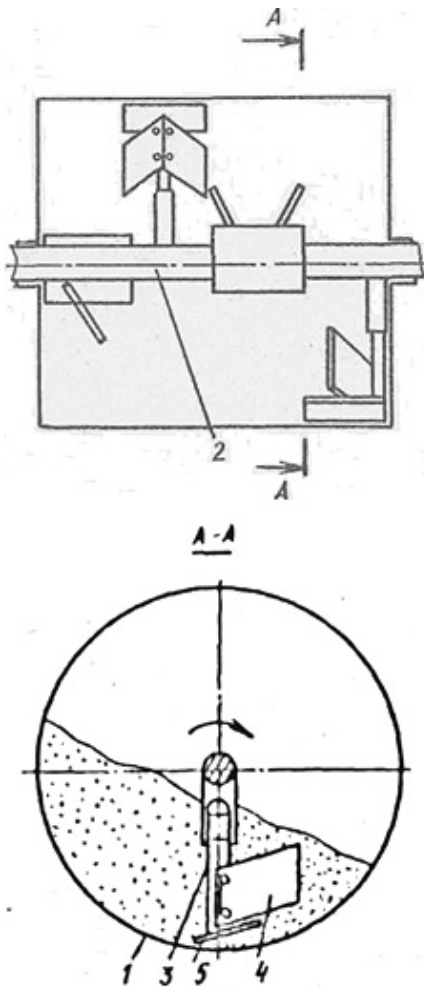


Рис. 9. Змішувач з гнучкими елементами

Була виготовлена та випробувана модель такого змішувача. Результати випробувань підтвердили істотне зниження витрати енергії на змішування при збереженні інтенсивності змішування.

Дослідження стрічкових змішувачів.

Стрічкові змішувачі є, ймовірно, самій поширеною конструкцією змішувачів для сипучих матеріалів. Ці машини випускають багато фірм. Методика обчислення потужності, потрібної при змішуванні сипких матеріалів в змішувачах з горизонтальним корпусом (плужних і стрічкових), може бути розрахована по однаковим формулам. Приведені в [2, 4] методи розрахунку досить складні. У статті [6] викладені прості формули, зручні для інженерних розрахунків.

Потужність змішувача з горизонтальним корпусом, що необхідна для подолання сил тертя в сипучому матеріалі, визначається за формулою

$$N_c = 25\rho_n g \operatorname{tg} \phi^2 \eta^3 R^3 L \omega, \quad (5)$$

де ρ_n – насипна щільність сипкого матеріалу, кг/м^3 ;
 ϕ – кут внутрішнього тертя сипучого матеріалу, градус (визначали на кільцевому зсувному приладі [7], [8]);

η – коефіцієнт заповнення корпусу сипким матеріалом;

R – радіус ротора, м;

L – довжина ротора, м;

ω – кутова швидкість ротора, рад/с.

Потужність змішувача, що необхідна для подання сипучому матеріалу кінетичної енергії, визначається за формулою

$$N_d = 0,3\rho_n (0,05 + 0,3\operatorname{tg} \phi^{1,5}) \eta R^4 L \omega^3. \quad (6)$$

Потужність, споживана при перемішуванні визначається за формулою

$$N = \max(N_c, N_d). \quad (7)$$

У формули (5), (6), (7) не входять площа робочих елементів і їх число. Це пояснюється тим, що після досягнення певної щільності їх розташування, подальше їх збільшення не впливає на витрату енергії, оскільки спостерігається взаємодія елементів. Наприклад, в плужному змішувачі робочі елементи описують всю внутрішню поверхню корпусу. Був проведений експеримент - встановлений додатково ще один плуг, при цьому споживана потужність практично не збільшилась.

Слід також мати на увазі, що робочі елементи при правильному їх розташуванні повинні впливати на сипкий матеріал послідовно, а не одночасно. У цьому випадку момент опору, що діє на ротор буде досить постійним. Привід ротора в цьому випадку буде працювати в сприятливих умовах.

Наведені формули справедливі для великодисперсних матеріалів з розміром частинок більше 50 мкм. Для дрібнодисперсних матеріалів, з розміром частинок менше 50 мкм, опір руху робочих елементів на кілька порядків нижче. Дрібнодисперсні матеріали поведуться в процесі змішування подібно рідині: мають горизонтальну поверхню, передають тиск рівномірно на всі боки, опір руху не залежить від глибини занурення плужка в сипкий матеріал

Однак, вони здатні злежуватись і в цьому випадку пусковий момент може бути вельми великим. Для запобігання злежування деякі змішувачі мають два приводи, один робочий, другий тихохідний, який включається під час зберігання матеріалу і запобігає таким чином злежуванню (здійснюється ворущіння).

Доцільно розвивати серійний випуск обладнання для сипких і пастоподібних матеріалів на вітчиз-

няних підприємствах, що крім економічних вигад дасть значний соціальний ефект: збільшить число робочих місць на виробництві, сприятиме підвищенню кваліфікації фахівців. Необхідно використати досвід роботи науково-дослідних організацій.

Вітчизняні заводи-виробники змішувачів, на відміну від своїх зарубіжних колег [9], ніколи не займалися дослідженнями процесів змішання, не мали в своєму складі науково-дослідних лабораторій, тому ця частина роботи повністю лягала на галузеві НДІ. Заводські ж фахівці, в основному, займалися удосконаленням технології виготовлення обладнання.

Висновки.

1. Проведено експериментальне дослідження навантажень на робочі елементи плужних змішувачів. Для дослідження застосовано метод динамічно-го тензометрування.

2. Встановлено:

- зі збільшенням коефіцієнта заповнення корпусу навантаження на плуг зростають нелінійно. При коефіцієнті заповнення більше 0,6 можливе зростання пускового моменту до нескінченності (заклинювання ротора).

- зі збільшенням частоти обертання ротора момент опору спочатку знижується, потім підвищується. Останнє підвищення пояснюється тим, що матеріал набуває значну кінетичну енергію і розкидається над вільною поверхнею матеріалу.

3. Механізм опору переміщенню робочих елементів залежить від дисперсного складу сипких матеріалів. Наведені залежності від насипної щільності сипучого матеріалу і коефіцієнта внутрішнього тертя справедливі для великодисперсних матеріалів (розмір часток більше 50 мкм). Для дрібнодисперсних матеріалів (розмір часток менше 50 мкм) опір зменшується на кілька порядків нижче. Однак пусковий момент може досягати вельми великих величин після злежування.

4. В змішувачах з горизонтальним корпусом (плужних та стрічкових) процес опору сипучого матеріалу подібний, тому можливо застосування однакових розрахункових формул потужності привода. Доцільним є також розробка уніфікованого ряду цих змішувачів.

Література

1. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. М.: Высш.шк., 1973. 216 с.
2. Модестов В.Б. Смесители сыпучих и пастообразных материалов: монография. Луганськ: СПД Резніков В.С., 2011. 352 с
3. Смесители для сыпучих и пастообразных материалов: каталог. М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1991. 52 с.
4. Модестов В.Б. Разработка методики расчета плужных смесителей для сыпучих материалов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.04.09 / МИХМ. М., 1984. 144 с.

5. Орлов Г.И., Багринцев И.И., Модестов В.Б. Смеситель для сыпучих материалов. А. С. № 1151285, B01F 7/04, 22.12.84.
6. Модестов В.Б. Определение мощности смесителя, необходимой при смешивании сыпучих материалов. Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2003. №3. С. 7-8.
7. РД РТМ 26-01-129-80 Машины для переработки сыпучих материалов. Метод выбора оптимального типа питателей, смесителей и измельчителей. Северодонецкий филиал НИИХиммаш, 1980. 96 с
8. Кольцевой сдвиговый прибор Бромхеда (Torshear apparatus 27-WF2202) (фирма "Wykeham Farrance") URL: http://www.ellis-ltd.com.ua/?do=equipments&cat_id=1&rub_id=11&id=88 (дата звернення 29.01.2021 р.)
9. Schreuber G., Alt Chr. Investigation of the mixing process in solid mixers of different sizes. Processing technology..1980. №2. P.57-68.

References

1. Makarov Yu.I. Apparatus for mixing bulk materials. M.: Higher school, 1973, 216 p.
2. Modestov V.B. Mixers of bulk and pasty materials: Monograph. Lugansk, SPD Reznikov V.S., 2011. 352 p.
3. Mixers for loose and pasty materials. Catalog. M.: TSINTIKHIMNEFTEMASH. 1991. 52 p.
4. Modestov V.B. Development of a method for calculating plunger mixers for bulk materials. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, 05.04.09, M.: Moscow Institute of Chemical Engineering. 1984. 144 c.
5. Orlov G.I., Bagrintsev I.I., Modestov V.B. Mixer for bulk materials. A.S. No. 1151285, B01F 7/04, 22.12.84
6. Modestov V.B. Determination of the mixer power required for mixing bulk materials. J. Chemical and oil and gas machine-building. 2003. No. 3. P. 7-8.
7. Technical guidance material 26-01-129-80 Machines for processing bulk materials. Method for choosing the optimal type of feeders, mixers and grinders. Severodonetsk branch of NIIKhimash. 1980. 96 p.
8. Annular shear device Bromhead (Torshear apparatus 27-WF2202) (firm "Wykeham Farrance") URL: http://www.ellis-ltd.com.ua/?do=equipments&cat_id=1&rub_id=11&id=88 (Last accessed 29.01.2021)
9. Schreuber G., Alt Chr. Investigation of the mixing process in solid mixers of different sizes. Processing technology..1980. №2. P.57-68.

Модестов В.Б. Исследование нагрузок действующих на рабочие элементы смесителей сыпучих материалов

В статье исследована зависимость сопротивления движению рабочих элементов смесителей сыпучих материалов с горизонтальным цилиндрическим корпусом. Установлено, что он зависит от геометрических размеров корпуса и конфигурации смешивающих элементов, частоты вращения ротора, коэффициента заполнения корпуса, физико-механических характеристик смешиваемого материала. Проверена экспериментально математическая модель для расчёта сопротивления движению рабочих элементов с использованием метода динамического тензометрирования. Предложены рекомендации по кон-

струкции и режимам эксплуатации смесителей с горизонтальным цилиндрическим корпусом.

Ключевые слова: смесители сыпучих материалов, горизонтальный корпус, плужные, ленточные, динамическое тензометрирование, мощность.

Modestov V.B. Research on load that acts on the working elements of bulk material mixers

The article investigates the dependence of the resistance to movement of the working elements of mixers of bulk materials with a horizontal cylindrical body. The most common designs of such mixers are plow and belt mixers. The material for the article is the research carried out in the Severodonetsk Research Institute of Chemical Engineering—the leading organization of Chemical Engineering in Ukraine on the topic "mixers of bulk and pasty materials", as well as Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, department of mechanical engineering and applied mechanics. The author developed a mathematical model of the forces acting on the working elements of the plow mixers, which was verified experimentally. For the research, a dynamic strain gauge system was used, mounted in a laboratory plow mixer "Pzh-130". Experiments have confirmed the adequacy of the developed mathematical model. It has been established that the forces depend on the geometric dimensions of the body and the configuration of the mixing elements, the rotor speed, the filling factor of the body, and the physical and mechanical characteristics of the mixed material. Simple formulas for engineering calculations of the power consumed during mixing and recommendations for the design and operating modes of mixers are proposed. It was found that when the mixers are started, the rotor may jam if the filling factor of the body with coarse material exceeds 0.6. When the body is filled with more than 0.3 volume, with an increase in rotation frequency, the

moment of resistance first decreases, and then it increases, which is explained by the fact that material particles acquire kinetic energy and fly away above the surface of the bulk material. The resistance of a bulk material depends on its particle size. A distinction should be made between coarse materials with a particle size of more than about 50 microns and fine materials with a particle size of less than 50 mm. The proposed calculation formulas for determining the power consumption for mixing are valid for coarse materials. Coarse materials are incompressible, form a natural slope, create significant resistance when working elements move in it. The same materials crushed to 50 microns in a loosened state behave like a liquid: they have a flat horizontal surface, transmit pressure evenly in all directions, the resistance to movement of working elements is insignificant, several orders of magnitude lower than that of coarse materials. However, if finely dispersed materials are caked, then the starting moment of resistance acting on the rotor can be very significant. In order to prevent caking, mixers of fine materials are sometimes equipped with an additional slow-speed drive, which operates during storage of the material.

Keywords: mixers for bulk materials, a horizontal body, plow, belt, dynamic strain gauging, power.

Модестов Василь Борисович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк), modestov@bigmir.net.

Стаття подана 09.02.2021 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-90-97>

УДК 621.929 (678.053.3+66.05)

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАНЕТАРНО-ШНЕКОВИХ ЗМІШУВАЧІВ

Модестов В.Б., Табунщиков В.Г.

RESEARCH OF PLANETARY-SCREW MIXERS

Modestov V.B., Tabunschikov V.G.

В статті досліджено процес розподілу сипких компонентів у планетарно-шнекових змішувачах. Проведені експериментальні роботи з відбором проб зі змішувача. Для обробки отриманих даних застосовані методи математичної статистики. Виявлені напрямки найбільш повільного розповсюдження компонентів. Приведені результати моделювання навантажень, що діють на шнек та корпус змішувачів. Експериментально визначено витрати енергії на змішування. Запропоновані інженерні формули для розрахунку необхідної потужності приводу. Приведені результати обслідування змішувачів на діючих виробництвах. Дани рекомендації до проектування такого типу змішувачів.

Ключові слова: змішувачі, планетарно-шнекові, сипкі матеріали, математична статистика, конструювання, привід, потужність.

Вступ. Планетарно-шнекові змішувачі широко використовуються у різних галузях промисловості для змішування сипких матеріалів [1]. Відділ змішувального обладнання Сєверодонецького НДІХІММАШ виконував дослідження і розробку цього типу змішувачів, узгодження проектів з заводами-виробниками, впровадження дослідних зразків у виробництво і рішення технічних проблем, що виникають при їх експлуатації, обстеження вітчизняних і імпортованих змішувачів на діючих виробництвах [2, 3]. Кафедра машинобудування та прикладної механіки (МПМ) має лабораторні моделі планетарно-шнекових змішувачів, які використовуються для проведення експериментальних робіт.

У даній статті наводяться результати експериментальних праць, проведених на кафедрі МПМ та досвід роботи авторів з цим типом змішувачів.

Метою роботи є розробка рекомендацій щодо проектування планетарно-шнекових змішувачів та можливі напрямки їх удосконалення. експериментальна перевірка розрахункових формул для визначення енерговитрат.

Методика вивчення розподілу компонентів. Теорія змішування. Змішування є процесом, що відбувається в часі. Якість суміші визначається шля-

хом відбору проб і їх аналітичної оцінки. При цьому слід враховувати, що можливе отримання оптимального стану суміші, яке при продовженні процесу змішування може згодом знову погіршитися.

При змішуванні сипучих компонентів велике значення мають співвідношення показників їх щільності і об'ємів. Чим це співвідношення ближче до одиниці, тим швидше і легше відбувається процес змішування і досягається необхідний ступінь однорідності суміші. Також, чим менші розміри частинок і більш вирівняним є їх гранулометричний склад, тим легше отримати задану однорідність суміші. Якщо середні розміри часток одного компоненту значно відрізняються, то однорідну суміш отримати важко.

Ю.І. Макаров припускає [1], що процес змішування складається з наступних елементарних процесів: переміщення групи суміжних частинок з одного місця суміші в інше (процес конвективного змішування); поступовий перерозподіл частинок різних компонентів через свіж отриманий кордон їх розділу (процес дифузійного змішування); зосередження частинок під дією гравітаційних або інерційних сил (процес сегрегації).

Змішувачі призначені для рівномірного розподілу компонентів. Для сипучих компонентів найкращим буде, регулярний розподіл. При регулярному розподілі частки повинні бути розташовані в порядку, подібно чорним і білим клітинам на шахівниці. В принципі, такий розподіл можливо, але здійснити його практично, для великого числа частинок, важко.

Відомий також стохастичний розподіл, при якому окремі частинки компонентів розташовані випадковим чином. Візуально, суміш стає однорідною, але якщо її розглянути під мікроскопом, то буде видно, що частинки розташовані безладно. При такому розташуванні теоретично може бути досягнута найкраща можлива для випадкового процесу однорідність суміші (рандомальний розподіл компонентів).

Практично досягти ідеального розподілу компонентів не вдається навіть при дуже довгому змішуванні, оскільки існує процес, який протидіє випадковому розподілу часток - сегрегація. Сегрегація - це поділ компонентів. Вона може відбуватися з різних причин. Схильність до сегрегації в більшій чи меншій мірі характерна для будь-якої суміші.

Схильність сипучих сумішей до сегрегації досліджена в роботі Вільямса і Хана [3]. У ній вказується, що основними причинами сегрегації можуть бути відмінності в розмірах, щільності, формі, шорсткості частинок і т.д.

У змішувачі одночасно протікають два процеси: змішання і сегрегація. При тривалому перемішуванні між ними встановлюється рівновага. У будь-якому випадку, отримана однорідність суміші завжди буде гірше, ніж при рандомальному розподілі.

Одним з методів боротьби з сегрегацією є застосування рідкого зв'язуючого. Змішання пов'язаних компонентів не супроводжується сегрегацією і досягається однорідність суміші близька до рандомальної.

Іншим технологічним прийомом для зменшення сегрегації є гранулювання суміші. Цей метод застосовується, наприклад, в процесі приготування скляної шихти. В цьому випадку гранулювання проводиться методом пресування на валкових пресах (компактування). У виробництві пральних порошків гранули одержують шляхом введення рідкого зв'язуючого в барабанних або тарілчастих грануляторах, а так само в лопатевих змішувачах.

При проведенні наукових досліджень використовуються методи математичної статистики, що дозволяють чисельно оцінити однорідність суміші. З різних точок об'єму суміші відбираються проби, які називаються вибіркою. Найчастіше вивчають розподіл в суміші одного з компонентів, який називають

ключовим. Зміст цього компонента в кожній з проб відібраних з суміші позначають x_i . Інші компоненти суміші називають основними. Більшість дослідників оцінюють рівномірність розподілу компонентів в суміші коефіцієнтом неоднорідності

$$V_c = \frac{100 \cdot S_u}{\bar{X}}, \quad (1)$$

де: S_u - виправлене вибіркоче середньоквадратичне відхилення концентрації ключового компонента в пробах вибірки; \bar{X} - середнє арифметичне значення масової частки ключового компонента в пробах вибірки.

Дисперсію рандомального розподілу S_R^2 для двокомпонентної суміші можна розрахувати за формулою Штанге [5, 6]

$$S_R^2 = \frac{c_p \cdot c_q}{G} \cdot \left[c_p \cdot \bar{\gamma}_q \cdot \left(1 - V_g^2 \right) + c_q \cdot \bar{\gamma}_p \cdot \left(1 - V_p^2 \right) \right], \quad (2)$$

де: G - маса проби, г; c_p, c_q - масові частки ключового і основного компонента в суміші; $\bar{\gamma}_p, \bar{\gamma}_q$ - середні маси частинок ключового і основного компонентів в суміші, г; V_p, V_q - коефіцієнти варіації розподілу часток ключового і основного компонентів по масам.

На рис. 1 показана типова крива зміни вибіркової зміряної дисперсії S_u^2 під час змішування. Вибіркова дисперсія є оцінкою генеральної дисперсії S^2 .

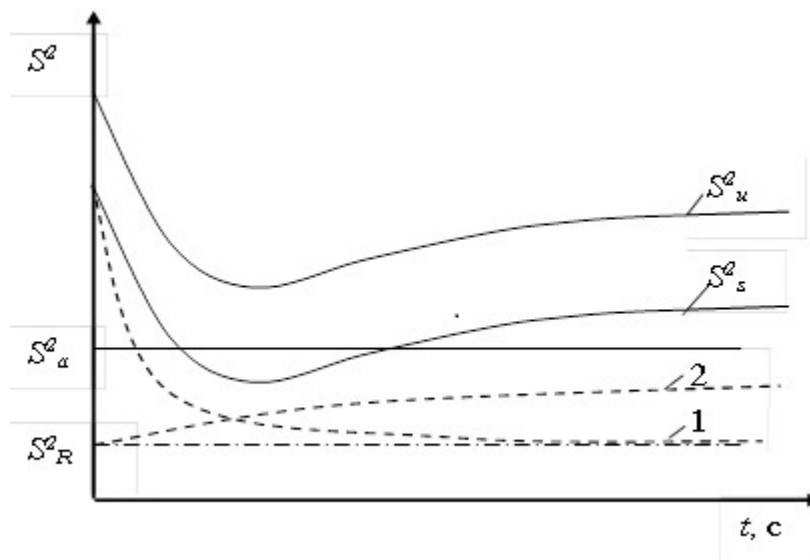


Рис. 1. Зміна дисперсії розподілу ключового компонента при змішуванні

$$S_u^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (3)$$

де: x_i - масова частка ключового компонента в i -й пробі; n - кількість проб у вибірці.

Зазвичай при дослідженні однорідності розподілу сипучих компонентів не враховується, що S_u^2 , є сумою декількох дисперсій [2, 8]

$$S_u^2 = S_s^2 + S_a^2 + S_R^2 \quad (4)$$

де: S_s^2 - дисперсія, викликана недосконалим розподілом ключового компонента в змішувачі (наявністю сегрегації або континуумів); S_a^2 - дисперсія аналізу, викликана похибкою визначення змісту ключового компонента в пробах; S_R^2 - дисперсія при рандомальному (ідеальному випадковому) розподілі часток компонентів у змішувачі.

Очевидно, що дисперсії аналізу і рандомального розподілу ніяк не характеризують ефективність роботи змішувача. Обидві ці величини можуть бути визначені теоретично.

S_a^2 може бути отримана за допомогою статистичної обробки залежних вибірок [7]. Залежними називаються вибірки, у яких проби взяті з одних і тих же точок корпусу змішувача.

Крива S_u^2 показує значення дисперсії, отримані шляхом статистичної обробки проб вибірки.

Крива S_s^2 показує справжні значення дисперсії. Ці значення були б отримані при абсолютно точному визначенні змісту ключового компонента в пробах.

Процес розподілу компонентів, що характеризується зміною S_s^2 , є сумою двох процесів що одночасно протікають: 1 - розподілу компонентів в корпусі змішувача, 2 - сегрегації компонентів (рис. 1).

При досить тривалому змішуванні могло б бути досягнуто ідеальне випадкове (рандомальне) розподілення компонентів - S_R^2 , але в більшості випадків воно не досягається, так як відбувається і сегрегація.

Якщо потрібно вивчити розподіл компонентів в корпусі змішувача, визначити напрямок, в якому відбувається сегрегація, вказати заходи, щодо вдосконалення конструкції змішувача, то доцільно застосування методів математичної статистики. Хороші результати дає застосування методів дисперсійного аналізу і порівняння вибірових середніх [7].

Нижче приведено приклад обробки результатів змішання піску і чавунної тирси, отримані в змішувачі ПШ-24 через 12 обертів водила (360 секунд змішування).

Відповідно до номерів проб (рис.2) були визначені наступні вагові концентрації ключового компонента (металевої тирси) в пробах вибірки.

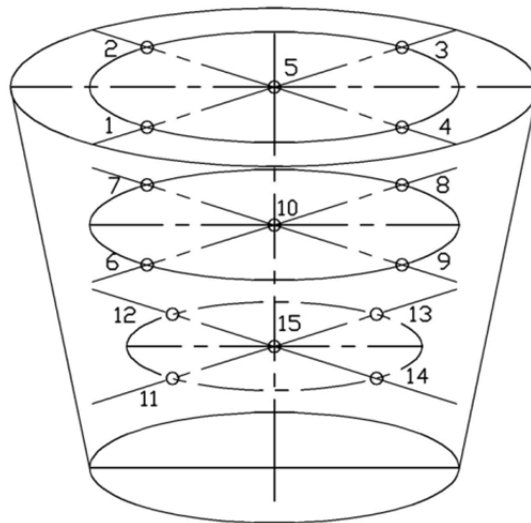


Рис. 2. Схема відбору проб з корпусу змішувача

Таблиця 1

Відповідність концентрації ключового компонента в пробах через 12 обертів водила

№ проби (рис.2)					Концентрація ключового компонента в відповідних пробах, x_i %				
1	2	3	4	5	5,295	5,554	5,199	5,087	5,209
10	9	8	7	6	5,224	5,248	5,163	5,481	5,164
11	12	13	14	15	5,552	5,506	5,370	5,198	5,430

По даним таблиці 1 розраховуємо середню концентрацію ключового компонента у всіх 15 пробах вибірки (середнє вибірове)

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{75,8}{15} = 5,312 \% \quad (5)$$

де: x_i - концентрація ключового компонента в i -й пробі, %; n - число проб у вибірці.

Сума квадратів різниць

$$S^2(x) = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 0,343 \quad (6)$$

Виправлена вибіровка дисперсія

$$D(x) = \frac{S^2(x)}{n-1} = \frac{0,343}{14} = 0,0245 \quad (7)$$

Коефіцієнт неоднорідності суміші

$$V_c(x) = \frac{100 \cdot \sqrt{D(x)}}{\bar{x}} = \frac{100 \cdot 0,157}{5,312} = 2,947 \% \quad (8)$$

Виробляємо порівняння двох вибірових середніх верхнього і нижнього шарів \bar{x}_e і \bar{x}_n [7, с.297-303]. Число проб в групах $n_v = n_n = 5$.

Вибіркові середні різняться незначно, $\bar{x}_e = \bar{x}_n$.

Виробляємо порівняння середніх для п'яти груп, розташованих по вертикалі корпусу методом дисперсійного аналізу. [7, с.349-362].

Розбиваємо вибірку з 15 проб на п'ять вертикальних груп, по 3 проби в кожній з розташованих паралельно осі корпусу:

1J (x_1, x_6, x_{11}); 2J (x_2, x_7, x_{12}); 3J (x_3, x_8, x_{13}); 4J (x_4, x_9, x_{14}); 5J (x_5, x_{10}, x_{15}).

1J (5,295; 5,224; 5,552); 2J (5,554; 5,248; 5,506); 3J (5,199; 5,163; 5,370); 4J (5,087; 5,481; 5,198); 5J (5,209; 5,164; 5,403).

Підраховуємо середні значення концентрацій ключового компонента для груп.

$$\bar{x}_{kj} = \frac{\sum_{i=1}^3 x_{ikj}}{3}, \tag{9}$$

де номери груп $j \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$.

$\bar{x}_{1J} = 5,357$; $\bar{x}_{2J} = 5,436$; $\bar{x}_{3J} = 5,244$; $\bar{x}_{4J} = 5,255$; $\bar{x}_{5J} = 5,268$.

Далі зрівнюємо вибіркові середні методом дисперсійного аналізу [7]. Вибіркові середні розлічують незначно.

Результати експериментів по змішуванню сухого піску Сєверодонецького кар'єру з чавунною тирсою. Завантаження чавунної тирси проводилось в одному місті на поверхні піску біля точки 1 (рис. 3).



Рис. 3. Начальне завантаження чавунної тирси

При змішуванні з корпусу змішувача через певний час відбиралися проби по схемі приведеної на рис.2.

Відібрані проби розподілялись на чавунну тирсу та пісок за допомогою магніту. Потім ці компо-

ненти важились на аналітичних вагах, та обчислювався зміст ключового компонента в кожній пробі.

В таблиці 2 приведені результати визначення змісту ключового компонента в пробах через 5 обертів водила (n шнека=35 об/хв., n водила=2 об/хв.).

Отримані дані оброблялися за допомогою методів математичної статистики [7].



Рис. 4. Розподіл компонентів через 12 обертів водила

Таблиця 2

Розподіл ключового компонента через 5 обертів водила

№ проби	Маса ключового компонента,	Маса основного компонента,	Зміст ключового компонента,
	г	г	%
1	1,193	16,618	6,698
2	0,992	16,900	5,544
3	0,507	12,907	3,780
4	0,803	13,296	5,695
5	1,030	16,895	5,746
6	1,136	16,9	6,299
7	1,098	14,708	6,947
8	0,700	15,003	4,458
9	1,094	15,190	6,718
10	0,901	15,910	5,360
11	0,902	16,700	5,124
12	0,897	14,903	5,677
13	0,701	13,000	5,116
14	1,001	17,400	5,440
15	1,092	19,393	5,331
		$X_{cp} =$	5,596
		$V_c =$	15,128

Результати статистичної обробки.

Середні по вертикалі розлічуються незначно
Середні по окружності розлічуються значно



Рис. 5. Візуальне зрівняння розподілу компонентів (пісок та гранульований поліетилен) після 6 обертів водила без та з додатковим змішувальним елементом

Очевидно, що при використанні додаткового змішувального елемента матеріали розподіляються на кружності корпусу більш рівномірно.

Теоретичне визначення енерговитрат на змішування. В [2], [9] приведені аналітичні вивід формул для обчислення потужності шнека потрібної при змішуванні сипучих матеріалів. В [10] пропонувані спрощені формули, зручні для інженерних розрахунків (10), (11).

$$N_s = \pi \cdot \rho_n \cdot g \cdot \sin(\theta + \varphi_e) \cdot \frac{D_s^2}{4} \cdot \frac{H^2 \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\cos \alpha \cdot (2 \cdot \mu \cdot \operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \alpha)} \cdot \omega_s \quad \text{Вт} \quad (10)$$

де ρ_n – насипна щільність, кг/м³;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

θ – кут підйому зовнішньої кромки витка шнека, градус;

φ – кут внутрішнього тертя, градус (визначається на кільцевому зсувному приборі [11], [12]);

φ_e – кут зовнішнього тертя, градус (для інженерних розрахунків можливо прийняти $\varphi_e = \varphi$);

μ – коефіцієнт бокового тиску;

ω_s – кутова швидкість обертання шнека, рад/с;

α – кут нахилу осі шнека к вертикалі, градус;

D_s – зовнішній діаметр шнека, м;

H – глибина занурення нижнього кінця осі шнека в сипкий матеріал, м.

Для розрахунку осьової сили, що діє на шнек, пропонується наступна формула

$$P_{oc} = \pi \cdot \rho_n \cdot g \cdot \frac{D_s^2}{4} \cdot H \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot H \cdot \cos(\theta + \varphi_e) \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \alpha}{D_s \cdot \cos \alpha \cdot (2 \cdot \mu \cdot \operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \alpha)} \right] \quad \text{Н. (11)}$$

Методика експериментального визначення енерговитрат на змішування. Потужність що споживається на перемішування визначається як різниця потужності, що замірена ватметром під навантаженням N_u та потужності холостого ходу N_{xx} при тих же обертах

$$N = N_u - N_{xx} \quad (12)$$

Для вимірювання витрат енергії в процесі змішування був використаний ватметр PZEM-021. Цей ватметр перемінного струму застосовується для виміру потужності підключеного активного навантаження.



Рис. 6. Ватметр PZEM-021

Він єдино терміново відображає 4 параметра вимірювання:

- 1 Напругу в сети (В).
- 2 Сила току перемінного (А).
- 3 Активну споживану потужність (Вт).
- 4 Рахівник споживаної енергії (Вт·год).

Характеристики: потужність - 4.5кВт; живлення 80 -260В перемінного струму; частота - 50 Гц; максимальний виміряний струм 20 А; діапазон відображення споживаної електроенергії - до 9999.9 кВт·години; розміри: 84.6 x 44,6 x 24.4 мм.

Матеріали для досліджень:

Пісок Северодонецького кар'єру: насипна маса - 1600 кг/м³; середній розмір частинок - 0,15 мм; середньоквадратичне відхилення розмірів частинок - 0,1 мм; кут природного укосу - 34°; вологість - 0%.

Чавунна тирса : насипна маса - 3350 кг/м³; середній розмір частинок - 0,4 мм; середньоквадратичне відхилення розмірів частинок -0,15 мм; кут природного укосу - 42°; вологість - 0%.

Для порівняння ефективності змішування були спочатку проведені заміси в змішувачі класичної конструкції – з одним шнеком. Потім на тих же матеріалах вже з додатковими елементами.

Опис змішувача ПШ-24

Лабораторний змішувач ПШ-24 є конструкцією фірми «Nauta» (Нідерланди). Він був модернізований: змінено двигун перемінного струму на двигун постійного струму, після чого стало можливо здійснювати зміну частоти обертів водила та шнека (рис.7). Застосовано шнек з кутом підйому витка 21°40'.



Рис. 7. Змішувач ПШ-24 (модернізований планетарно-шнековий змішувач фірми «Nauta» (Нідерланди))

Живлення двигуна МІ-32 здійснюється за допомогою блока живлення, відповідно схемі (рис. 8).

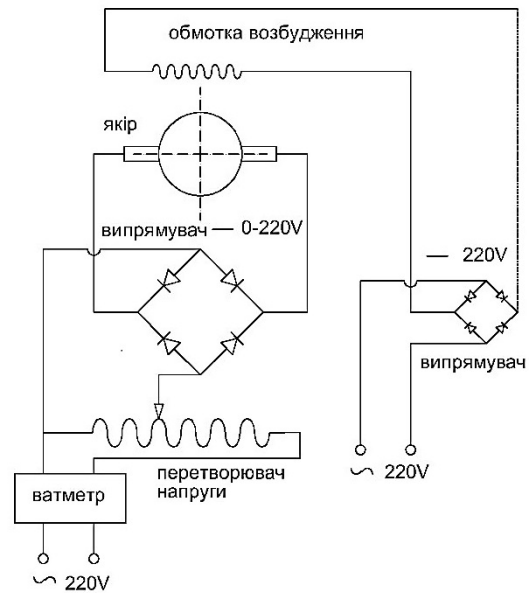


Рис. 8. Схема підключення двигуна

Обмотка збудження незалежна. На неї подається постійна напруга 220 В від прямоуючого моста.

На ротор двигуна подається постійна напруга від 0 до 220 В від прямоуючого моста. Відповідно напругі змінюється частота обертів двигуна. Зміна здійснюється за допомогою перетворювача напруги.

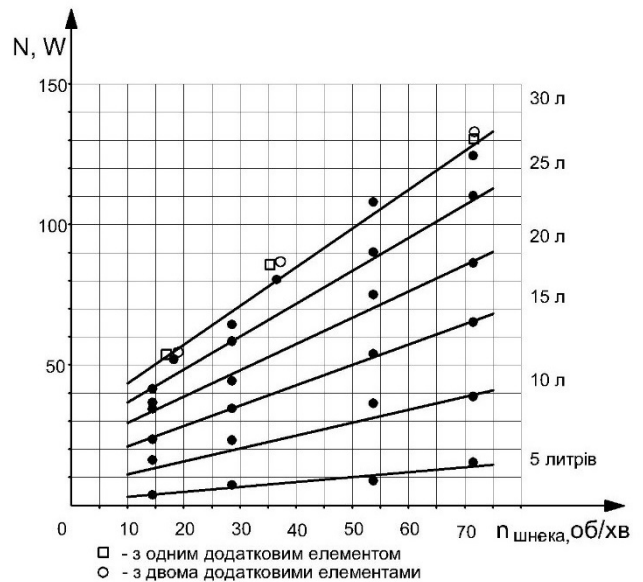


Рис. 9. Залежність енергетичних витрат на змішення з додатковими елементами від частоти обертання шнека при загрузці 30 л та при різних загрузках змішувача ПШ-24 піском без додаткових елементів

Частота обертання ротора двигуна вимірюється за допомогою вело комп'ютера ASSIZE AS-820. Цій комп'ютер може виконувати функцію відображення частоти обертання колеса. Виміряється частота обертання об/хв. від 0 до3600.

Таблиця 3

Витрати енергії змішувачем «Nauta»

Маса загрузки, кг	Глибина занурення кінця шнека в сипкий матеріал, м	Експериментальні значення				
		Розрахункові значення	Витрата енергії по формулі (10), Вт	Витрата енергії шнеком при нерухомому водилі, с урахуванням ККД привода, Вт	Витрата енергії шнеком при нерухомому водилі, Вт	Витрата енергії шнеком при водилі що рухається, Вт
600	1,03	1077	1638	2340	2430	120
1200	1,43	2086	2202	3150	3780	126
1400	1,53	2406	-	-	4320	150
1700	1,67	2857	2898	4140	4950	180

В таблиці 3 приведені дані що отримані при змішуванні великодисперсного абразивного матеріалу – периклаза в планетарно-шнековому змішувачі фірми «Nauta», встановленого на виробництві матеріалів для електроізоляторів. Змішувач мав діаметр шнека – 0,310 м, кут нахилу шнека к осі корпусу – 17°, кут підйому гвинтової лінії шнека – 14°, частота обертання шнека – 60 об/хв, частота обертання водила – 2 об/хв. Привод шнека мав асинхронний двигун потужність 7,5 кВт, кіничне – циліндричний редуктор, муфту, дві кіничні зубчаті передачі. Загальний КПД привода шнека приймаємо рівним 0,7. Привод водила мав асинхронний двигун, потужністю 0,55 кВт. Потужність холостого хода привода шнека – 630 Вт, потужність холостого хода привода водила – 120 Вт.

Периклаз мав кут внутрішнього тертя – 26°, кут зовнішнього тертя – 23°, насипну щільність 1800 кг/м³.

Зрівняння розрахункових та опитних значень свідчить о достатньої точності методики що рекомендується.

Висновки.

1. Виявлено напрямок найповільнішого розподілу компонентів - по колу корпусу.
2. Застосування додаткових робочі елементів прискорило розподіл компонентів по колу корпусу.

3. Приведені результати вимірювання витрати енергії на лабораторному та промисловому змішувачах. Отримані результати відповідають теоретичним значенням.

4. Застосування додаткових елементів практично не збільшує витрат енергії.

Література

1. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. М.: Высш.шк., 1973. 216 с.
2. Модестов В.Б. Смесители сыпучих и пастообразных материалов: монография. Луганськ: СПД Резніков В.С., 2011. 352 с
3. Смесители для сыпучих и пастообразных материалов: каталог. М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1991. 52 с.
4. Williams I.C., Khan M.I. The Mixing and Segregations of Particulate Solids of Differend Particle Size. The Chemical Engineer. 1973, Ian. P. 19-25.
5. Stange K. Beurteilung von Mischgeraten mit Hilfe Statistischer Verfahren. Chemie-Ingenier-Technick. 1954. №26. s. 150-155.
6. Stange K. Die mischgute einer Zufallmischung als Grundlage zur Beurteilung von Mischversuchen. Chemie-Ingenier-Technick, 1954. № 26. s. 331-337.
7. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. -9-е изд. М.: Высшая школа, 2003. 479 с.
8. Модестов В.Б., Куліков Д.О. Сипкі матеріали. Вивчення розподілу компонентів у змішувачах. Хімічна промисловість України, , 2003. № 3. С. 29-31.
9. Модестов В.Б. Определение затрат энергии на перемешивание в планетарно-шнековых смесителях.Ж. «Химическое и нефтегазовое машиностроение», , 2002. №3. С. 13-15.
10. Модестов В.Б. Определение мощности смесителя, необходимой при смешивании сыпучих материалов. Химическое и нефтегазовое машиностроение, №3, 2003. С. 7-8.
11. РД РТМ 26-01-129-80 Машины для переработки сыпучих материалов. Метод выбора оптимального типа питателей, смесителей и измельчителей. Северодонецкий филиал НИИХиммаш, 1980. 96 с
12. Кольцевой сдвиговой прибор Бромхеда (Torshear apparatus 27-WF2202) (фирма "Wykeham Farrance") URL: http://www.ellis-ltd.com.ua/?do=equipments&cat_id=1&rub_id=11&id=88 (дата звернення 29.01.2021 р.)

References

1. Makarov Yu.I. Apparatus for mixing bulk materials. - M.: Higher school, 1973, 216 p.
2. Modestov V.B. Mixers of bulk and pasty materials: Monograph. Lugansk, SPD Reznikov V.S., 2011. 352 p.
3. Mixers for loose and pasty materials. Catalog. M.: TSINTIKHIMNEFTEMASH. 1991. 52 p.
4. Williams I.C., Khan M.I. The Mixing and Segregations of Particulate Solids of Differend Particle Size. The Chemical Engineer, 1973. Ian. s. 19-25.
5. Stange K. Assessment of mixing devices with the help of statistical procedures. Chemical engineering technology, №26, 1954, P. 150-155.
6. Stange K. The mixed good of a random mix as a basis for assessing mixing tests. Chemical engineering technology, 26, 1954. 6. s. 331-337.

7. Gmurman V.E. Theory of Probability and Mathematical Statistics. -9th ed. M.: Higher school, 2003. 479 p.
8. Modestov VB, Kulikov D.A. Loose materials. Study of the distribution of components in mixers. Chemical industry of Ukraine. 2003. № 3. С. 29-31.
9. Modestov V.B. Development of a method for calculating plunger mixers for bulk materials. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, 05.04.09, M.: Moscow Institute of Chemical Engineering. 1984. 144 p.
10. Modestov VB Determination of the mixer power required for mixing bulk materials. Chemical and oil and gas machine-building., 2003. . No 3. P. 7-8.
11. Technical guidance material 26-01-129-80 Machines for processing bulk materials. Method for choosing the optimal type of feeders, mixers and grinders. Severodonetsk branch of NIIKhim mash. 1980. 96 p.
12. Annular shear device Bromhead (Torshear apparatus 27-WF2202) (firm "Wykeham Farrance") URL: http://www.ellis-ltd.com.ua/?do=equipments&cat_id=1&rub_id=11&id=88 (Last accessed 29.01.2021) (Date of the beast 01/29/2021.)

Модестов В.Б., Табунщиков В.Г. Исследование планетарно-шнековых смесителей

В статье исследован процесс распределения сыпучих компонентов в планетарно-шнековых смесителях. Проведены экспериментальные работы с отбором проб из смесителя. Для обработки полученных данных применены методы математической статистики. Выявлены направления наиболее медленного распространения компонентов. Приведены результаты моделирования нагрузок, действующих на шнек и корпус смесителей. Экспериментально определены затраты энергии на смешивание. Предложены инженерные формулы для расчета необходимой мощности привода. Приведены результаты обследования смесителей на действующих производствах. Даны рекомендации по проектированию такого типа смесителей.

Ключевые слова: смесители, планетарно-шнековые, сыпучие материалы, математическая статистика, конструирование, привод, мощность.

Modestov V.B., Tabunschikov V.G. Research on load that acts on the working elements of bulk material mixers

Planetary screw mixers are widely used in various industries for mixing bulk materials. The mixing equipment department of Severodonetsk Research Institute of chemical engineering carried out research and development of this type of mixers, coordination of projects with manufacturing plants, introducing prototypes into production and solving technical

problems arising during their operation, examining domestic and imported mixers at existing industries. The Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics has laboratory models of planetary screw mixers that are used for experimental work. The article investigates the process of distribution of bulk components in planetary screw mixers. The material for the article is the research carried out at the Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University. The theoretical foundations of the process of distribution of bulk components are considered. An experimental study of the distribution of components in a planetary screw mixer has carried out. Methods of mathematical statistics were used to process the results. It has been revealed the direction in which the components are distributed more slowly – around the circumference of the body. The use of additional working elements to accelerate the distribution of components in this direction is proposed. It is shown that the use of additional elements practically does not increase energy consumption, but it reduces the time required for mixing and prevents segregation of the components. The results of modeling the loads acting on the screw and the mixer body are presented. Engineering formulas for calculating the required drive power are proposed. An experimental measurement of the energy consumption for mixing pericase in a laboratory mixer with a working volume of 24 liters was carried out. The obtained results correspond to theoretical values. The results of energy consumption for mixing in the "Nauta" industrial mixer with the volume of material in the body 1000 l are given. Experimental results are close to theoretical values. The referenced literature provides detailed guidelines for the design of planetary auger mixers. A list of current literary sources has been compiled, which contains detailed recommendations for the design of planetary screw mixers.

Keywords: mixers, planetary screw, bulk materials, mathematical statistics, design, drive, power.

Модестов Василь Борисович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк)

modestov@bigmir.net

Табунщиков Володимир Георгійович – старший викладач кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) tabvladimir1954@gmail.com

Стаття подана 05.02.2021 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-98-107>

УДК 621.9.025.11

ІНЖЕНЕРНИЙ КОНСАЛТИНГ В СИСТЕМІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ВИРОБІВ

Ніколаєнко А.П., Шумакова Т.О.

ENGINEERING CONSULTING IN THE PRODUCT QUALITY ASSURANCE SYSTEM

Nikolaienko A.P., Shumakova T.O.

Стаття присвячена можливостям застосування інженерного консалтингу, як методу досягнення конкурентоспроможності машинобудівних виробництв. Показана необхідність використання гнучких сучасних підходів до управління виробничими процесами при переході на нові технології для гарантованого досягнення високих результатів щодо якості виробів, витрат на їх виробництво та термінів виведення нових виробів на ринок. Проаналізовано можливості інженерного консалтингу, як нової області діяльності, на всіх етапах життєвого циклу виробів машинобудування. Розглянуто питання забезпечення якості виробів, їх точності. Запропоновано діаграму «Причин та результатів», як методу дослідження факторів, що впливають на точність. Показано важливість прогнозування відсотку браку при впровадженні нових технологій та можливості використання для цього статистичних методів.

Ключові слова: інженерний консалтинг, життєвий цикл виробів, прогнозування відсотку браку, точність, статистичні методи, діаграма «Причин та результатів».

Вступ. Конкурентоспроможність підприємств машинобудівної галузі визначається впровадженням нових технологій та рішенням актуальних завдань, які ставить ринкова економіка [1, 2, 3]. Для цього пропонують розширювати можливості використання систем автоматизації конструкторської підготовки виробництва та методів параметричного моделювання деталей та вузлів машин [4 – 7]. Приділяється увага підвищенню ефективності, пошуку шляхів інтенсифікації новітніх методів обробки, тому числі вібраційної обробки у вільних абразивах [8 – 12].

оптимізація виробничих процесів Часто застарілі методи управління виробничими процесами, громіздка структура виробництва стримують розвиток як окремих підприємств, так і галузі в цілому [13 – 16]. Одним з методів, що допомагає побудувати сучасну та гнучку модель управління машинобудівного підприємства є інженерний консалтинг, який пропонує як конкретне обладнання, інструмент та програмне забезпечення, так і процеси створення нових виробів машинобудування на основі сучасних

технологій їх виробництва [17]. Інженерний консалтинг забезпечує при технічному переозброєнні виробництва, переході на нові технології гарантоване досягнення високих результатів щодо якості виробів, витрат на їх виробництво та термінів виведення нових виробів на ринок. Супровід спеціаліста з інженерного консалтингу відбувається впродовж всього життєвого циклу виробу – від процесу створення дослідного зразка до випуску заданої партії продукції в фіксовані терміни з необхідною якістю і прийнятною собівартістю.

Сутність інженерного консалтингу. Інженерний консалтинг – це нова сфера діяльності, яка інтегрує науку про виробу машинобудування та процеси їх створення з економічними та ринковими теоріями, а також методами організації виробництва. Мета інженерного консалтингу полягає у тому, щоб зробити керованими три ключові параметри: якість виробів, витрати на виробництво виробів та терміни виведення нових виробів на ринок [17].

Задачею інженерного консалтингу є гарантоване досягнення очікуваних результатів від рекомендованих консультантами нових технологій на машинобудівному підприємстві.

Інженерний консалтинг пропонує ефективний поетапний підхід до впровадження технологій та обладнання у виробничий процес:

1. Первинна діагностика, виявлення наявних недоліків та проблем виробництва, спільне формування «технічного завдання на вирішення проблеми».

2. Формування комплексної пропозиції для вирішення однієї або декількох виробничих проблем.

3. Експериментальна перевірка на основі математичного моделювання та статистичного аналізу запропонованого рішення, що дозволяє судити про його доцільність та можливість реалізації, створення експериментального прототипу виробництва, видача пояснювальної записки і технічного завдання на поставку обладнання та програмного забезпечення.

4. Реалізація технічного завдання на поставку обладнання та впровадження технологій з гарантіями досягнення показників експериментального прототипу (техніко-економічних показників, пов'язаних з обладнанням і програмним забезпеченням) при подальшому впровадженні.

5. Створення діючого прототипу виробництва і ініціалізація необхідних організаційно-технічних перетворень.

6. Забезпечення випуску нових конкурентоспроможних виробів, постійний моніторинг і підвищення ефективності виробництва.

Інженерний консалтинг розвиває і розширює ідеологію «Розумного виробництва», розуміючи під ним оптимізований процес власне виробництва і його технічної (конструкторської і технологічної) підготовки в прив'язці до програми виготовлення конкретних виробів. Вводиться ключове поняття «виробничий цикл» – повний час, необхідний для конструкторської та технологічної підготовки виробництва (проектування) і власне виробництва (виготовлення) виробів.

Найважливіший постулат інженерного консалтингу полягає в тому, що мінімізувати виробничий цикл, не знижуючи якості виробів і зменшуючи їх собівартість. Для скорочення виробничого циклу і зниження собівартості продукції пропонуються наступні методи [17]:

- якісна конструкторсько-технологічна підготовка виробництва;
- мінімізація машинного часу обробки деталей за рахунок оптимізації керуючих програм;
- максимальне виконання операцій на одному верстаті завдяки його високому технологічному оснащенню;
- значне скорочення часу операцій по установці і базування деталей на верстатах;

- застосування високошвидкісної обробки деталей;
- розміщення верстатів в відповідно до технологічних процесів.

Інженерний консалтинг – активна система, яка націлена на зміну характеристик виробу, таких як якість, терміни, витрати, що визначають його конкурентоспроможність.

Мета роботи. Метою роботи є аналіз методів інженерного консалтингу та їх практичне застосування на прикладі виробництва зубчастих коліс двоступінчастих циліндричних редукторів (рис. 1). Дані деталі випускаються в умовах великосерійного і масового виробництв, тому актуальним є підвищення продуктивності та зниження відсотку браку на основі принципів інженерного консалтингу, таких як діаграма причин та результатів та методів статистичного аналізу.

Діаграма причин та результатів. На якість виробів машинобудування впливають багато факторів, між якими існують відносини типу «причина – результат» [18]. Структура та характер цих багатфакторних відносин визначається шляхом систематичних спостережень. Засобом, який дозволяє представити ці відносини в доступному та наочному вигляді є діаграма причин та результатів, яка показує відношення між показником якості і впливають на нього факторами. Діаграма причин та результатів за своїм виглядом нагадує «риб'ячий скелет», що видно на рис. 2 та має відповідну назву.

Рекомендується дотримуватися наступного порядку побудови діаграми «риб'ячий скелет»:

1. Визначається перелік показників якості (видів невдач, дефектів, браку), які підлягають аналізу.

2. Один показник якості розташовується з правого краю чистого аркуша паперу. Від нього проведена пряма лінія, яка представляє собою «хребет» майбутньої діаграми.

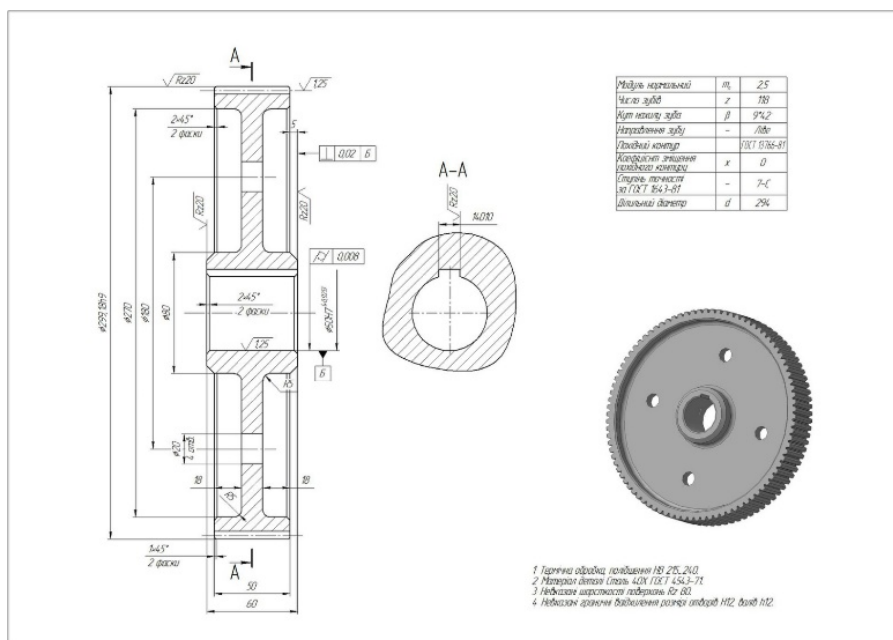


Рис. 1. Креслення та 3D модель зубастого колеса редуктора

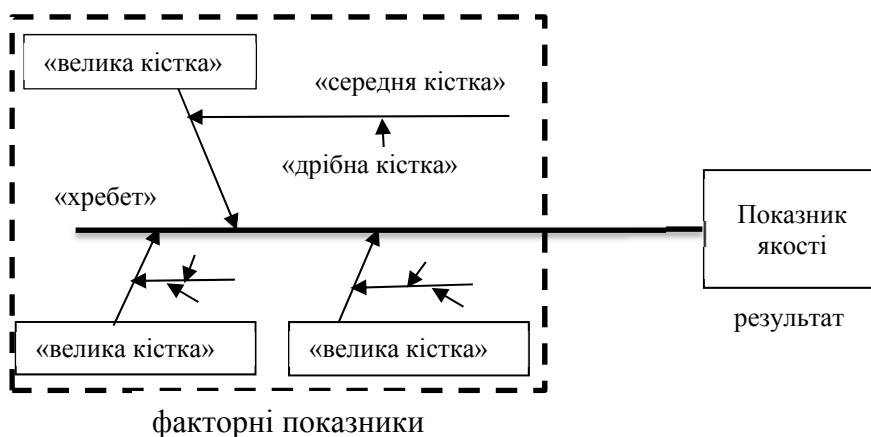


Рис. 2. Діаграма «риб'ячий скелет»

3. Визначаються та записуються головні причини, що впливають на показник якості.

4. Головні причини сполучаються лініями («великими кістками») з «хребтом», основні із цих головних причин розміщуються ближче до голови «риб'ячого скелету».

5. Для вже записаних головних причин визначаються і записуються вторинні причини.

6. Вторинні причини сполучаються з «великими кістками» лініями («середніми кістками»).

7. Треба дотримуватися логічного зв'язку кожного причинного ланцюга.

8. Для закінчення складеної причин і результатів діаграми наноситься необхідна інформація.

Для кожного показника, що підлягає дослідженню, будується окрема діаграма причин і результатів. Обираються такі показники якості і чинники, які можна виміряти. Встановлюється важливість кожної причини на основі об'єктивних значень або даних.

На рис. 3. представлена діаграма «риб'ячий скелет» для виробництва зубчастих коліс редукторів.

На ній зображені етапи технологічного процесу виробництва та фактори, що впливають на його продуктивність та якість деталей, що оброблюються.

При конструюванні зубчастих коліс важливо забезпечені міцність і жорсткість, задля виключення перекосу валів. Посадковий отвір вимагає кілька стадій обробки: розточування чорнове і чистове, шліфування чорнове і чистове. В діаграмі «риб'ячий скелет» представлені фактори, що впливають на якість зубатого колеса, та які можуть стати причиною появи браку. Для контролю впливу перелічених факторів необхідно впровадження протоколів. Застосування протоколів дає можливість провести оцінку якості обробки деталей даного типу на всіх стадіях виробничого циклу.

Точність деталей. Одним з показників якості виробу є точність обробки деталей, що характеризується полем допуску на оброблюваний розмір або параметр, що визначає форму. Відхилення від вимог точності визначається як брак, а деталь з відхилен-

ням від вимог точності вважається бракованою. При виготовленні великої кількості деталей у виробництві особливо важливо забезпечити максимальний вихід продукції без браку і звести браку до нуля. Брак та відхилення від стандарту є перешкодами, що заважають підвищенню ефективності виробництва.

Прогнозування проценту браку важливе завдання при впровадженні нових технологій виробництва. Для оцінки точності і ймовірного відсотка браку в партії деталей застосовуються методи математичної статистики і теорії ймовірностей. Вони є важливою складовою частиною системи управління якістю в інженерному консалтингу.

Однією з основних задач математичної статистики є розробка методів вивчення масових явищ або процесів на основі порівняно невеликої кількості випробувань. Ці методи мають своє наукове обґрунтування, яке називають теорією вибірок.

При проведенні інженерного консалтингу найчастіше використовуються такі методи, як аналіз точності механічної обробки за допомогою побудови кривих розподілу (метод великих вибірок) та аналіз точності механічної обробки за допомогою точкових діаграм.

Статистичний аналіз точності механічної обробки.

В машинобудуванні статистичні методи широко використовуються для оцінювання точності обробки деталей у діючому технологічному процесі, прогнозування браку, контролю якості продукції і розв'язання інших технологічних задач переважно серійного і масового виробництва.

Для того, щоб за знайденим розподілом розмірів вибірки спрогнозувати результати обробки заготовок, які складають генеральну сукупність, потрібно знайдений (емпіричний) закон розподілу замінити теоретичним законом, який за формою був би близьким до емпіричного [19].

Залежно від технологічних умов, розміри оброблених заготовок можуть підпорядковуватися різним законам розподілу. В технології машинобудування практичне застосування мають такі закони:

- нормального розподілу (закон Гаусса);
- рівнобедреного трикутника (закон Сімпсона);

- закон рівної імовірності;
- ексцентриситету (закон Релея).

Встановлено, що емпіричний розподіл розмірів заготовок, оброблених на настроєному верстаті, найчастіше є близьким до закону нормального розподілу (the law of normal distribution) [19]. Рівняння диференціальної кривої нормального розподілу має такий вид:

$$y(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

де y – теоретична щільність розподілу; \bar{x} – середнє значення розміру x ; σ – середнє квадратичне відхилення випадкової величини (розміру x); $e = 2,718$ – основа натуральних логарифмів.

Закону нормального розподілу відповідає, Крива Гауса показана на рис. 4. Аналіз рівняння (1) показує, що крива нормального розподілу симетрична відносно ординати точки $x = \bar{x}$ та має максимум у точці:

$$y_{\max} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \approx \frac{0,4}{\sigma}$$

Прогнозування відсотку браку. Практичними задачами інженерного консалтингу на підприємстві є із застосування методів статистичного аналізу провести оцінку точності процесу виготовлення деталі в цілому або на окремих операціях і виявлення кількості бракованих деталей; виявлення раціонального рівня настройки технологічного процесу; оцінку стабільності або стійкості процесу виготовлення; встановлення економічно досяжних допусків на остаточні розміри деталей або на інші ознаки якості; виявлення впливу різних чинників на кінцевий результат процесу виготовлення або контролю.

Для вирішення цих завдань було проведено статистичний аналіз даних розмірів центрових отворів зубатих коліс редукторів номінальним розміром $\varnothing 50H7^{(+0,025)}$ об'ємом 50 штук. Для аналізу відібрана вибірка послідовно оброблених заготовок об'ємом 50 штук. Дані вимірювань розмірів у вибірках наведено у таблиці 1.

Визначимо емпіричне поле розсіювання ΔL досліджуваного розміру L , тобто інтервал, у якому знаходяться всі дійсні значення L :

$$\Delta L = L_{\max} - L_{\min},$$

де L_{\max} , L_{\min} – максимальний і мінімальний експериментально певні розміри.

$$\Delta L = 50,029 - 49,98 = 0,049$$

Таблиця 1

Дані вимірювань

№ деталі у виборці	Вибірка 1	Вибірка 2	Вибірка 3	Вибірка 4	Вибірка 5
1	49,994	50,029	50,025	50,008	50,004
2	50,02	50	50,015	50,005	50
3	50,015	50,005	50,005	50,005	49,992
4	50	50	49,99	50,006	50,004
5	49,99	50,008	50,009	50,015	50,009
6	50	50,007	50,025	49,995	50,002
7	49,98	49,992	50,002	50,001	50,008
8	50,012	50,001	50,01	50,012	50
9	50,02	50,005	50,003	50,002	50,003
10	50,01	50,02	50,02	50,012	50,002

Далі поле розсіювання розбиваємо на певну кількість інтервалів k (найчастіше $k = 7 \dots 11$) і визначаємо ширину інтервалу Δ за формулою:

$$\Delta = \frac{\Delta L}{k}$$

Прийнявши $k = 7$, отримаємо:

$$\Delta = \frac{0,049}{10} = 0,005$$

Число однакових або близьких вимірних значень розмірів, з'єднаних в одну з k груп, називається частотою n_k . Частота, виражена в частках або відсотках від загальної кількості об'єктів досліджуваної сукупності, називається частістю ω_k :

$$\omega_k = \frac{n_k}{p},$$

де k – число груп (інтервалів) розмірів; p – число деталей в партії (вибірці).

Знаходимо середній розмір партії:

$$\bar{L} = \frac{L_1 + L_2 + \dots + L_p}{p},$$

де L_i – вимірні розміри деталі;

p – кількість деталей.

$$\bar{L} = 50,00594 \text{ мм}$$

Результати розрахунків та поділу вибірки на групи наведено в таблиці 2.

Середнє квадратичне відхилення σ , мм, згідно з таблицею 1, для всіх розмірних груп складо:

Таблиця 2

Вихідні дані і результати розрахунку для побудови кривих фактичного і нормального розподілу

№ групи	Інтервал розмірів в групі, L_i , мм		Число однакових або близьких значень розмірів у виборці, n_k	Середній розмір групи (в інтервалі), L_k	Частота повторення вимірюваних розмірів, виражена в частках від загальної кількості, ω_k	Добуток даних за графіками, $n_k L_k$	Відхилення середнього розміру групи від середнього арифметичного, $L_k - L$, мм	Квадратичне відхилення середнього розміру групи від середнього арифметичного, $(L_k - L)^2$, мм ²	Добуток квадратичного відхилення на число деталей в розмірній групі, $(L_k - L)^2 n_k$, мм ²
	L_{\min}	L_{\max}							
1	49,98	49,985	1	49,9825	2	49,9835	-0,0234	0,000549	0,000549
2	49,985	49,99	2	49,9875	4	149,9715	-0,0184	0,000340	0,00068
3	49,99	49,995	4	49,9925	8	399,98	-0,0134	0,000181	0,000723
4	49,995	50	6	49,9975	12	1100,099	-0,0084	0,000071	0,000427
5	50	50,005	15	50,0025	30	400,092	-0,0034	0,000012	0,000178
6	50,005	50,01	9	50,0075	18	250,0925	0,0016	0,000002	2,19E-05
7	50,01	50,015	6	50,0125	12	150,0765	0,0066	0,000043	0,000258

$$\sigma = \sqrt{\frac{(L_1 - \bar{L})^2 + (L_2 - \bar{L})^2 + \dots + (L_p - \bar{L})^2}{p}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{0,005377}{50}} = 0,01 \text{ мм}$$

Таблиця 3

Характерні точки кривої Гауса

Номер точки	$L_k - \bar{L}$	$L_k - \bar{L}$	n_k	n_k
1	$L_1 = -3\sigma$	-0,03078	$n_1 = 0$	0
2	$L_2 = -2\sigma$	-0,02052	$n_2 = 0,05 / \sigma$	4,821612
3	$L_3 = -\sigma$	-0,01026	$n_3 = 0,24 / \sigma$	23,14374
4	$L_4 = 0$	0	$n_3 = 0,4 / \sigma$	38,5729
5	$L_4 = \sigma$	0,01026	$n_3 = 0,24 / \sigma$	23,14374
6	$L_2 = 2\sigma$	0,02052	$n_2 = 0,05 / \sigma$	4,821612
7	$L_5 = 3\sigma$	0,03078	$n_1 = 0$	0

Теоретична крива розподілу (крива Гауса), будується використовуючи координати п'яти її характерних точок, наведених у таблиці 3.

Для визначення ймовірного відсотка браку при виготовленні партії деталей в межах допуску на розмір застосовують побудову кривої нормального розподілу за законом Гауса за даними вимірювання одного і того ж розміру L в партії з числом деталей p і накладають на неї поле допуску δ на розмір L , як показано на рис. 4.

Для методу визначення ймовірних показників браку зобразимо криву нормального розподілу з накладеним полем допуску δ , як показано на рис. 2, звідси видно, що всі деталі вибірки (за розміром L), що знаходяться в полі допуску (площа F_2), є придатними, а деталі, які потрапляють в поле F_1 і F_3 , є бракованими.

Для охоплюваного розміру (діаметр і довжина валу, товщина пластини і т.п.) брак вважається невірним, якщо фактичний розмір L_{\min} буде менше

L_{\min}^δ з урахуванням нижнього відхилення поля допуску і відсоток браку може бути визначений за площею F_1 , а відсоток невірного браку при $L_{\max} > L_{\max}^\delta$ визначається по площі F_3 .

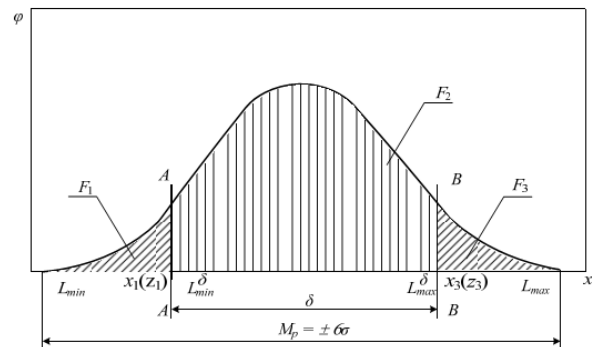


Рис. 4. Визначення ймовірного відсотка браку в партії (вибірці) деталей:

F_1 – площа, яка визначає процент браку при $L_{\text{експ}} < L_{\min}$;

F_2 – площа, яка визначає відсоток придатних деталей в партії (в межах поля допуску);

F_3 – площа, яка визначає відсоток браку при $L_{\text{експ}} > L_{\max}$;

M_p – поле розсіювання;

δ – поле допуску за кресленням;

$L_{\min}^\delta, L_{\max}^\delta$ – мінімальний і максимальний розміри деталей з урахуванням поля допуску.

Для охоплюючого розміру (діаметр отвору, ширина паза і т.п.) невірний брак матиме місце при $L_{\max} > L_{\max}^\delta$, тобто він визначається площею F_3 , а вправний брак виникає при $L_{\min} < L_{\min}^\delta$ і визначається площею F_1 .

Таким чином, для знаходження значень вправного, придатного і невірного браку у відсотках необхідно в першу чергу, обчислити площі F_1, F_2 і F_3

і по ним розрахувати відсоток бракованих і придатних деталей:

$$P_1 = \frac{F_1}{F_1 + F_2 + F_3} \cdot 100\% ,$$

$$P_2 = \frac{F_2}{F_1 + F_2 + F_3} \cdot 100\% ,$$

$$P_3 = \frac{F_3}{F_1 + F_2 + F_3} \cdot 100\%$$

Значення F_1 , F_2 і F_3 можуть бути визначені шляхом інтегрування теоретичної залежності $\varphi(x)$ в межах $L_{\min} - L_{\min}^{\delta}$, $L_{\min}^{\delta} - L_{\max}^{\delta}$ та $L_{\max}^{\delta} - L_{\max}$. Відповідно ця робота може бути виконана з використанням системи комп'ютерної математики, наприклад Matlab, або табличним шляхом із застосуванням таблиць значень модифікованої функції $\varphi(x)$ у вигляді $\Phi(z)$, де z – перетворена координата x , визначена зі співвідношення:

$$z = \frac{L^{\delta} - \bar{L}}{\sigma}$$

Для знаходження виправного і невиправного браку необхідно знайти координати z_1 і z_3 , що ви-

значають для функції $\Phi(z)$ межі поля допуску. Вони обчислюються за формулами:

$$z_1 = \left| \frac{L_{\min}^{\delta} - \bar{L}}{\sigma} \right| ,$$

$$z_3 = \left| \frac{L_{\max}^{\delta} - \bar{L}}{\sigma} \right|$$

В даному випадку:

$$z_1 = 1,9$$

$$z_3 = 2,5$$

За знайденим значенням z_1 і z_3 , з допомогою таблиць шляхом інтерполяції визначаються значення функцій Φ_1 і Φ_3 :

$$\Phi_1(z) = 0,4713$$

$$\Phi_3(z) = 0,4938$$

Відсоток можливого браку знаходиться зі співвідношень:

$$P_{\text{випр}} = (0,5 - \Phi_1) \cdot 100\% ,$$

$$P_{\text{невипр}} = (0,5 - \Phi_3) \cdot 100\%$$

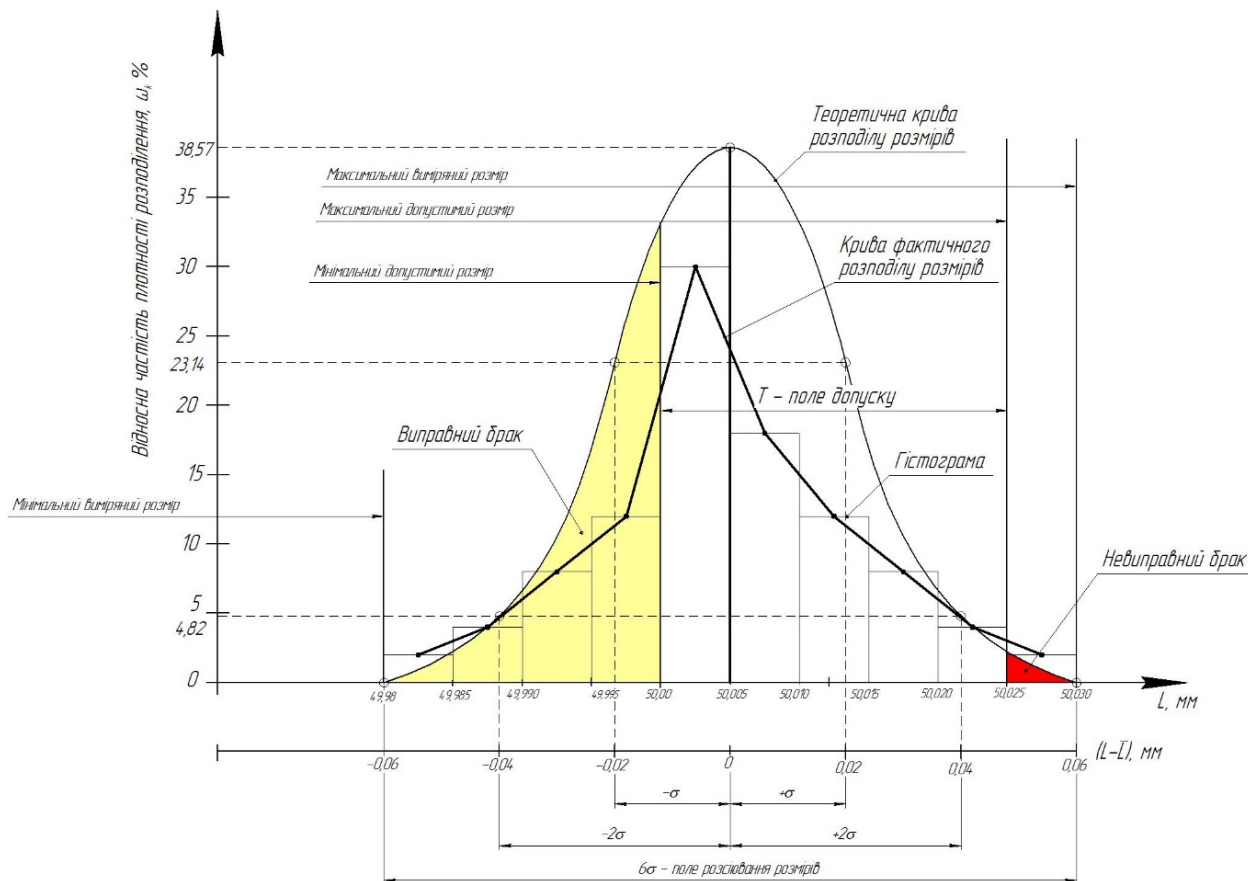


Рис. 5. Результати розрахунків

де $P_{випр}$, $P_{невипр}$ – відсоток можливого браку виправного і невивиправного, %.

У даному випадку відсоток браку дорівнює:

$$P_{випр} = (0,5 - 0,4713) \cdot 100\% = 2,87\%,$$

$$P_{невипр} = (0,5 - 0,4938) \cdot 100\% = 0,62\%$$

Відсоток придатних деталей $P_{пр}$ визначається за формулою:

$$P_{пр} = 100 - P_{іспр} - P_{неіспр}$$

$$P_{пр} = 100 - 2,87 - 0,62 = 96,51\%$$

Геометрично $P_{випр}$ є площа F_1 , яка обмежена кривою нормального розподілу, віссю x і прямою АА, а $P_{невипр}$ – площа F_3 , яка обмежена кривою нормального розподілу, віссю x , і прямою ВВ, як показано на рис. 4. Площа F_2 під кривою нормального розподілу являє собою відсоток деталей в партії, виготовлених без браку.

Із проведених розрахунків та побудованої кривої Гауса (рис. 5) отримуємо значення придатних деталей – 96,51%, виправного браку – 2,87%, невивиправного браку – 0,62%.

Проаналізувавши отриманий відсоток браку потрібно зробити висновок, щодо ефективності виробничого процесу та якості отримуваних деталей. У випадку незадовільних показників потрібно знайти етапи технологічного процесу, на якому виникли відхилення від точності, та фактори, що призвели до появи браку. Для цього доцільно використовувати діаграму причин та результатів «риб'ячий скелет», яка враховує вплив факторів.

Рекомендаціями по підвищенню точності обробки є збільшення точності верстатного обладнання, заміна зношеного інструменту, підвищення кваліфікації персоналу.

Висновки. Розглянуто нову сферу діяльності – інженерний консалтинг, що забезпечує конкурентні переваги підприємствам за рахунок ефективної організації виробництва машинобудівної продукції.

Проаналізовано методи інженерного консалтингу у системі забезпечення якості виробів машинобудування. Надано рекомендації щодо аналізу факторів, які впливають на якість виробів за допомогою побудови діаграми причин та результатів – «риб'ячий скелет».

Представлена діаграми причин та результатів «риб'ячий скелет» для виробництва зубчатих коліс редукторів.

Запропоновано використання статистичних методів аналізу даних для дослідження якості виробів у інженерному консалтингу. Розглянуто методику статистичного аналізу точності механічної обробки.

Проведено прогнозування проценту браку при механічній обробці партії зубчастих коліс редукто-

рів з номінальним розміром $\varnothing 50H7^{(+0,025)}$ мм при великосерійному та масовому виробництві.

Розвиток інженерного консалтингу, як набору програмно-технічних і методичних засобів забезпечення процесів формування і реалізації організаційно-технічних рішень по впровадженню новітніх технологій забезпечує гарантоване досягнення високих результатів щодо якості виробів, витрат на їх виробництво та термінів виведення нових виробів на ринок.

Література

1. Соколов В.І., Кріль О.С., Спіфанова О.В. Гідравліка. Северодонецьк: СНУ ім. В. Даля, 2017. 160 с.
2. Sokolov, V., Krol, O., Baturin, Y.: Dynamics Research and Automatic Control of Technological Equipment with Electrohydraulic Drive. 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE (2019). DOI: <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867652>.
3. Sokolov, V.: Transfer functions for shearing stress in non-stationary fluid friction. In: Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 707-715. Springer, Cham (2020). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22041-9_76.
4. Кріль О.С. Параметрическое моделирование металлорежущих станков и инструментов. Монография. Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2012. 116 с.
5. Krol O., Sokolov V. Parametric modeling of machine tools for designers. Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. 112 p. DOI: <https://doi.org/10.7546/PMMTD.2018>
6. Krol O.S., Sokolov V.I. 3D Modeling Of Machine Tools For Designers. Sofia: Prof. Marin Drinov Academy Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. 140 p. DOI: https://doi.org/10.7546/3D_momtfd.2018
7. Krol O., Sokolov V. Modeling of carrier system dynamics for metal-cutting machines. *IEEE Proceedings 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 2018. P. 1–5.
8. Мицьк А.В., Федорович В.А. Пути интенсификации вибрационной отделочно-зачистной обработки комбинированием схем энергетических воздействий на рабочую среду и детали. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2011, № 6 (83). С. 26 – 34.
9. Міщик А.В., Федорович В.О. Оцінка ефективності вібраційної оздоблювально-зачишувальної обробки у резервуарах з мультиенергетичним впливом і різною формою поперечного перерізу. Різання та інструмент в технологічних системах: Міжнар. наук.-техн. зб. Харків: НТУ «ХП», 2019. Вип. 90. С. 51 – 63.
10. Міщик А.В., Федорович В.О. Методичні основи теоретичного та експериментального оцінювання процесу віброобробки деталей технологічними системами комбінованого динамічного впливу вільного абразивного середовища. Різання та інструмент в технологічних системах: Міжнар. наук.-техн. зб. Харків: НТУ «ХП», 2019. Вип. 89. С. 100 – 108.
11. Мицьк А.В., Федорович В.А. Аналітика, коментаріи и классификация технологий отделочно-зачистной виброобработки, созданных комбинированием различных схем энергетического воздействия. *Сучасні технології в машинобудуванні*. Харків: НТУ «ХП», 2016. Вип. 11. С. 175 – 189.

12. Kundrák J., Mitsyk A.V., Fedorovich V.A., Morgan M., Markopoulos A.P. The Use of the Kinetic Theory of Gases to Simulate the Physical Situations on the Surface of Autonomously Moving Parts During Multi-Energy Vibration Processing. *Materials* Vol. 12 (19), p. 1 – 26, (2019). DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12193054>
13. Кріль О.С. Методи і процедури динаміки шпіндельних узлів: Монографія. Луганськ: ВНУ ім. В. Даля, 2014. 154 с.
14. Харламов Ю.А., Соколов В.И., Кріль О.С. Трибологічна надежність металорежущих станків. Северодонецьк: ВНУ ім. В. Даля, 2017. 320 с.
15. Кріль О.С., Хмеловський Г.Л. Оптимізація і управління процесом різання: учебное пособие. Київ: УМК ВО, 1991. 140 с.
16. Кріль О.С., Соколов В.И. Методи і процедури інженерного прогнозування в станкостроєнні. Северодонецьк: ВНУ ім. В. Даля, 2017. 116 с.
17. Бирбраер Р.А., Альтшулер И.Г. Основы инженерного консалтинга. М.: Дело, 2011, 232 с.
18. Хитосе Кумэ. Статистические методы повышения качества. М.: Финансы и статистика, 1990. 304 с.
19. Дерібо О.В. Основы технології машинобудування. Частина 1: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2013. 125 с.

References

1. Sokolov V., Krol O., Yepifanova O. *Hydraulics*. Severodonetsk: V. Dahl EUNU, 2017. 160 s.
2. Sokolov, V., Krol, O., Baturin, Y.: Dynamics Research and Automatic Control of Technological Equipment with Electrohydraulic Drive. 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE (2019). DOI: <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867652>.
3. Sokolov, V.: Transfer functions for shearing stress in non-stationary fluid friction. In: Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 707-715. Springer, Cham (2020). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22041-9_76.
4. Krol O.S. Parametricheskoe modelirovanie metallorezhushchih stankov i instrumentov. Monografiya. Lugansk: SNU im. V. Dallya, 2012. 116 s.
5. Krol O., Sokolov V. Parametric modeling of machine tools for designers. Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. 112 p. <https://doi.org/10.7546/PMMTD.2018>
6. Krol O.S., Sokolov V.I. 3D Modeling Of Machine Tools For Designers. Sofia: Prof. Marin Drinov Academy Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. 140 p. https://doi.org/10.7546/3D_momtfd.2018
7. Krol O., Sokolov V. Modeling of carrier system dynamics for metal-cutting machines. *IEEE Proceedings 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 2018. P. 1–5.
8. Mitsyk A.V., Fedorovich V.A. Puti intensivatsii vibratsionnoy otdelochno-zachistnoy obrabotki kombinirovaniem shem jenergeticheskikh vozdeystvij na rabochuju sredu i detali // *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*. 2011. № 6. s. 26 – 34.
9. Mitsyk A.V., Fedorovich V.O. Ocinka effektivnosti vibratsionnoy ozdobljuval'no-zachishhuval'noy obrabotki u rezervuarah z mul'tienergetichnim vplivom i riznoju formuju poperechnogo prerizu. Rizannja ta instrument v tehnologichnih sistemah: Mizhnar. nauk.-tehn. zb. Kharkiv: NTU «KPI», 2019. Vip. 90. S. 51 – 63.
10. Mitsyk A.V., Fedorovich V.O. Metodichni osnovi teoretichnogo ta eksperimental'nogo ocinjuvannja procesu vibroobrobki detalej tehnologichnimi sistemami kombinovanogo dinamichnogo vplivu vil'nogo abrazivnogo seredovishha. Rizannja ta instrument v tehnologichnih sistemah: Mizhnar. nauk.-tehn. zb. Kharkiv: NTU «KPI», 2019. Vip. 89. S. 100 – 108.
11. Mitsyk A.V., Fedorovich V.O. Analitika, komentarii i klassifikacija tehnologij otdelochno-zachistnoj vibroobrobki, sozdannyh kombinirovaniem razlichnyh shem jenergeticheskogo vozdeystvija. *Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni* Kharkiv: NTU «KPI», 2016. Vip. 11. S. 175 – 189.
12. Kundrák J., Mitsyk A.V., Fedorovich V.A., Morgan M., Markopoulos A.P. The Use of the Kinetic Theory of Gases to Simulate the Physical Situations on the Surface of Autonomously Moving Parts During Multi-Energy Vibration Processing. *Materials* Vol. 12 (19), p. 1 – 26, (2019). <https://doi.org/10.3390/ma12193054>
13. Birbraer R.A., Al'tshuler I.H. *Osnovy inzhenernoho konsal'tynhu*. M.: Sprava, 2011, 232 s.
14. Krol O.S. *Metody i protsedury dinamiki shpindelnyh uzlov*: Monografiya. Lugansk: VNU im. V. Dallya, 2014. 154 s.
15. Harlamov Yu.A., Sokolov V.I., Krol O.S. *Tribologicheskaya nadezhnost metallorzechushchih stankov*. Severodonetsk: VNU im. V. Dallya, 2017. 320 s.
16. Krol O.S., Hmelovskiy G.L. *Optimizatsiya i upravlenie protsessom rezaniya*: uchebnoe posobie. Kyiv: UMK VO, 1991. 140 s.
17. Krol O.S., Sokolov V.I. *Metody i protsedury inzhenernogo prognozirovaniya v stankostroenii*. Severodonetsk: VNU im. V. Dallya, 2017. 116 s.
18. Khitosi Kume. *Statystichni metody pidvyshchennya yakosti*. M.: Finansy i statystyka, 1990. 304 s.
19. Deribo O.V. *Osnovy tekhnolohiyi mashinobuduvannya*. Chastyna 1: navchal'nyy posibnyk. Vinnytsya: VNTU, 2013. 125 s.

Николаенко А.П., Шумакова Т.А. Инженерный консалтинг в системе обеспечения качества изделий

Статья посвящена возможностям применения инженерного консалтинга, как метода достижения конкурентоспособности машиностроительных производств. Показана необходимость использования гибких современных подходов к управлению производственными процессами при переходе на новые технологии для гарантированного достижения высоких результатов по качеству изделий, затрат на их производство и сроков вывода новых изделий на рынок. Проанализированы возможности инженерного консалтинга, как новой области деятельности, на всех этапах жизненного цикла изделий машиностроения. Рассмотрены вопросы обеспечения качества изделий, их точности. Предложено диаграмму «Причин и результатов», как метода исследования факторов, влияющих на точность. Показана важность прогнозирования процента брака при внедрении новых технологий и возможности использования для этого статистических методов.

Ключевые слова: инженерный консалтинг, жизненный цикл изделий, прогнозирования процента брака, точность, статистические методы, диаграмма «Причин и результатов»

Nikolaienko A.P., Shumakova T.O. Engineering consulting in the product quality assurance system

The article is devoted to the possibilities of using engineering consulting as a method of achieving machine-building industries competitiveness. The necessity of using flexible modern approaches to management of production processes at transition to new technologies for guaranteed achievement of high results concerning products quality, expenses for their manufacture and terms of introduction of new products on the market is shown. Possibilities of engineering consulting at all stages of the life cycle of mechanical engineering products are analyzed. Engineering consulting is a new field of activity that integrates the science of mechanical engineering products and the processes of their creation with economic and market theories, as well as methods of organization of production. The purpose of engineering consulting is to manage three key parameters: product quality, product production costs and production times. The issue of product quality assurance, their accuracy is considered. The quality of mechanical engineering products is influenced by many factors, between which there are relations such as «cause – effect». The structure and nature of these multifactorial relationships are determined by systematic observations. The diagram of «Causes and Results» is proposed as a method of studying the factors influencing accuracy. The practical application of engineering consulting methods on the example of production of gears of two - stage cylindrical gearboxes is presented. The importance of applying methods of statistical analysis to solve practical problems of engineering consulting at the enterprise is shown. Namely, to assess the accuracy of the manufacturing process of the part as a whole or in individual operations and identify

the number of defective parts; identification of a rational level of technological process adjustment; assessment of the stability or stability of the manufacturing process; establishment of economically achievable tolerances on the final dimensions of parts or other quality features; detection of the influence of various factors on the final result of the manufacturing or control process. The procedure for predicting the percentage of failure in the introduction of new technologies and the possibility of using statistical methods for this example on the example of the production of gears of two-stage cylindrical gearboxes. To determine the probable percentage of defects in the manufacture of a batch of parts within the size tolerance used to construct a curve of normal distribution according to Gauss's law.

Keywords: *engineering consulting, product lifecycle, scrap forecasting, accuracy, statistical methods, «Cause and Effect» chart.*

Ніколаєнко Анна Павлівна – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк)

apnikolaienko@gmail.com

Шумакова Тетяна Олександрівна – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк)

shumakovatania@gmail.com

Стаття подана 01.02.2021 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-108-111>

УДК 66.047

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШКИ ПАСТИ СОРБИНОВОЇ КИСЛОТИ

Ржецька Т.А., Бородіна А.В.

RESEARCH OF THE DRYING PROCESS OF SORBIC ACID PASTE

Rzhetska T.A., Borodina A.V.

У статті приводяться дані порівняльного аналізу якісних характеристик досліджуваних зразків сорбінової кислоти, отриманих в результаті проведення процесу сушіння. Сорбінова кислота знаходить застосування в якості консерванту у виробництвах безалкогольних напоїв, плодово-ягідних соків, хлібопекарських і кондитерських виробів, сирів, напівкопчених ковбас; використовується для обробки пакувальних матеріалів для харчових продуктів, а також в синтезі пластифікаторів, фунгіцидів, мастил, алкідних смол. Дослідження процесу проводилися на пілотних сушильних установках трьох типів: сушарці барабанній роторній вакуумній типу РВ, сушарці «киплячого» шару періодичної дії типу СП і сушарці пневматичній (сушарці-трубі). Приведений опис технологічних схем установок, порядок і режими проведення процесу сушіння. В результаті досліджень і аналізу отриманих результатів надано рекомендації щодо оптимальних варіантів процесу сушіння пасти сорбінової кислоти.

Ключові слова: сорбінова кислота, процес, сушіння, режим, сушарка, якісна характеристика.

Вступ. Вперше сорбінова кислота була отримана Августом Вільгельмом Гофманом в 1859 році з соку горобини, звідси і походить її назва (від лат. Sorbus - горобина). В даний час, зазвичай, отримують з кетена і кротонового альдегіду. У 1939 році була відкрита її антимікробна дія. Тому, сорбінова кислота застосовується в якості консерванту у виробництвах безалкогольних напоїв, плодово-ягідних соків, хлібопекарських і кондитерських виробів, сирів, напівкопчених ковбас і т.д. Використовується для обробки пакувальних матеріалів для харчових продуктів, а також в синтезі пластифікаторів, фунгіцидів, мастил, алкідних смол. Вимоги, що пред'являються до сорбінової кислоти відповідно ТУ 6-14-358-76, наведені в таблиці (зразок 1).

Постановка проблеми. Визначення оптимального температурного режиму процесу сушіння сорбінової кислоти.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оскільки процес сушіння сорбінової кислоти з раніше описаною проблемою мало вивчений, то посилання на тематичні публікації в даній роботі відсутні.

Таблиця

Аналіз зразків сорбінової кислоти відповідно ТУ 6-14-358-76

Найменування показника	Номер зразка									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Зовнішній вигляд	білий кристалічний порошок з кремовим відтінком									
Розчинність	погано розчиняється у воді, добре в етиловому спирті									
Температура начала плавлення, °С	≥130,3	134	135	135	134,6	134,5	135	135	134,8	135,1
Вміст кислих речовин у перерахунку на сорбінову кислоту, %	≥99	99,2	99,2	99,5	99,2	99,4	99,0	99,0	99,0	99,2
Вміст сульфатної золи, %	≤0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Вміст тяжких металів підгрупи свинцю, %	≤0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Масова частка вологи (визначено за ДГСТ 14870-77 методом висушування зразка)	≤0,5	0,13	0,1	0,1	0,15	0,13	0,3	0,17	0,15	0,18

Мета статті. Проведення аналізу отриманих результатів дослідження процесу сушіння пасти сорбінової кислоти та визначення температурного режиму, який буде забезпечувати максимальну продуктивність зі збереженням якісних характеристик і споживчих властивостей висушеного матеріалу; також оптимальних умов, що стабілізують процес, а саме: виключення грудкування, налипання продукту на ротор, стінки сушарок, газоходів і пилеуловлювальної системи; визначення початкових даних для завдань навчального проектування.

Результати досліджень. В якості сировини використовували пасту сорбінової кислоти з масовою часткою води, що дорівнює $(30 \div 45) \%$.

Дослідження процесу проводилися на пілотних сушильних установках трьох типів: сушарці барабанній роторній вакуумній типу РВ, сушарці «киплячого» шару періодичної дії типу СП і сушарці пневматичній (сушарці-трубі).

До складу технологічної схеми барабанної роторної вакуумної сушарки типу РВ входить сушильна камера об'ємом $0,005 \text{ м}^3$, яка забезпечується гребковою мішалкою з частотою обертання 12 об/хв і площею поверхні теплообміну $0,14 \text{ м}^2$. В якості системи уловлювання використовували рукавний фільтр, а також конденсатор-холодильник і збірник конденсату. Для нагрівання теплоносія застосовували термостат. В якості теплоносія використовували масло машинне, температуру якого задавали і підтримували за допомогою контактного термометра. Для створення вакууму застосовували вакуумний насос. Пілотна установка укомплектовується приладами для зміни температур теплоносія, а також регулювання тиску розрідження в сушильній камері.

Технологічна схема сушарки «киплячого» шару періодичної дії типу СП складається з сушильної камери, що представляє собою циліндричну ємність об'ємом $0,012 \text{ м}^3$ з конічним днищем і плоскою кришкою. Діаметр вільного перетину нижньої основи конуса дорівнює 110 мм , діаметр сепараційної зони 250 мм . Кришка сушильної камери оснащується штуцерами для завантаження початкової сировини і виходу пилоповітряної суміші, а також оглядовими вікнами. У нижній частині сушильної камери встановлюється газорозподільна решітка і штуцер для вивантаження висушеного продукту. Для уловлювання пилу сорбінової кислоти застосовували циклон і рукавний фільтр, які сполучалися зі збірниками продукту. Теплоносії до необхідної температури підігрівали в електрокалорифері, а подавали в сушильну камеру за допомогою компресора. Пілотна установка укомплектовується приладами для вимірювання об'ємної витрати і температури теплоносія.

Відмінність технологічної схеми сушарки пневматичної від вищеписаної полягає в заміні сушильної камери трубою, довжина якої дорівнює 4500 мм , а внутрішній діаметр 32 мм . Нижня частина труби оснащується штуцером для сполучення з живильником.

Складальні одиниці і деталі сушильних камер описаних пілотних установок, які дотикаються з висушуваним матеріалом, виготовлені з нержавіючої сталі марки 12Х18Н10Т.

Процес сушіння пасти сорбінової кислоти проводили наступним чином.

Барабанну роторну вакуумну сушарку перед експериментом випробували на герметичність і перевіряли наявність теплоносія в баку термостата. На контактному термометрі встановлювали необхідну температуру, включали обігрів і електропривод насоса термостата. Через верхній люк, при працюючій гребковій мешалці, в сушильну камеру завантажували пасту сорбінової кислоти.

Сушарку герметизували, за допомогою вакуумнасоса створювали розрідження рівне $(0,06 \div 0,09) \text{ МПа}$ і подавали воду на охолодження конденсатора-холодильника, в якому відбувалася конденсація парів вологи, що утворювалися в процесі сушіння пасти. Конденсат збирався в збірнику, а пил сорбінової кислоти, який покидав сушарку, затримувався в рукавному фільтрі. Висушений продукт вивантажували через нижній люк. Дослідження процесу сушіння в барабанній роторній вакуумній сушарці типу РВ проводилося при температурному режимі, що дорівнював $(65 \div 90) ^\circ\text{C}$.

Перед експериментом сушарку «киплячого» шару також випробували на герметичність. Після завантаження пасти в сушильну камеру, сушарку герметизували. В якості сушильного агента використовували повітря, яке за допомогою компресора подавали в електрокалорифер для нагрівання до заданої температури, і далі в нижню частину сушильної камери для створення аерованого стану сорбінової кислоти. Витрату теплоносія регулювали так, щоб висушуваний матеріал вище газорозподільної решітки знаходився в стані «кипіння», а винесення висушених частинок з сушильної камери був мінімальним. Відпрацьоване повітря з парами вологи і невеликою кількістю пилу сорбінової кислоти перед викидом в атмосферу для санітарної очистки та уловлювання пилу направляли в рукавний фільтр. Температуру сушильного агента на вході в сушильну камеру підтримували рівною $(70 \pm 2) ^\circ\text{C}$, а інтервали швидкостей теплоносія у вільному перетині газорозподільної решітки рівними $(0,4 \div 2,8) \text{ м/с}$, в сепараційній зоні $(0,1 \div 0,34) \text{ м/с}$.

На установці сушарки пневматичної (сушарці-трубі) в якості сушильного агента також використовували повітря, яке за допомогою компресора подавали в електрокалорифер для нагрівання до заданої температури, і далі в пневматичну трубу. Пасту сорбінової кислоти з бункера живильника дозовано завантажували в нижню частину труби, в якій матеріал захоплювався теплоносієм і транспортувався вгору, в результаті чого відбувався процес сушіння. Утворена пилоповітряна суміш для уловлювання висушеної сорбінової кислоти надходила в циклон. Відпрацьоване повітря, після санітарної очистки в рукавному фільтрі, викидалося в атмосферу. Про-

дукт, уловлюваний в циклоні, збирався в збірнику і, по мірі його наповнення, вивантажувався. Очищення рукавного фільтра проводилося періодично – по мірі забивання пор фільтрувальної перегородки. Експеримент проводили в інтервалі температур сушильного агента на вході в трубу ($85\div 125$) °С і інтервалі швидкостей теплоносія в трубі ($10\div 20$) м/с.

Висновки. Процес сушіння в сушарці типу РВ пасти сорбінової кислоти з масовою часткою вологи 30 % протікає задовільно. Грудкування і налипання продукту на ротор, стінки сушильної камери не відбувається. При сушінні пасти з масовою часткою води 45% відзначено грудкування, заочування висушеного матеріалу в кульки і налипання на ротор. При додатковому викиданні в сушильну камеру скалок грудочки руйнуються, а ротор очищується від продукту частково. Температурний режим процесу в дослідженому інтервалі температур помітного впливу на якість готового продукту не робить. Слідів плавлення висушеного матеріалу не виявлено як в зразках, висушених при температурі 65 °С, так і в зразках, висушених при температурі 90 °С. Вихід продукту становить 99,2 %. Показники якості продукту, отриманого в результаті сушіння в сушарці барабанній роторній вакуумній типу РВ пасти сорбінової кислоти, наведені в таблиці 1 (зразки 2-4).

Процес сушіння пасти з масовою часткою вологи 30 % і 45 % в сушарці «киплячого» шару періодичної дії при працюючій гребковій мішалці в інтервалах швидкостей сушильного агента у вільному перетині газорозподільної решітки ($0,4\div 2,8$) м/с, а в сепараційній зоні ($0,1\div 0,2$) м/с протікає задовільно. При збільшенні швидкості в сепараційній зоні до 0,3 м/с продукт з масовою часткою вологи рівною приблизно 8 % повністю уносився з сушильної камери. Вихід після уловлювання одним циклоном становить 96 %. Інша кількість уловлюється рукавним фільтром. Показники якості продукту, отриманого в результаті процесу сушіння в сушарці «киплячого» шару періодичної дії типу СП пасти сорбінової кислоти і вивантаженого з сушильної камери (зразки 5, 6), а також вивантаженого з циклону (зразок 7), наведені в таблиці.

Процес сушіння в пневматичній сушарці пасти сорбінової кислоти з масовою часткою вологи 30 % в інтервалі швидкостей сушильного агента, що дорівнює ($15\div 18$) м/с, як при температурі (90 ± 5) °С, так і при температурі (120 ± 5) °С протікає задовільно, без грудкування та налипання продукту на стінки труби, а також стінки циклону і газоходів. Процес сушіння пасти з масовою часткою вологи 45 % протікає незадовільно. При швидкості повітря, що дорівнює 10 м/с відбувається налипання частинок матеріалу на стінки труби. При збільшенні швидкості теплоносія до 14 м/с налипання на стінки незначні, але масова частка вологи в продукті після сушки за один цикл при температурі (90 ± 5) °С становила близько 25 %, а при температурі (120 ± 5) °С близько 20%. Продукт з масовою часткою вологи менше 0,5 % було отрима-

но лише після проведення подвійного циклу процесу. Показники якості продукту, отриманого в результаті процесу сушіння в сушарці пневматичній пасти сорбінової кислоти з масовою часткою вологи 30 % при температурах (90 ± 5) °С (зразок 8) і (120 ± 5) °С (зразок 9), а також пасти з масовою часткою вологи 45 % при температурі (120 ± 5) °С двома циклами (зразок 10) наведені в таблиці 1. Слідів плавлення продукту не виявлено, тобто температурний режим в дослідженому інтервалі температур ($85\div 125$) °С помітного впливу на якість готового продукту не робить. Вихід після уловлювання одним циклоном становить 96,4 %. Інша кількість уловлювалася в рукавному фільтрі.

Був проведений мікроскопічний аналіз висушеної сорбінової кислоти. Отриманий порошок являє собою кристали паличкоподібної форми з наступними розмірами і співвідношенням: товщина 4,8 мкм, довжина ($20\div 30$) мкм – 45%, товщина 4,8 мкм, довжина до 20 мкм – 45%; товщина ($16\div 24$) мкм, довжина ($50\div 80$) мкм – 10%.

Таким чином, в результаті проведених досліджень і аналізу отриманих результатів рекомендовано процес сушіння пасти сорбінової кислоти проводити по одному з наступних варіантів.

Варіант 1.

Сушарка барабанна роторна вакуумна типу РВ. Режим процесу: температура теплоносія (машинного масла або води) в сорочці і роторі ($80\div 85$) °С, розрідження в сушильній камері ($0,07\div 0,08$ МПа). На сушіння подавати пасту з масовою часткою вологи не більше 30 %.

Варіант 2.

Сушарка «киплячого» шару періодичної дії типу СП. Режим процесу: температура сушильного агента (повітря) на вході в сушарку (70 ± 2) °С. Швидкість теплоносія в вільному перерізі газорозподільної решітки ($1,1\div 1,2$) м/с, в сепараційній зоні ($0,1\div 0,2$) м/с.

Варіант 3.

Сушарка пневматична. Режим процесу: температура сушильного агента (повітря) на вході в трубу ($85\div 90$) °С, швидкість теплоносія в трубі ($15\div 18$) м/с.

Л і т е р а т у р а

1. Сушильные аппараты и установки. Каталог ЦИНТИ ХимНефтеМаш, М., 1988.
2. Типовая инструкция по мерам безопасности при проектировании и эксплуатации установок сушки органических продуктов анилинокрасочной промышленности. М., 1983.
3. ОСТ 26-01-130-81. Сушилки роторные барабанные вакуумные во взрывозащищенном исполнении. Общие требования безопасности.
4. Сажин Б.С. Основы техники сушки. М.: Химия, 1984. 320 с.
5. Овчарова Т.П., Засосов В.А., Бабичева О.Н. Применение сорбиновой кислоты в пищевой промышленности. М.: Химия, 1960. 368 с.
6. Икрина М.А., Симонов В.Д. Сорбиновая кислота и ее производные. М.: Химия, 1977. 184 с.

References

1. Drying apparatus and installations. Catalog CISTS ChemOilMach, M., 1988.
2. Standard instruction on safety measures in the design and operation of drying plants for organic products of the aniline paint industry. M., 1983.
3. IST 26-01-130-81. Rotary drum vacuum dryers in explosion-proof design. General safety requirements.
4. Sazhin B.S. Drying Technique Basics. M.: Chem, 1984. 320 p.
5. Ovcharova T.P., Zasosov V.A., Babicheva O.N. The use of sorbic acid in the food industry. M.: Chem, 1960. 368 p.
6. Ikrina M.A., Simonov V.D. Sorbic acid and its derivatives. M.: Chem, 1977. 184 p.

Ржецкая Т.А., Бородина А.В. Исследование процесса сушки пасты сорбиновой кислоты

В статье приводятся данные сравнительного анализа качественных характеристик исследуемых образцов сорбиновой кислоты, полученных в результате проведения процесса сушки. Сорбиновая кислота находит применение в качестве консерванта в производствах безалкогольных напитков, плодово-ягодных соков, хлебобулочных и кондитерских изделий, сыров, полукопченых колбас; используется для обработки упаковочных материалов для пищевых продуктов, а также в синтезе пластификаторов, фунгицидов, масел, алкидных смол. Исследование процесса проводилось на пилотных сушильных установках трех типов: сушилке барабанной роторной вакуумной типа РВ, сушилке «кипящего» слоя периодического действия типа СП и сушилке пневматической (сушилке-трубе). Приводятся описание технологических схем установок, порядок и режимы проведения процесса сушки. В результате исследований и анализа полученных результатов даны рекомендации относительно оптимальных вариантов процесса сушки пасты сорбиновой кислоты.

Ключевые слова: сорбиновая кислота, процесс, сушка, режим, сушилка, качественная характеристика.

Rzhetska T.A., Borodina A.V. Research of the drying process of sorbic acid paste

The article presents the data of the comparative analysis of the qualitative characteristics of the studied samples of sorbic acid obtained as a result of the drying process. Sorbic acid is used as a preservative in the productions of soft drinks, fruit juices, bakery and confectionery products, cheeses, semi-smoked sausages; used for processing packaging materials for food, as well as in the synthesis of plasticizers, fungicides, lub-

ricants, alkyd resins. Studies of the process were carried out on pilot drying units of three types: dryer drum rotary vacuum type RV, dryer «fluidized bed» of periodic action type FB and dryer pneumatic (pipe dryer). The assembly units and parts of the drying chambers of the described pilot installations, which come into contact with the material to be dried, are made of stainless steel. A detailed description of the technological schemes of installations, the procedure and modes of carrying out the drying process is given. Sorbic acid paste with a mass fraction of water equal to (30÷45) % was used as a raw material. In a rotary drum vacuum dryer, machine oil and water were used as a heat carrier. In dryer «fluidized bed» of periodic action type FB and dryer pneumatic (pipe dryer), air was used to dry the sorbic acid paste. At the end of the drying process, a microscopic analysis of the dried sorbic acid was carried out. The resulting powder is rod-shaped crystals with the following dimensions and ratio: thickness 4,8 microns, length (20÷30) microns – 45 %, thickness 4,8 microns, length up to 20 microns – 45 %; thickness (16÷24) microns, length (50÷80) microns – 10 %. As a result of research and analysis of the results obtained, recommendations were made regarding the optimal options for the drying process of sorbic acid paste, namely: in a dryer drum rotary vacuum temperature of the coolant in the shirt and rotor (80÷85) 0C, vacuum in the drying chamber (0.07÷0.08 MPa), for drying, serve the paste with a mass fraction of moisture no more than 30 %; in a dryer «fluidized bed» of periodic action, maintain the temperature of the drying agent at the inlet equal to (70±2) 0C, the speed of the coolant in the free section of the gas distribution grid is (1,1÷1,2) m/s, in the separation zone (0,1÷0,2) m/s; in the dryer pneumatic, the temperature of the drying agent (air) at the inlet to the pipe is maintained at (85÷90) 0C, the speed of the coolant in the pipe is (15÷18) m/s.

Key words: sorbic acid, process, drying, mode, drying, quality characteristics.

Ржецька Тетяна Анатоліївна – старший викладач кафедри машин та апарати хімічних виробництв, інститут хімічних технологій (м. Рубіжне), Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, ya0731t@gmail.com

Бородіна Антоніна Володимирівна. – к.х.н., доц., доцент, кафедри машин та апарати хімічних виробництв, інститут хімічних технологій (м. Рубіжне), Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

Стаття подана 16.01.2021 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-112-116>

УДК 697

ДИФУЗИЯ КРУГОВОГО ДЖЕРЕЛА В КАНАЛАХ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ

Соколов В.І.

Circular Source Diffusion in Channels of Ventilation Systems

Sokolov V.I.

Розглядається питання вимірювання концентрації домішки в газоповітряних потоках в каналах промислових вентиляційних систем. Для визначення місцеположення датчика, що відповідає середньої концентрації домішки, вирішується задача про дифузію в потоці плоского кругового джерела. В циліндричній системі координат представлено рівняння дифузії в осесиметричному потоці. На основі аналізу аналітичного рішення показано, що рівномірна концентрація встановлюється на відстані 30 і більш діаметрів каналу від місця викиду домішки. У разі, коли не можна реалізувати дані вимоги, рекомендується розміщувати датчик концентрації на відстані 0.62 радіусу труби від її осі.

Ключові слова: промислові викиди, вентиляційна система, газоповітряний потік, домішка, концентрація.

Постановка проблеми. Ведення багатьох технологічних процесів [1-5] в атомній енергетиці, хімічній, нафтопереробній, гірничодобувній промисловості та інших галузях народного господарства супроводжується викидами в атмосферу шкідливих для здоров'я людини та довкілля відходів виробничої діяльності, які здійснюються вентиляційними системами. Крім того, промислові викиди обумовлені необхідністю підтримки санітарно-гігієнічних норм, що вимагаються до виробничих приміщень. Тому від точності контролю складу і об'єму викидів багато в чому залежить як здоров'я людини, так й екологічна ситуація [6-10]. Достовірний контроль параметрів промислових викидів дозволяє раціонально вирішувати питання планових заходів з модернізації вентиляційних систем та корекції технологічних процесів, запобігати аварійним ситуаціям, розробляти програми з підвищення екологічної безпеки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У більшості випадків викид шкідливих компонентів здійснюється централізованою подачею у вихідну вентиляційну трубу, де організується пробовідбір газоповітряного середовища для виміру концентра-

ції домішки [11-15]. Оскільки рівномірна концентрація домішки по перетину труби встановлюється на певній відстані від місця викиду, важливо знати місце установки датчика концентрації, яке достовірно визначає середню концентрацію домішки в газоповітряному потоці. Для розрахунку параметрів і характеристик газоповітряних потоків каналів вентиляційних систем можливо використовувати відомі теоретичні підходи [16-20].

У тих випадках, коли неможлива організація контролю на необхідній відстані від міста викиду, підвищити точність виміру можна встановленням датчика в точці перетину каналу, де дійсна концентрація відповідає середньому значенню. Для досягнення цього необхідно вирішити задачу о дифузії плоского кругового джерела радіуса r_k в турбулентному потоці в круглій циліндричній трубі радіуса r_0 , яка являється типовою для вентиляційних систем енергоблоків атомних станцій, хімічних виробництв тощо [21-26].

Мета статті. Метою статті являється розробка рекомендацій для виміру концентрації домішки в газоповітряних потоках в каналах вентиляційних систем.

Матеріали та результати дослідження. В циліндричній системі координат (r - радіус, x - осьова координата) рівняння турбулентної дифузії [16, 26] в осесиметричному потоці представляється наступним чином

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_x \frac{\partial C}{\partial x} + u_r \frac{\partial C}{\partial r} = f(x, r, t) + D_t \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} \right), \quad (1)$$

де C – концентрація; t – час; u_x , u_r – осьова і радіальна складові швидкості; D_t – коефіцієнт турбулентної (вихрової) дифузії; $f(x, r, t)$ – функція об'ємної густини потужності джерел домішки.

Прийmemo допущення, що швидкість потоку постійна за напрямом та величиною, яка дорівнює середній швидкості потоку u_0 ,

$$u_x = u_0; \quad u_r = 0. \quad (2)$$

Отже, маємо наступне рівняння дифузії

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_0 \frac{\partial C}{\partial x} = f(x, r, t) + D_t \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} \right). \quad (3)$$

Гранична умова до даного рівняння витікає з вимоги відсутності проникнення домішки скрізь стінки труби та зводиться до рівності нулю нормальної похідної на границі

$$\left. \frac{\partial C}{\partial r} \right|_{r=r_0} = 0. \quad (4)$$

Початкова умова вимагає рівності нулю концентрації в трубі до включення джерела

$$C|_{t=0} = 0. \quad (5)$$

Функцію густини для імпульсного плоского кругового джерела, що розташовано на початку координат, задамо наступним чином

$$f(x, r, t) = \delta(x)H(r_k - r), \quad (6)$$

де $\delta(x)$ – функція Дірака; $H(r_k - r)$ – функція Гевісайда [16].

Зробимо у рівнянні (3) заміну змінних

$$z = x - u_0 t, \quad (7)$$

тобто перейдемо в систему координат, яка рухається з потоком. При цьому, функція $C(x, r, t)$ перейде у функцію $w(z, r, t)$, а функція $f(x, r, t)$ у функцію

$$F(z, r, t) = \delta(z + u_0 t)H(r_k - r). \quad (8)$$

Похідні перетворюються відповідно до виразів

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} &= \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial t} = -u_0 \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial t}; \\ \frac{\partial C}{\partial x} &= \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial z}; \\ \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right) = \\ &= \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Підставляємо дані співвідношення в рівняння (3) і після перетворювань отримуємо

$$\frac{\partial w}{\partial t} = D_t \left(\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \right) + \delta(z + u_0 t)H(r_k - r). \quad (10)$$

Таким чином, маємо звичайне неоднорідне рівняння дифузії.

Аналітичне рішення рівняння (10) отримано відомими прийомами математичної фізики [16, 21] та має вигляд

$$\begin{aligned} w(z, r, t) &= \frac{r_k}{\sqrt{\pi r_0}} \int_0^t \frac{\exp \left[-\frac{(z + u_0 \tau)^2}{4D_t(t - \tau)} \right]}{\sqrt{D_t(t - \tau)}} \times \\ &\times \sum_{n=1}^{\infty} \exp \left(-\left(\frac{\mu_n}{r_0} \right)^2 D_t(t - \tau) \right) \times \\ &\times \frac{J_1 \left(\frac{\mu_n}{r_0} r_k \right) J_0 \left(\frac{\mu_n}{r_0} r \right)}{\mu_n J_0^2(\mu_n)} d\tau. \end{aligned} \quad (11)$$

де J_0 і J_1 – функції Бесселя першого роду нульового і першого порядку; μ_n – корені рівняння

$$J_0'(x) = 0. \quad (12)$$

За допомогою заміни (7) переходимо до нерухливій системи координат

$$\begin{aligned} C(x, r, t) &= \frac{r_k}{\sqrt{\pi r_0}} \int_0^t \frac{\exp \left[-\frac{(x - u_0(t - \tau))^2}{4D_e(t - \tau)} \right]}{\sqrt{D_e(t - \tau)}} \times \\ &\times \sum_{n=1}^{\infty} \exp \left(-\left(\frac{\mu_n}{r_0} \right)^2 D_e(t - \tau) \right) \times \\ &\times \frac{J_1 \left(\frac{\mu_n}{r_0} r_k \right) J_0 \left(\frac{\mu_n}{r_0} r \right)}{\mu_n J_0^2(\mu_n)} d\tau. \end{aligned} \quad (13)$$

Ця функція і дає рішення задачі о дифузії в потоці плоского кругового джерела радіуса r_k з центром на початку координат.

У безрозмірному вигляді отримане рішення представлено наступним чином

$$\bar{C}(\bar{x}, \bar{r}, \bar{t}) = \frac{\bar{r}_k}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\bar{t}} \frac{\exp\left[-\frac{Pe_\delta (\bar{x} - (\bar{t} - \tau))^2}{16(\bar{t} - \tau)}\right]}{\sqrt{4(\bar{t} - \tau) Pe_\delta}} \times (14) \\ \times \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\mu_n^2 \frac{4(\bar{t} - \tau)}{Pe_\delta}\right) \frac{J_1(\mu_n \bar{r}_k) J_0(\mu_n \bar{r})}{\mu_n J_0^2(\mu_n)} d\tau.$$

де $\bar{C} = C/C_0$ – безрозмірна концентрація (C_0 – середня концентрація); $\bar{x} = x/d$, $\bar{r} = r/r_0 = 2r/d$ – безрозмірні координати (d – діаметр труби); $\bar{r}_k = r_k/r_0 = 2r_k/d$ – безрозмірний радіус джерела; $\bar{t} = tu_0/d$ – безрозмірний час; $Pe_\delta = Re Sc$ – дифузійне число Пекле ($Re = u_0 d/\nu$ – число Рейнольдса; ν – кінематична в'язкість; $Sc = \nu/D_i$ – число Шмідта).

На рис. 1 представлена залежність безрозмірної концентрації домішки на осі труби від відстані до плоского кругового джерела для різних його розмірів при $Pe_\delta = 368$ і в момент часу $\bar{t} = 0,1$, $Pe_\delta = 3,68$. Як видно з рисунка, із збільшенням відстані від джерела усі криві виходять на один рівень.

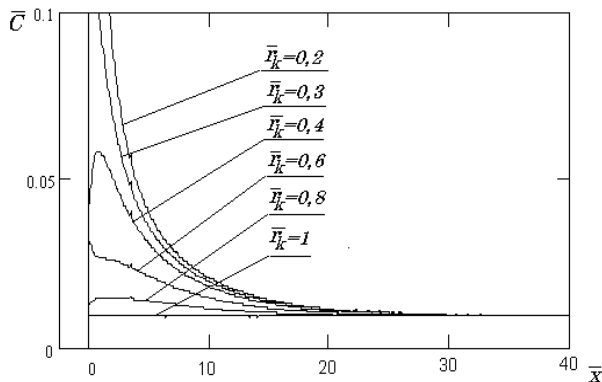


Рис. 1. Концентрація на осі у залежності від відстані до джерела

На рис. 2 показано розподіл концентрації домішки по радіусу труби на відстані $10d$ від плоского кругового джерела для різних його розмірів. Як і слід було очікувати, при збільшенні розміру джерела розподіл стає більш однорідним. Цікаво відмітити, що всі криві перетинаються в одній точці, що лежить на відстані $0,62$ радіуса труби від її осі. Це значить, якщо датчик концентрації розташувати в цій точці, він покаже значення середньої концентрації в потоці.

Найбільш точну інформацію про ступінь рівномірності розподілу дає величина відношення концентрації у стінок труби до концентрації на осі. Її величина змінюється від нуля при повністю неоднорідному розподілі до одиниці при повністю рівномірному.

Залежність цієї величини від відстані до джерела при різних розмірах джерела приведена на рис. 3. Так, на відстані більш $30d$, ступінь рівномірності не менш $0,95$ для всіх розмірів джерела.

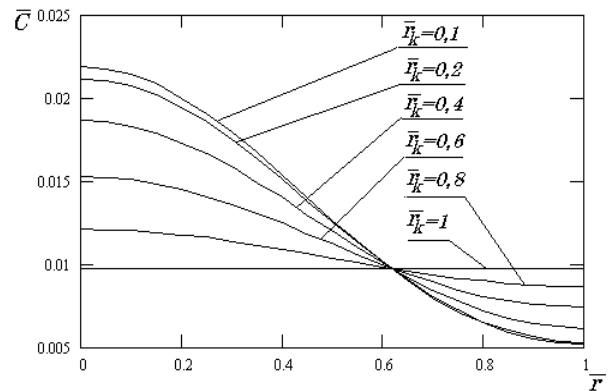


Рис. 2. Розподіл концентрації по радіусу труби на відстані $10d$ від джерела

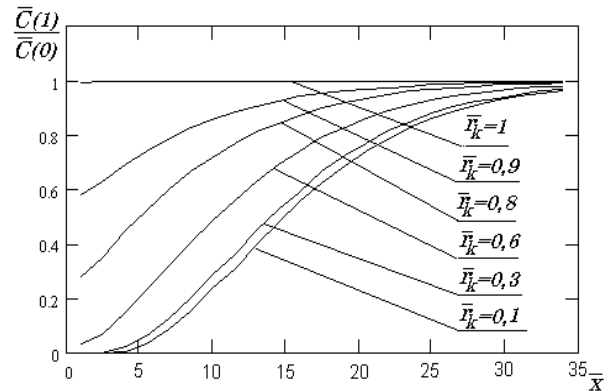


Рис. 3. Відношення концентрації у стінок до концентрації на осі в залежності від відстані до джерела

Висновки. Таким чином, для виміру концентрації домішки в потоці датчик слід встановлювати на відстані 30 діаметрів каналу та більше від джерела домішки, що забезпечує погрішність виміру середньої концентрації менш 5% . В тому випадку, коли неможливо реалізувати дані рекомендації, для підвищення точності слід організувати вимір на відстані $0,62$ радіуса труби від її осі, де дійсна концентрація домішки в газоповітряному потоці відповідає середньому значенню.

Література

1. Свистунов В.М., Пушняков Н.К. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха объектов агропромышленного комплекса и жилищно-коммунального хозяйства. СПб.: Политехника, 2007. 423 с.
2. Елинский И. И. Вентиляция и отопление гальванических цехов машиностроительных предприятий. М.: Машиностроение, 1989. 152 с.
3. Sokolov, V., Porkuian, O., Krol, O., Baturin, Y.: Design Calculation of Electrohydraulic Servo Drive for Technological Equipment. In: Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in

- Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 75-84. Springer, Cham (2020).
4. Krol, O., Sokolov, V., Tsankov, P.: Modeling of vertical spindle head for machining center. *Journal of Physics: Conference Series* 1553 012012 (2020).
 5. Krol, O., Sokolov, V.: Modeling of Spindle Node Dynamics Using the Spectral Analysis Method. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, vol. 1, pp. 35-44. Springer, Cham (2020).
 6. Ананьев В.А., Балуева Л.Н., Гальперин А.Д. и др. Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика. М.: Евроклимат, 2001. 416 с.
 7. Коваленко А.А., Соколов В.И., Дымнич А.Х., Уваров П.Е. Основы технической механики жидкостей и газов: Учебное пособие для вузов. Луганск: ВУГУ, 1998. 272 с.
 8. Sokolov, V., Krol, O.: Determination of Transfer Functions for Electrohydraulic Servo Drive of Technological Equipment. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 364-373. Springer, Cham (2019).
 9. Харламов Ю.А., Соколов В.И., Кроль О.С. Трибологическая надежность металлорежущих станков. Северодонецк: ВНУ им. В. Даля, 2017. 320 с.
 10. Krol, O., Porkuian, O., Sokolov, V., Tsankov, P.: Vibration stability of spindle nodes in the zone of tool equipment optimal parameters. *Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences* 72(11), 1546-1556 (2019).
 11. Беккер А. Системы вентиляции. М.: Техносфера, Евроклимат, 2005. 232 с.
 12. Соколов В.И., Кроль О.С., Єпіфанова О.В. Гідравліка. Северодонецк: СНУ ім. В. Даля, 2017. 160 с.
 13. Sokolov, V., Krol, O., Stepanova, O.: Automatic Control System for Electrohydraulic Drive of Production Equipment. 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE (2018).
 14. Sokolov, V., Krol, O., Romanchenko, O., Kharlamov, Y., Baturin, Y.: Mathematical model for dynamic characteristics of automatic electrohydraulic drive for technological equipment. *Journal of Physics: Conference Series* 1553 012013 (2020).
 15. Sokolov, V., Rasskazova, Y.: Automation of control processes of technological equipment with rotary hydraulic drive. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 2(2(80)), 44-50 (2016).
 16. Соколов В.И., Кроль О.С., Єпіфанова О.В. Дифузійні процеси в системах вентиляції. Северодонецк: СНУ ім. В. Даля. 2018. 148 с.
 17. Sokolov, V.: Hydrodynamics of flow in flat slot with boundary change of viscosity. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham (2021).
 18. Sokolov, V., Krol, O., Baturin, Y.: Dynamics Research and Automatic Control of Technological Equipment with Electrohydraulic Drive. 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE (2019).
 19. Sokolov, V.: Transfer functions for shearing stress in non-stationary fluid friction. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, vol. 1, pp. 707-715. Springer, Cham (2020).
 20. Sokolov, V., Krol, O., Stepanova, O., Tsankov, P.: Dynamic characteristics of rotary motion electrohydraulic drive with volume regulation. *Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences* 73(5), 691-702 (2020).
 21. Sokolov, V., Krol, O.: Time Characteristics of Initial Stages for Aerosols Diffusion in Channels of Ventilation Systems. 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), pp. 1-6. IEEE (2020).
 22. Sokolov, V.: Increase measurement accuracy of average velocity for turbulent flows in channels of ventilation systems. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham (2021).
 23. Sokolov, V., Krol, O.: Installations criterion of deceleration device in volumetric hydraulic drive. *Procedia Engineering* 206, 936-943 (2017).
 24. Sokolov, V., Krol O., Stepanova, O.: Choice of Correcting Link for Electrohydraulic Servo Drive of Technological Equipment. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 702-710. Springer, Cham (2020).
 25. Sokolov, V., Krol, O., Stepanova, O.: Nonlinear simulation of electrohydraulic drive for technological equipment. *Journal of Physics: Conference Series* 1278, 012003 (2019).
 26. Sokolov, V.: Diffusion of Circular Source in the Channels of Ventilation Systems. In: *Advances in Engineering Research and Application. ICERA 2018. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 63, pp. 278-283. Springer, Cham (2019).

References

1. Svistunov V.M., Pushnyakov N.K. Otoplenie, ventilyatsiya i konditsionirovanie vozduha ob'ektov agropromyshlennogo kompleksa i zhilishchno-kommunalnogo hozyaystva. SPb.: Politehnika, 2007. 423 s.
2. Elinskiy I. I. Ventilyatsiya i otoplenie galvaniche-skih tsehov mashinostroitelnyih predpriyatij. M.: Mashinostroenie, 1989. 152 s.
3. Sokolov, V., Porkuian, O., Krol, O., Baturin, Y.: Design Calculation of Electrohydraulic Servo Drive for Technological Equipment. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, vol. 1, pp. 75-84. Springer, Cham (2020).
4. Krol, O., Sokolov, V., Tsankov, P.: Modeling of vertical spindle head for machining center. *Journal of Physics: Conference Series* 1553 012012 (2020).
5. Krol, O., Sokolov, V.: Modeling of Spindle Node Dynamics Using the Spectral Analysis Method. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, vol. 1, pp. 35-44. Springer, Cham (2020).
6. Ananev V.A., Balueva L.N., Galperin A.D. i dr. Sistemy ventilyatsii i konditsionirovaniya. Teoriya i praktika. M.: Evroklimat, 2001. 416 s.
7. Kovalenko A.A. Osnovy tehniceskoy mehaniki zhidkosteij i gazov: uchebnoe posobie dlja vuzov/ A.A. Kovalenko, V.I. Sokolov, A.H. Dymnich, P.E. Uvarov. Lugansk: VUGU, 1998. 272 s.
8. Sokolov, V., Krol, O.: Determination of Transfer Functions for Electrohydraulic Servo Drive of Technological Equipment. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 364-373. Springer, Cham (2019).
9. Kharlamov Y., Sokolov V., Krol O. Tribologicheskaya nadezhnost metallorzhuschih stankov. Severodonetsk: V. Dahl EUNU, 2017.320 s.
10. Krol, O., Porkuian, O., Sokolov, V., Tsankov, P.: Vibration stability of spindle nodes in the zone of tool equipment optimal parameters. *Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences* 72(11), 1546-1556 (2019).

11. Bekker A. Sistemyi ventilyatsii. M.: Tehnosfera, Evroklimat, 2005. 232 s.
12. Sokolov V., Krol O., Yepifanova O. Hydraulics. Severodonetsk: V. Dahl EUNU, 2017. 160 s.
13. Sokolov, V., Krol, O., Stepanova, O.: Automatic Control System for Electrohydraulic Drive of Production Equipment. 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE (2018).
14. Sokolov, V., Krol, O., Romanchenko, O., Kharlamov, Y., Baturin, Y.: Mathematical model for dynamic characteristics of automatic electrohydraulic drive for technological equipment. Journal of Physics: Conference Series 1553 012013 (2020).
15. Sokolov, V., Rasskazova, Y.: Automation of control processes of technological equipment with rotary hydraulic drive. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 2(2(80)), 44–50 (2016).
16. Sokolov V., Krol O., Yepifanova O. Diffusion processes in ventilation systems. Severodonetsk: V. Dahl EUNU, Severodonetsk, 2018. 148 c.
17. Sokolov, V.: Hydrodynamics of flow in flat slot with boundary change of viscosity. In: Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham (2021).
18. Sokolov, V., Krol, O., Baturin, Y.: Dynamics Research and Automatic Control of Technological Equipment with Electrohydraulic Drive. 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE (2019).
19. Sokolov, V.: Transfer functions for shearing stress in non-stationary fluid friction. In: Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 707-715. Springer, Cham (2020).
20. Sokolov, V., Krol, O., Stepanova, O., Tsankov, P.: Dynamic characteristics of rotary motion electrohydraulic drive with volume regulation. Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences 73(5), 691-702 (2020).
21. Sokolov, V., Krol, O.: Time Characteristics of Initial Stages for Aerosols Diffusion in Channels of Ventilation Systems. 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), pp. 1-6. IEEE (2020).
22. Sokolov, V.: Increase measurement accuracy of average velocity for turbulent flows in channels of ventilation systems. In: Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham (2021).
23. Sokolov, V., Krol, O.: Installations criterion of deceleration device in volumetric hydraulic drive. Procedia Engineering 206, 936–943 (2017).
24. Sokolov, V., Krol O., Stepanova, O.: Choice of Correcting Link for Electrohydraulic Servo Drive of Technological Equipment. In: Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 702-710. Springer, Cham (2020).
25. Sokolov, V., Krol, O., Stepanova, O.: Nonlinear simulation of electrohydraulic drive for technological equipment. Journal of Physics: Conference Series 1278, 012003 (2019).
26. Sokolov, V.: Diffusion of Circular Source in the Channels of Ventilation Systems. In: Advances in Engineering Research and Application. ICERA 2018. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 63, pp. 278-283. Springer, Cham (2019).

Соколов В.И. Диффузия кругового источника в каналах вентиляционных систем

Рассматривается вопрос измерения концентрации примеси в газоздушных потоках в каналах промышленных вентиляционных систем. Для определения местоположения датчика, соответствующего средней концентрации примеси, решается задача о диффузии в потоке плоского кругового источника. В цилиндрической системе координат представлено уравнение диффузии в осесимметричном потоке. На основе анализа аналитического решения показано, что равномерная концентрация устанавливается на расстоянии 30 и более диаметров канала от места выброса примеси. В случае, когда нельзя реализовать данные требования, рекомендуется размещать датчик концентрации на расстоянии 0.62 радиуса трубы от ее оси.

Ключевые слова: промышленные выбросы, вентиляционная система, газоздушный поток, примесь, концентрация.

Sokolov V.I. Circular source diffusion in channels of ventilation systems

The problem of measuring the concentration of impurities in gas-air flows in the channels of industrial ventilation systems is considered. The emission of harmful components is carried out by centralized feeding into the outlet ventilation pipe, where sampling of the gas-air environment is organized to measure the concentration of impurities. Since a uniform concentration of impurities over the cross section of the pipe is established at a certain distance from the emission point, it is important to know the location of the concentration sensor, which reliably determines the average concentration of impurities in the gas-air flow. In those cases when it is impossible to organize control at the required distance from the emission point, the measurement accuracy can be increased by installing the sensor at the point of the channel section where the actual concentration corresponds to the average value. To determine the location of the sensor corresponding to the average concentration of the impurity, the problem of diffusion in the flow of a flat circular source is solved. In a cylindrical coordinate system, the diffusion equation in an axisymmetric flow is presented. It is assumed that the flow rate is constant in direction and value equal to the average flow rate. The boundary condition for the diffusion equation is taken from the requirement that there is no impurity penetration through the pipe walls and is reduced to the equality of the normal derivative at the boundary to zero. The analytical solution is obtained by the well-known methods of mathematical physics. The dependence of the dimensionless impurity concentration on the pipe axis on the distance to a flat circular source for its various sizes is considered, the impurity concentration distribution along the pipe radius is shown, and information on the degree of concentration distribution uniformity is presented as the value of the ratio of the concentration at the pipe walls to concentration on the axis. Based on the analysis of the analytical solution, it is shown that a uniform concentration is established at a distance of 30 or more channel diameters from the place of impurity ejection. In the case when these requirements cannot be met, it is recommended to place the concentration sensor at a distance of 0.62 of the pipe radiuses from its axis.

Keywords: industrial ejections, ventilation system, gas-air flow, impurity, concentration.

Соколов Владимир Ілліч – д.т.н., проф., завідувач кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк)
sokolov.snu.edu@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-117-123>

УДК 621.929 (678.053.3+66.05)

ЦИРКУЛЯЦІЯ СИПКОВОГО МАТЕРІАЛУ В ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ РОБОЧИХ КАМЕРАХ ВІБРОАПАРАТІВ

Табунщиків В.Г., Москалик В.М.

CIRCULATION OF BULK MATERIAL IN HORIZONTAL CYLINDRICAL WORKING CHAMBER OF VIBRATORS

Tabunshchikov V.G., Moskalyk V.M.

В статті представлено опис розробленої експериментальної установки, яка складається з універсального вібраційного стенду та модельного апарату зі змінними горизонтальними циліндричними робочими камерами, вісь яких паралельна поздовжній осі вібратора. Конструкція вібратора універсального вібраційного стенду дозволяє отримувати кругові, еліптичні та направлені коливання модельного апарату. Розроблена методика вимірювань параметрів коливань модельного вібраційного апарату достатньо трудомістка, але дозволяє фіксувати за допомогою катетометра та фотозйомки траєкторію коливань та визначати амплітуди. Для виміру швидкості циркуляції в сипкий матеріал додавалися мічені (забарвлені) частки. Швидкість циркуляції визначалася шляхом виміру часу проходження міченими частками сектора, відкладеного на склі модельного апарату. В статті наведені результати експериментального вивчення впливу параметрів коливань та геометричних розмірів (діаметру) робочої камери горизонтального апарату, вісь якого паралельна поздовжній осі вібратора, на швидкість циркуляції сипкого матеріалу. Експерименти проводилися на модельному матеріалі – скляному бісері, який має гарні сипкі властивості. Встановлено характер залежності швидкості циркуляції сипкого матеріалу від відносного прискорення вібрації і діаметра робочих камер модельних апаратів.

Ключові слова: вібраційний стенд, швидкість циркуляції, сипкий матеріал, відносне прискорення, діаметр робочої камери.

Вступ. Інтенсифікація фізичних процесів а також процесів хімічної технології за рахунок використання вібрації, обробка сипких матеріалів в віброкиплячому шарі знаходять застосування в багатьох галузях промисловості.

В промисловості знаходять використання вібраційні апарати з коробчатою та циліндричною горизонтальною робочою камерою [1, 2]. Сипкий матеріал в таких апаратах здійснює циркуляційний рух в площині перпендикулярній подовжній осі вібратора. В даний час найбільшого поширення в промис-

ловості набули вібраційні машини, робочі органи яких здійснюють гармонійні коливання. При цьому форма траєкторії їх коливального руху може бути всіяка: прямою, вертикальною або направленою під кутом до горизонту, еліпсом, колом [3 – 5].

Аналіз літератури показав:

– вібрація досить широко використовується для інтенсифікації процесів в хімічній і інших галузях промисловості;

– вібраційна дія істотно змінює властивості шару сипучого матеріалу;

– циркуляція сипкого матеріалу у віброкиплячому шарі впливає на процеси зміщення, віброобработивної обробки, подрібнення, сушки;

– вплив геометричних розмірів робочої камери на циркуляцію сипкого матеріалу у віброкиплячому шарі вивчений недостатньо.

У зв'язку з цим **метою роботи** є експериментальне вивчення впливу параметрів коливань та геометричних розмірів (діаметру) робочої камери горизонтального апарату на швидкість циркуляції сипкого матеріалу.

Завдання дослідження:

1. Розробити експериментальну установку.
2. Розробити методику визначення параметрів коливань при еліптичній траєкторії вібрації.
3. Розробити методику визначення швидкості циркуляції.
4. Провести експериментальні дослідження і виконати статистичну обробку отриманих даних.

Основна частина. Розробка лабораторної установки Загальний вигляд експериментальної установки представлено на рис. 1.

Експериментальна установка (рис. 1) складається з вібростенда і модельного апарату 1. Вібростенд має раму 2, на який змонтований привід вібратора (електродвигун 3, пасова передача 4 і пружна муфта 5). Віброплатформа 6, через пружні елементи (пружини 7) спирається на раму 2. До віброплатфо-

рми хомутами прикріпленій вібратор 8. Для виміру частоти коливання використовуємо стробоскоп 9, а для визначення амплітуди катетометр 10.



Рис. 1. Конструкція експериментальної установки:
1 – модельний апарат; 2 – рама; 3 – електродвигун;
4 – пасова передача; 5 – пружна муфта;
6 – віброплатформа; 7 – пружини; 8 – вібратор;
9 – стробоскоп; 10 – катетометр

Вібратор (рисунок 2) складається з кришки 1 і корпусу 2, в якому розташовані два дебалансних вала 3 і один проміжний вал 4. Вали спираються на кулькові радіальні підшипники 5. Обертальний момент передається за допомогою циліндричної зубчастої передачі 6.

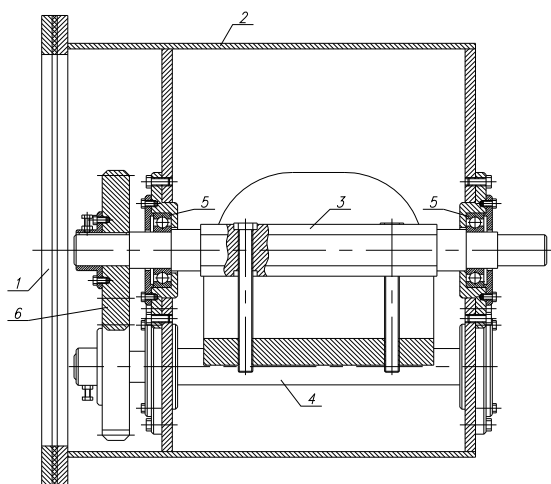


Рис. 2. Вібратор:
1 – кришка; 2 – корпус; 3 – дебалансний вал;
4 – проміжний вал; 5 – кулькові радіальні підшипники;
6 – циліндрична зубчаста передача

Модельний апарат (рис. 3) складається з шести царг ($\varnothing 140 - 490$ мм), які концентрично закріплені болтами на планшайбі і закриваються склом.

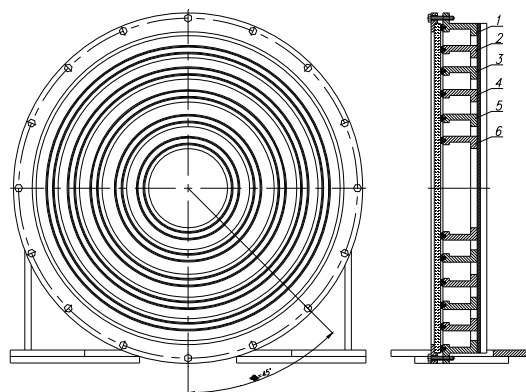


Рис. 3. Модельний апарат:
1 – $\varnothing 490$ мм; 2 – $\varnothing 422$ мм; 3 – $\varnothing 356$ мм;
4 – $\varnothing 286$ мм; 5 – $\varnothing 210$ мм; 6 – $\varnothing 142$ мм

Методика вимірювань параметрів коливань модельного вібраційного апарата. Як показали попередні дослідження траєкторія коливання центру тяжіння модельного апарата є еліпсом (рис. 4). Фотографію отримуємо таким чином: на скло модельного апарата необхідно наклеїти шматочок наждачного паперу, і провести вимір за допомогою катетометра КМ – 8 відрізка a (рис. 4)), далі через оптичну систему катетометра фотоапаратом робиться фотографія вимірюваного еліпса коливань (рис. 5)). Знімок можна обробити в редакторах CoralDraw та AutoCad. Потім обчислюється масштаб і по знімку знаходяться розміри a , b та кут φ .

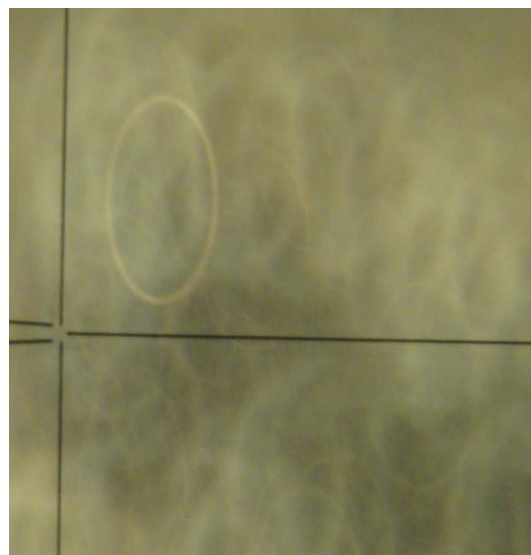


Рис. 4. Фотографія еліпса коливань

Методика визначення швидкості циркуляції. Для виміру швидкості циркуляції в сипкій матеріал додавалися мічені (забарвлені) частки. Швидкість циркуляції визначалася шляхом виміру часу проходження міченими частками сектора з кутом 45°

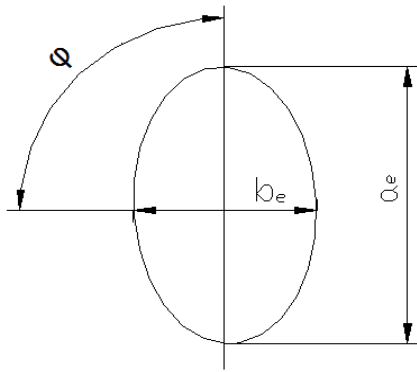


Рис. 5. Необхідні геометричні розміри еліпса коливань

Експериментальна частина. В якості сипкого матеріалу був вибран скляний бісер: діаметр часток 0,8 мм, питома вага 25881 н/м³, насипна вага 15195 н/м³, кут природного укосу 30,2⁰.

Експерименти проводилися в апаратах з внутрішнім діаметром 142 мм, 210 мм, 286 мм, 356 мм, 422 мм, 490 мм при частотах коливань 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60 гц. Коефіцієнт заповнення робочих камер модельних апаратів складав 0,5.

Результати експериментів приведені в таблицях і на рисунках.

Таблиця 1

Результати вимірювань і розрахунків при геометричних розмірах модельного апарату Ø 142 мм

f, Гц	A, м	τ _{спр} , с	ω, рад/с	Δ	W, рад/с
25	0,718 · 10 ⁻³	95,82	157,0	1,804	0,008
30	0,708 · 10 ⁻³	7,63	188,4	2,562	0,103
35	0,696 · 10 ⁻³	3,20	219,8	3,428	0,245
40	0,660 · 10 ⁻³	1,82	251,2	4,245	0,431
50	0,694 · 10 ⁻³	1,37	314,0	6,975	0,572
60	0,708 · 10 ⁻³	0,88	376,8	10,247	0,892

В таблиці: f – частота; A=a/2 – амплітуда;

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f; \quad W = \frac{\pi}{4 \cdot \tau_{спр}}$$

кутова швидкість циркуляції; Δ = $\frac{A \cdot \omega^2}{g}$ – відносне прискорення вібрації

g – прискорення вільного падіння

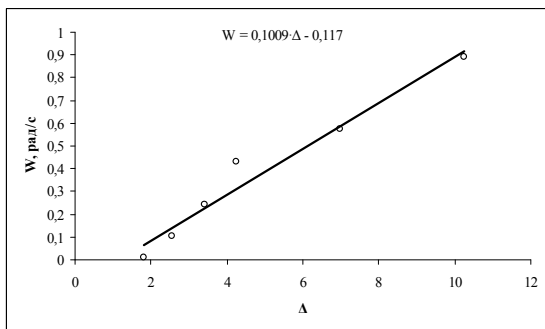


Рис. 6. Графік залежності кутової швидкості циркуляції W від відносного прискорення Δ при геометричних розмірах модельного апарату Ø 142 мм

Таблиця 2

Результати вимірювань і розрахунків при геометричних розмірах модельного апарату Ø 210 мм

f, Гц	A, м	τ _{спр} , с	ω, рад/с	Δ	W, рад/с
25	0,718 · 10 ⁻³	91,20	157,0	1,804	0,009
30	0,708 · 10 ⁻³	10,99	188,4	2,562	0,071
35	0,696 · 10 ⁻³	3,88	219,8	3,428	0,202
40	0,660 · 10 ⁻³	2,28	251,2	4,245	0,344
50	0,694 · 10 ⁻³	1,80	314,0	6,975	0,436
60	0,708 · 10 ⁻³	1,22	376,8	10,247	0,642

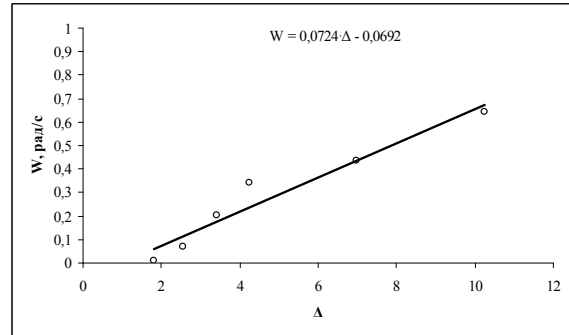


Рис. 7. Графік залежності кутової швидкості циркуляції W від відносного прискорення Δ при геометричних розмірах модельного апарату Ø 210 мм

Таблиця 3

Результати вимірювань і розрахунків при геометричних розмірах модельного апарату Ø 286 мм

f, Гц	A, м	τ _{спр} , с	ω, рад/с	Δ	W, рад/с
25	0,718 · 10 ⁻³	*	157,0	1,804	*
30	0,708 · 10 ⁻³	14,31	188,4	2,562	0,055
35	0,696 · 10 ⁻³	4,74	219,8	3,428	0,165
40	0,660 · 10 ⁻³	3,30	251,2	4,245	0,238
50	0,694 · 10 ⁻³	1,81	314,0	6,975	0,433
60	0,708 · 10 ⁻³	0,92	376,8	10,247	0,848

* – направлений рух відсутній, оскільки дуже повільний рух верхнього шару

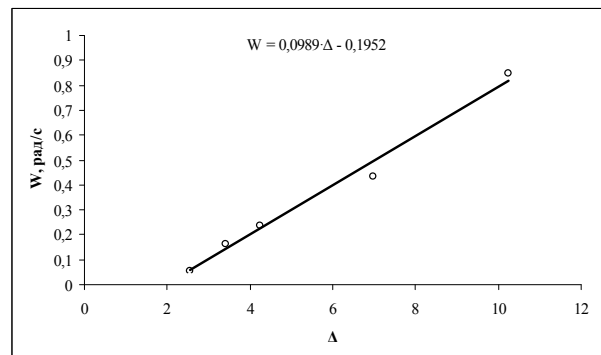


Рис. 8. Графік залежності кутової швидкості циркуляції W від відносного прискорення Δ при геометричних розмірах модельного апарату Ø 286 мм

Таблиця 4

Результати вимірювань і розрахунків при геометричних розмірах модельного апарату $\varnothing 356$ мм

f , Гц	A , м	$\tau_{\text{спр}}$, с	ω , рад/с	Δ	W , рад/с
25	$0,718 \cdot 10^{-3}$	*	157,0	1,804	*
30	$0,708 \cdot 10^{-3}$	27,28	188,4	2,562	0,029
35	$0,696 \cdot 10^{-3}$	8,49	219,8	3,428	0,092
40	$0,660 \cdot 10^{-3}$	4,66	251,2	4,245	0,168
50	$0,694 \cdot 10^{-3}$	2,78	314,0	6,975	0,282
60	$0,708 \cdot 10^{-3}$	1,53	376,8	10,247	0,512

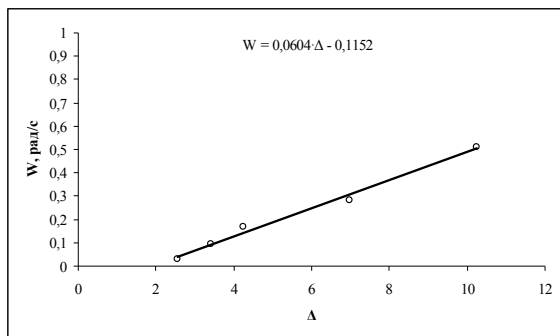


Рис. 9. Графік залежності кутової швидкості циркуляції W від відносного прискорення Δ при геометричних розмірах модельного апарату $\varnothing 356$ мм

Таблиця 6

Результати розрахунків при геометричних розмірах модельного апарату $\varnothing 490$ мм

f , Гц	A , м	$\tau_{\text{спр}}$, с	ω , рад/с	Δ	W , рад/с
25	$0,718 \cdot 10^{-3}$	*	157,0	1,804	*
30	$0,708 \cdot 10^{-3}$	37,08	188,4	2,562	0,021
35	$0,696 \cdot 10^{-3}$	16,03	219,8	3,428	0,049
40	$0,660 \cdot 10^{-3}$	11,68	251,2	4,245	0,067
50	$0,694 \cdot 10^{-3}$	7,11	314,0	6,975	0,110
60	$0,708 \cdot 10^{-3}$	3,37	376,8	10,247	0,233

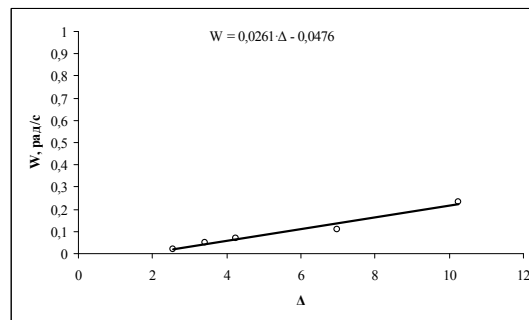


Рис. 11. Графік залежності кутової швидкості циркуляції W від відносного прискорення Δ при геометричних розмірах модельного апарату $\varnothing 490$ мм

Таблиця 5

Результати вимірювань і розрахунків при геометричних розмірах модельного апарату $\varnothing 422$ мм

f , Гц	A , м	$\tau_{\text{спр}}$, с	ω , рад/с	Δ	W , рад/с
25	$0,718 \cdot 10^{-3}$	*	157,0	1,804	*
30	$0,708 \cdot 10^{-3}$	25,04	188,4	2,562	0,031
35	$0,696 \cdot 10^{-3}$	7,32	219,8	3,428	0,107
40	$0,660 \cdot 10^{-3}$	4,96	251,2	4,245	0,158
50	$0,694 \cdot 10^{-3}$	2,83	314,0	6,975	0,277
60	$0,708 \cdot 10^{-3}$	1,659	376,8	10,247	0,473

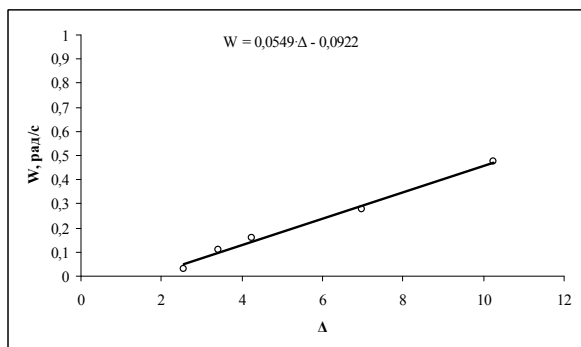


Рис. 10. Графік залежності кутової швидкості циркуляції W від відносного прискорення Δ при геометричних розмірах модельного апарату $\varnothing 422$ мм

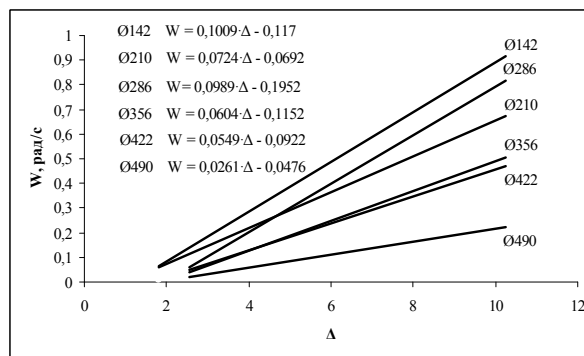


Рис. 12. Графік залежності кутової швидкості циркуляції W від відносного прискорення Δ (загальний графік)

Таблиця 7

Залежність кутової швидкості циркуляції W від діаметра модельного апарату D при відносному прискоренні $\Delta_1 = 1,804$

W , рад/с	0,008	0,009	*	*	*	*
D , мм	142	210	286	356	422	490

* – направлений рух відсутній, оскільки дуже повільний рух верхнього шару

Починаючи з $D = 286$ мм (рисунок 13) циркуляційного руху не було.

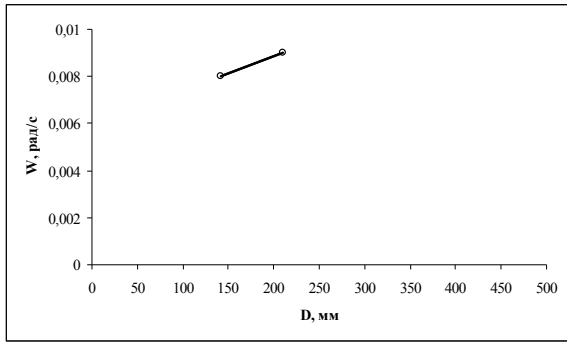


Рис. 13. Графік залежності кутової швидкості циркуляції W від діаметра модельного апарата D при відносному прискоренні $\Delta_1 = 1,804$

Таблиця 8

Залежність кутової швидкості циркуляції W від діаметра модельного апарата D при відносному прискоренні $\Delta_2 = 2,562$

W, рад/с	0,103	0,071	0,055	0,029	0,031	0,021
D, мм	142	210	286	356	422	490

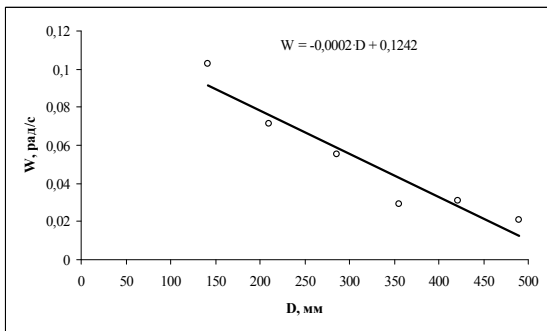


Рис. 14. Графік залежності кутової швидкості циркуляції W від діаметра модельного апарата D при відносному прискоренні $\Delta_2 = 2,562$

Таблиця 9

Залежність кутової швидкості циркуляції W від діаметра модельного апарата D при відносному прискоренні $\Delta_3 = 3,428$

W, рад/с	0,245	0,202	0,165	0,092	0,107	0,049
D, мм	142	210	286	356	422	490

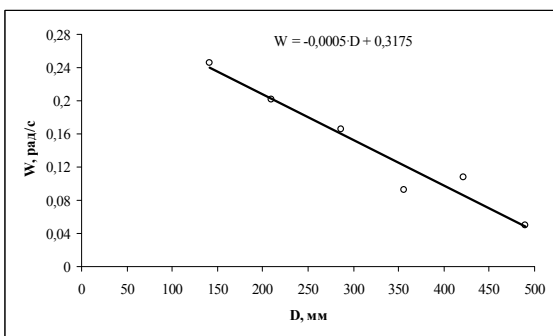


Рис. 15. Графік залежності кутової швидкості циркуляції W від діаметра модельного апарата D при відносному прискоренні $\Delta_3 = 3,428$

Таблиця 10

Залежність кутової швидкості циркуляції W від діаметра модельного апарата D при відносному прискоренні $\Delta_4 = 4,245$

W, рад/с	0,431	0,344	0,238	0,168	0,158	0,067
D, мм	142	210	286	356	422	490

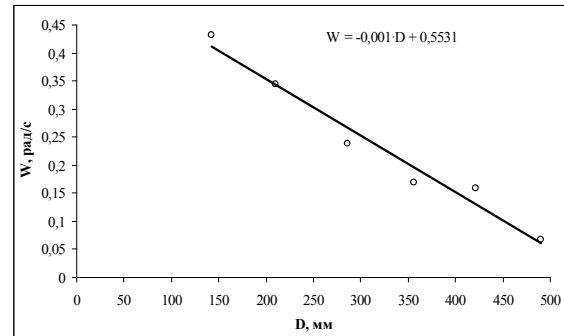


Рис. 16. Графік залежності кутової швидкості циркуляції W від діаметра модельного апарата D при відносному прискоренні $\Delta_4 = 4,245$

Таблиця 11

Залежність кутової швидкості циркуляції W від діаметра модельного апарата D при відносному прискоренні $\Delta_5 = 6,975$

W, рад/с	0,572	0,436	0,433	0,282	0,277	0,110
D, мм	142	210	286	356	422	490

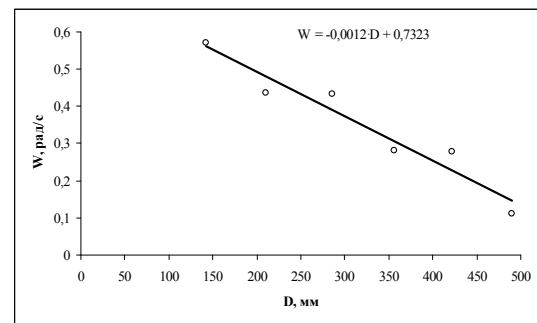


Рисунок 17 Графік залежності кутової швидкості циркуляції W від діаметра модельного апарата D при відносному прискоренні $\Delta_5 = 6,975$

Таблиця 12

Залежність кутової швидкості циркуляції W від діаметра модельного апарата D при відносному прискоренні $\Delta_6 = 10,247$

W, рад/с	0,892	0,642	0,848	0,512	0,473	0,233
D, мм	142	210	286	356	422	490

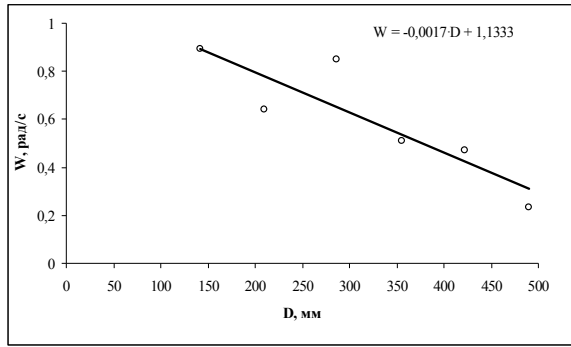


Рис. 18. Графік залежності кутової швидкості циркуляції W від діаметра модельного апарата D при відносному прискоренні $\Delta_6 = 10,247$

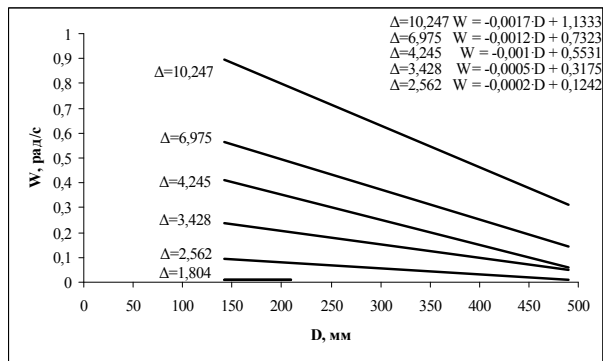


Рис. 19. Графік залежності кутової швидкості циркуляції W від діаметра модельного апарата D (загальний графік)

Аналіз результатів експериментів.

Результати дослідження показали:

1. Із збільшенням відносного прискорення вібрації Δ швидкість циркуляції W зростає (рис. 12). Залежності носять пропорційний характер вигляду:

$$W = a \cdot \Delta + b \quad (1)$$

Це можна пояснити таким чином: у дослідах амплітуда коливань практично не змінювалася, а збільшення відносного прискорення вібрації Δ досягалась збільшенням частоти коливань f . Чим більше частота коливань f , тим більше імпульсів, в одиницю часу, збуджуючих циркуляційний рух, отримує шар сипкого матеріалу.

2. Із збільшенням діаметру модельного апарату D швидкість циркуляції W зменшується (рис. 19). Залежності носять пропорційний характер вигляду:

$$W = a_1 \cdot D + b_1 \quad (2)$$

Висновки. Розроблена багатofункціональна експериментальна установка. Відпрацьовані методики визначення і фіксації параметрів коливань при направлених, круговій та еліптичній траєкторії вібрації. Проведені експериментальні дослідження впливу параметрів коливань та геометричних розмірів (діаметру) робочої камери горизонтального вібраційного апарату на швидкість циркуляції сипкого

матеріалу. Визначено, що залежності швидкості циркуляції сипкого матеріалу від відносного прискорення вібрації і діаметра горизонтальних робочих камер, вісь яких паралельна повздовжньої осі вібратора, має пропорційний характер.

Література

1. Членов В.А., Михайлов Н.В. Виброкипящий слой: монография. М.: 1972. 336 с.
2. Вибрация в технике: Справочник в 6 т./Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). М.; Машиностроение, 1981. Т.4. Вибрационные процессы и машины / Под. ред. Э.Э. Лавендела. 1981. 509 с.
3. Русанов С.А. Моделирование гидродинамики виброкипяющего шару з розробкою утилізатора тепла сипких матеріалів : автореф. дис. канд. техн. наук: 05.17.08 / Херсонський національний технічний університет. Херсон, 2000. 25 с.
4. Пасько А.А. Разработка новых конструкций вибрационных смесителей барабанного типа для сыпучих материалов и методики их расчёта: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.04.09 / Тамбовский государственный технический университет. Тамбов, 2000. 16 с.
5. Котов Р.А. Обоснование параметров вибрационного смесителя сыпучих кормов с гибким рабочим органом: дис. канд. техн. наук: 05.20.01 / Алтайский государственный аграрный университет. Барнаул, 2015. 164 с.

References

1. Chlenov V.A., Mikhailov N.V. Vibrating bed: monograph. M.: 1972. 336 p.
2. Vibration in technology: A Handbook. Handbook in 6 vols. / Ed. advice: V.N. Chelomey (prev.). M.; Mechanical engineering, 1981. V.4. Vibration processes and machines / Floor. ed. E.E. Lavendel. 1981. 509 p.
3. Rusanov S.A. Model of hydrodynamics of a bubbling ball with a socket of a heat utilizer for sticky materials: author's ref. dis. Cand. tech. Sciences: 05.17.08 / Kherson National Technical University. Kherson, 2000. 25 p.
4. Pasko A.A. Development of new designs of drum-type vibration mixers for bulk materials and methods of their calculation: author's ref. dis. Cand. tech. Sciences: 05.04.09 / Tambov State Technical University. Tambov, 2000. 16 p.
5. Kotov RA Substantiation of the parameters of a vibrating mixer of bulk feed with a flexible working body: dis. Cand. tech. Sciences: 05.20.01 / Altai State Agrarian University. Barnaul 2015. 164 p.

Табунчиков В.Г., Москалик В.М. Циркуляция сыпучего материала в горизонтальных цилиндрических рабочих камерах виброаппаратов

В статье представлено описание разработанной экспериментальной установки, которая состоит из универсального вибрационного стенда и модельного аппарата со съёмными цилиндрическими рабочими камерами, ось которых параллельна продольной оси вибратора. Конструкция вибратора универсального вибрационного стенда позволяет получать круговые, эллиптические и направленные колебания модельного аппарата. Разработанная методика измерений параметров колебаний модельного вибрационного аппарата достаточно трудоёмкая, но позволяет фиксировать с помощью катетометра

и фотосъемки траекторию колебаний и определяют амплитуды. Для измерения скорости циркуляции в сыпучий материал добавлялись меченные (окрашенные) частицы. Скорость циркуляции определялась путем измерения времени прохождения мечеными частицами сектора, отложенного на стекле модельного аппарата. В статье приведены результаты экспериментального изучения влияния параметров колебаний и геометрических размеров (диаметра) рабочей камеры горизонтального аппарата, ось которого параллельна продольной оси вибратора, на скорость циркуляции сыпучего материала. Эксперименты проводились на модельном материале – стеклянном биссере, который имеет хорошие сыпучие свойства. Установлен характер зависимости скорости циркуляции сыпучего материала от относительного ускорения вибрации и диаметра рабочих камер модельных аппаратов.

Ключевые слова: вибративний стенд, швидкість циркуляції, сыпучий матеріал, відносительне прискорення, діаметр робочої камери.

Tabunshchikov V.G., Moskalyk V.M.
Circulation of bulk material in horizontal cylindrical working chamber of vibrators

In industry, vibrating devices with box and cylindrical horizontal working chambers are used. The bulk material in such devices performs circulating motion in the plane perpendicular to the longitudinal axis of the vibrator. Currently, the most widespread in the industry are vibrating machines, the working bodies of which carry out harmonic oscillations. Thus the form of a trajectory of their oscillating movement can be various: direct, vertical or directed at an angle to horizon, an ellipse, a circle. The properties of the layer of bulk material change significantly under the action of vibration. In the vibrating fluidized bed there is a circulation of bulk material, which affects the processes of mixing, vibroabrasive processing, grinding, drying.

The article presents a description of the developed experimental set-up, which consists of a universal vibrating stand and a model apparatus with interchangeable horizontal

cylindrical working chambers, the axis of which is parallel to the longitudinal axis of the vibrator. The design of the vibrator of the universal vibrating stand allows to receive circular, elliptical and directed fluctuations of the model device. The developed method of measuring the oscillation parameters of the model vibrating apparatus is quite labor-intensive, but allows you to record with a cathetometer and photography the trajectory of oscillations and determine the amplitudes. To measure the circulation rate, labeled particles were added to the bulk material. The speed of circulation was determined by measuring the passage time of the labeled particles of the sector deposited on the glass of the model apparatus. The article presents the results of experimental study of the influence of oscillation parameters and geometric dimensions (diameter) of the working chamber of the horizontal apparatus, the axis of which is parallel to the longitudinal axis of the vibrator, on the circulation rate of bulk material. The experiments were performed on a model material - glass beads, which has good bulk properties. The dependence of the velocity of bulk material circulation on the relative acceleration of vibration and the diameter of the working chambers of the model apparatus is established.

Keywords: vibrating stand, circulation speed, bulk material, relative acceleration, working chamber diameter.

Табуншчиков Володимир Георгійович –старший викладач кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк), tabvladimir1954@gmail.com

Москалик Валерій Михайлович –к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк), moskalyk2017@gmail.com

Стаття подана 11.02.2021 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-124-127>

УДК 066.015.23

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИТІКАННЯ ГАЗУ З ОТВОРУ В ТАРІЛЦІ ПРОВАЛЬНОГО ТИПУ

Тараненко Г.В.

INVESTIGATION OF GAS OUTFLOW FROM HOLE IN THE DUAL-FLOW PLATE

Taranenko G.V.

У роботі розглянуті особливості введення газу в рідину на тарілках провального типу, які визначають гідродинамічні режими їх роботи. Робота тарілки розглядається на основі рівняння Бернуллі в різних перерізах газорідинного шару. Обґрунтовується величина певної висоти газорідинного шару, при якій настає зміна гідродинамічного режиму в газорідинному шарі на тарілках провального типу. Був проведений аналіз літератури за методиками вимірювання динамічного напору струменя газу, що витікає з отвору в плоскій стінці в рідину. Показана ідентичність гідродинамічних характеристик витікання газового струменя в повітря і воду. Таким чином, ядро газорідинного струменя на досить великій відстані від отвору, залишається газовим.

Ключові слова: газ, рідина, гідродинамічний режим, тарілки провального типу, газорідинний шар, переріз шару, висота шару.

Вступ. Тарілки провального типу досить широко поширені в промисловості. У деяких виробництвах, де робота тарілок пов'язана з взаємодією забруднених фаз, застосування масообмінних тарілок інших типів проблематично.

В роботі розглядається робота тарілок провального типу відносно невеликого вільного перерізу, $f \leq 25\%$. На таких тарілках реалізується кілька гідродинамічних режимів їх роботи [1]. це:

- режим однорідного барботажного шару,
- режим рухомого газорідинного шару,
- режим руйнування газорідинного шару.

Постановка проблеми. Величина лінійної швидкості газу на тарілках провального типу змінюється на порядок, від швидкості в отворах тарілки до швидкості на виході з газорідинного шару. Необхідно визначити на якій висоті газорідинного шару відбувається ця зміна.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В [2] запропоновано розглядати газорідинний шар на тарілці провального типу, як місцевий опір для проходження, як газу, так і рідини. Автори записали рівняння Бернуллі для двох перерізів газорідинного

шару, один з яких розташовується в площині тарілки, а інший на виході з шару піни. Відзначається, що для потоку газу істотним є те, що швидкість його при проходженні через шар піни різко змінюється від швидкості в отворах тарілки w_0 до швидкості газу при виході з піни w . При цьому зазвичай $w_0^2 > w$ в 25 - 100 разів. Для рідини можна прийняти, що її швидкість істотно не зміниться, оскільки частка перерізу апарату, яку займає рідина, невелика.

В [3] проведено експериментальне дослідження гідродинамічних особливостей витікання газових струменів в рідину, для струминного режиму витікання газу в рідину характерне утворення над отвором сталого незникаючого газового потоку (факела), який далеко від отвору, дробиться на окремі бульбашки. Однак умови переходу від частотного бульбашкового режиму витікання, до стаціонарного струменя, до сих пір не з'ясовані.

В [3], в середині газорідинних структур, що утворюються, проводили вимірювання полів повних і статичних тисків за допомогою п'єзометричних трубок. По різниці вимірних значень повних і статичних тисків розраховували величину динамічного напору в точці.

На (рис.1) наведені графіки порівняння вимірюваних динамічних напорів на осі повітряних струменів, що витікали через отвір в стінці, в повітря і воду, для отвору 10 мм і швидкості $w_0 = 43$ м / с.

З графіків видно, що обидві криві близькі у всій області вимірювань. Це дозволяє зробити висновок, що ядро газорідинного струменя на досить великих відстанях від отвору залишається газовим.

Аналіз даних в [3] показує, що характер витікання газу з отвору в стінці, в воду і повітря однаковий. Динамічний напір має максимальне значення, поблизу отвору в стінці і приймає мінімальне значення на відстані близько 0,1 м від отвору в стінці.

В [4] були проведені вимірювання динамічного тиску в одиночному отворі сухої тарілки провального типу з вільним перерізом $f = 16,3, 25$ і $35,6\%$.

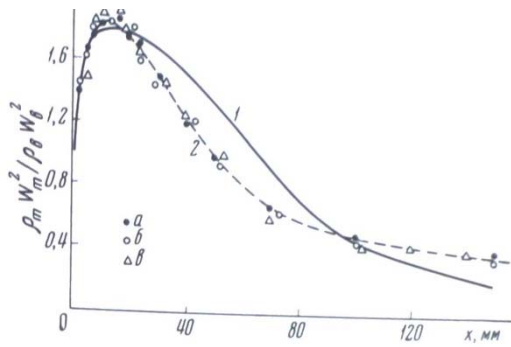


Рис. 1. Порівняння витікання повітряного струменя через отвір в стінки, в повітря і воду ($d_0 = 10$ мм, $w_0 = 43$ м / с); 1 - повітря - повітря, 2 - повітря - вода: а - = 300; б - 200; в - 150 мм; x - відстань до площини отвору, мм

Динамічний тиск вимірювали датчиком, який представляв собою бронзову трубку завдовжки 0,9 м і зовнішнім діаметром 0,008 м. В середину трубки була поміщена мідна трубка діаметром 0,004 м і довжиною 1 м. Нижній кінець датчика був запаяний так, що внутрішня трубка розташовувалася по центру зовнішньої трубки. Внутрішня трубка призначалася для вимірювання повної енергії газового потоку. У нижній частині датчика, в безпосередній близькості від входу у внутрішню трубку, у зовнішній трубці були просвердлені чотири отвори діаметром 0,002 м для відбору статичного тиску газу.

Трубки для відбору повного і статичного тиску під'єднували до мікроманометра, який показував різницю між повним і статичним тиском, тобто динамічний тиск.

Датчик розташовували по осі колони над центром тарілки провального типу. Його можна було встановлювати на різній висоті від плато тарілки.

Геометричні характеристики досліджених тарілок провального типу наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Геометричні характеристики тарілок провального типу

Номер тарілки	Вільний переріз, $f\%$	Діаметр отвору, d_0 , м	Число отворів, n , шт
1	16,3	0,023	1
2	25	0,0285	1
3	35,6	0,034	1
4	14,6	0,005	19
5	25,4	0,005	33
6	36,1	0,005	47

Діаметр колони, в якій досліджувалися тарілки, становив $D = 0,057$ м.

На (рис.2) представлені графіки зміни динамічного тиску на різній відстані від плато тарілки (з одним отвором) для ряду швидкостей газу в перерізі колони.

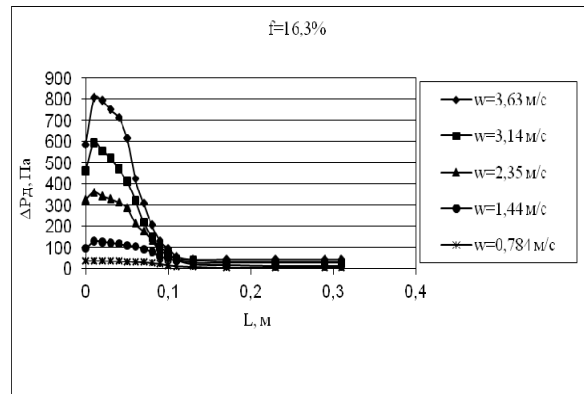


Рис. 2. Графіки залежності динамічного тиску (ΔP_d , Па) від відстані до плато тарілки (L, м) для різних значень швидкості газу в перерізі колони (w, м/с). Тарілка №1, таблиця 1

На (рис. 3) наведено графіки залежності динамічного тиску для різних тарілок при швидкості повітря $w = 2,35$ м/с.

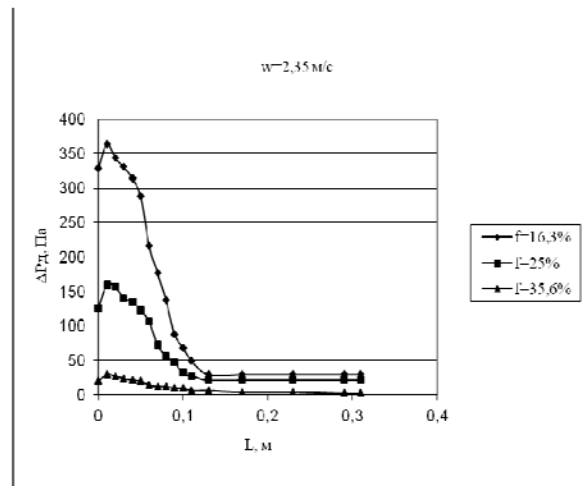


Рис. 3. Графіки залежності динамічного тиску (ΔP_d , Па) від відстані до плато тарілки (L, м) для швидкості газу в перерізі колони $w = 2,35$ м/с. Тарілки №1 - №3, таблиця 1

З графіків (рис. 2 і 3) видно, що локальні значення динамічного тиску, вимірюного по висоті потоку газового струменя, досягають мінімальних значень на висоті близько $L = 0,1$ м від плато тарілки.

З аналізу літературних даних можна зробити висновок, що необхідно визначити зміну локальних значень статичного тиску по висоті потоку газового струменя, що виходить з одиночного отвору в тарілці провального типу.

Розрахунок експериментальних даних. За експериментальними даними, отриманими в [4], було проведено розрахунок локальних значень динамічного тиску по висоті струменя газу, що виходить з одиночного отвору тарілки провального типу. Розрахунок проводили, використовуючи рівняння Бернуллі.

Результати досліджень. На (рис. 4) показаний графік зміни локальних значень статичного тиску в залежності від висоти потоку струменя, що витікає з отвору в тарілці провального типу.

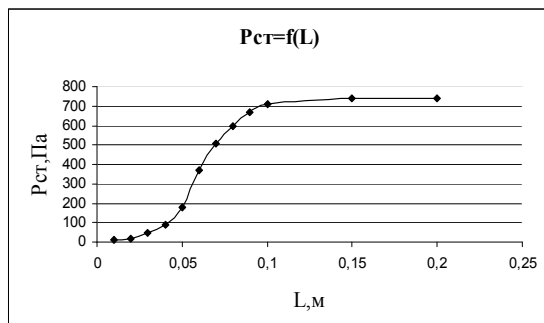


Рис. 4. Графік залежності локального статичного тиску ($\Delta P_{ст.}$, Па) від відстані до плато тарілки (L , м) для швидкості газу в перерізі колони $w = 3,63$ м/с. Діаметр отвору становив $d_0 = 0,023$ м

З графіка (рис.4) видно, що різка зміна статичного тиску газового струменя відбувається на відстані близько $L = 0,1$ м від плато тарілки.

Таким чином, питома кінетична енергія газового струменя в перерізі тарілки, переходить в питому потенційну енергію газового потоку в перерізі колони, на висоті близько $L = 0,1$ м від плато тарілки.

У цьому перерізі реалізується режим рухомого газорідного шару, який приходить на зміну режиму однорідного барботажного шару [1].

Висновки.

1. Проведено розрахунок локальних значень статичного тиску по висоті потоку газового струменя, що виходить з одиночного отвору в тарілці провального типу;

2. Питома кінетична енергія газового струменя переходить в питому потенційну енергію потоку газового струменя, на висоті близько $L = 0,1$ м від плато тарілки.

Література

1. Тараненко Г.В. Гидравлические и массообменные характеристики тарелок провального типа с различным диаметром отверстий: монография. - Луганск: изд-во ВНУ им. В. Даля, 2013. 174 с.
2. Касаткин А.Г., Дытнерский Ю.И., Попов Д.М. Гидравлические закономерности процессов на барботажных тарелках провального типа. *Хим. пром.* Москва, 1961. № 7. С. 482 – 491.
3. Васильев А.С., Талачев В.С., Павлов В.П., Плановский А. Н. Закономерности истечения струи газа в жидкость. *ТОХТ* Москва, 1970. том IV. № 5. С. 727 – 735.
4. Тараненко Г.В. Исследование гидродинамических характеристик тарелок провального типа *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.* Луганськ, 2013. Вип. 14. С. 143 – 146.

References

1. Taranenko G.V. Hydraulic and mass transfer characteristics of the dual-flow plates with different

diameter holes]. *Lygansk: VNU. V. Dahl, 2013, - 174 p.*

2. Kasatkin A.G., Dytneriskij Ju.I. Popov D.M. Hydraulic regularities of the processes on bubble plates dual-flow of type. *Chemical industry, 1961. №7. P. 482–491.*
3. Vasil'ev A.C., Talachev B.C., Pavlov V.P., Planovskiy A.N. Regularities of the outflow of a gas jet into a liquid. *TOKHT Moscow, 1970. Volume IV. No. 5. P. 727 - 735.*
4. Taranenko G.V. Investigation of hydrodynamic characteristics of plates dual-flow of type. *Visnyk Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl. Luhansk, 2013. Vip. 14. P. 143-146.*

Тараненко Г.В. Дослідження витікання газу з отвору в тарілці провального типу

В работе рассмотрены особенности ввода газа в жидкость на тарелках провального типа, которые определяют гидродинамические режимы их работы тарелок. Работа тарелки рассматривается на основе уравнения Бернулли в различных сечениях газожидкостного слоя. Обосновывается величина определенной высоты газожидкостного слоя, при которой наступает смена гидродинамического режима в газожидкостном слое на тарелках провального типа. Был проведен анализ литературы по методикам измерения динамического напора струи газа, вытекающего из отверстия в плоской стенке в жидкость. Показана идентичность гидродинамических характеристик истечения газовой струи в воздух и воду. Таким образом, ядро газожидкостной струи на достаточном расстоянии от отверстия, остается газовым.

Ключевые слова: газ, жидкость, гидродинамический режим, тарелки провального типа, газожидкостной слой, сечение слоя, высота слоя.

Taranenko G.V. Investigation of gas outflow from hole in the dual-flow plate

Trays of dual-flow type are widely used in chemical and other related industries. They have proven to be efficient for working with contaminated liquid and gas streams, when other types of trays are problematic to use. They are easy to manufacture and reliable in operation. The author of this article considered the operation of dual-flow type trays with a small free section, $f \leq 25\%$. The disadvantages of the dual-flow trays include a relatively narrow range of effective work. Several hydrodynamic modes of operation are realized on such trays. Therefore, an accurate calculation of such trays is necessary, which is associated with the operating modes of the dual-flow type trays. There are three modes of operation of the trays, namely: a homogeneous bubbling layer mode, a moving gas-liquid layer mode and a gas-liquid layer destruction mode. In [2], it was proposed to consider the gas-liquid layer on a dual-flow type tray as a local resistance for passage of both gas and liquid. The authors wrote down the Bernoulli equation for two sections of the gas-liquid layer, one of which is located on the surface of the tray, and the other one at the exit from the foam layer. It is noted that for the gas flow, it is essential that when passing through the foam layer its velocity changes sharply from the velocity in the holes of the tray w_0 to the gas velocity at the exit from foam w . In this case, usually $w_0^2 > w^2$ by 25 - 100 times. For a liquid, it can be assumed that its velocity will not change significantly, since the fraction of the section of the apparatus occupied by the liquid is small. In [3], an experimental study of the hydrodynamic features of the outflow of gas jets into liquid was carried out for the jet regime of gas outflow into liquid, the formation of a stable non-vanishing gas flow (torch). Inside the formed gas-liquid struc-

tures, the fields of total and static pressures were measured using piezometric tubes. The difference between the measured values of the total and static pressures was used to calculate the value of the dynamic head at certain level. Analysis of the data in [3] shows that the nature of the gas outflow from the hole in the wall into water and air is the same. The dynamic head has a maximum value near the hole in the wall and takes on a minimum value at a distance of about 0.1 m from the hole in the wall. In [4], measurements were made of the dynamic pressure in a single hole of a dry dual-flow type tray with a free section $f = 16.3, 25$ and 35.6 . The local values of the dynamic pressure along the height of the gas jet were measured with a sensor (Pitot tube). The local values of the dynamic pressure, changed along the height of the gas jet stream, reach their minimum values at height of about $L = 0.1$ m from the tray surface. Also, the calculation of the local values of static pressure along the height of the gas jet coming out of a single hole of the dual-flow type tray was carried out. The calculation was performed using the Bernoulli equation. Thus,

the specific kinetic energy of the gas jet in the tray cross section is converted into the specific potential energy of the gas flow in the column cross section, at a height of about $L = 0.1$ m from the tray surface. In this cross section, operates the mode of a moving gas-liquid layer, which replaces the mode of a homogeneous bubbling layer.

Key words: gas, liquid, hydrodynamic regime, plates dual-flow of type, gas-liquid layer, layer section, layer height.

Тараненко Геннадій Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк), gtaranenko@ukr.net

Стаття подана 08.02.2021 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-128-132>

УДК 629.4.083:629.45

БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ХОДОВИХ ЧАСТИН ВАГОНІВ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Фомін О.В., Ловська А.О., Скуріхін Д.І., Бондаренко В.В.

MULTI-FUNCTIONAL DEVICE FOR MONITORING OF THE TECHNICAL CONDITION OF RUNNING GEARS OF WAGONS DURING OPERATION

Fomin O.V., Lovska A.O., Skurikhin D.I., Bondarenko V.V.

В публікації подані результати дослідження впливу засобів контролю технічного стану та технічної діагностики на експлуатаційну готовність залізничного рухомого складу. В результаті показано, що для збільшення коефіцієнта готовності потрібно прагнути не тільки до збільшення напрацювання на відмову вузлів вагона, але й до скорочення часу змушеного простою вагона на операціях технічного обслуговування і ремонту. Застосування сучасних засобів контролю технічного стану ходових частин вагонів дозволяє значно скоротити час змушеного простою вагонів. З'ясовано, що важливим напрямком вдосконалення системи технічного обслуговування і ремонту вагонів є широке впровадження об'єктивних методів і автоматизованих засобів технічної діагностики і контролю. Зазначено, що під час зупинок поїздів на станціях технічне обслуговування носить суб'єктивний характер, а якість суб'єктивного діагностування або контролю технічного стану має дуже великий розкид, так як залежить від стану і досвіду оглядача, змінюється від умов погоди і пори доби, тощо. Для удосконалення технології технічного обслуговування, автоматизації та переважного виключення суб'єктивних методів контролю технічного стану запропоновано застосування багатофункціонального пристрою оглядача вагонів на основі технологій автоматизованого контролю технічного стану та ідентифікації рухомого складу залізниць під час зупинок поїздів на станціях. Відмічено, що впровадження на залізницях систем автоматичної ідентифікації рухомого складу сприяє оперативному доступу до інформації про параметри вагонів в реальному режимі часу, тому очікується, що завдяки поєднанню систем контролю технічного стану та автоматичної ідентифікації стане можливим впровадження нових концепцій системи технічного обслуговування та ремонту, підвищення експлуатаційної готовності рухомого складу залізниць.

Ключові слова: вагон, ходові частини, контроль технічного стану, пристрій оглядача вагонів, власні коливання, автоматична ідентифікація

Актуальність дослідження. Багаторічна практика експлуатації складних систем показує, що важливим завданням для підтримки працездатного або

справного стану об'єкта є організація і проведення технічного обслуговування (ТО) його елементів. Технології ТО ділять на дві групи: пасивні й активні. На сьогоднішній день у структурних підрозділах залізничного транспорту України прийнята система планово-попереджувального технічного обслуговування й ремонту, яка повинна забезпечувати безвідмовну експлуатацію рухомого складу. Досягається це шляхом заміни вузлів і деталей у строки, що установлені на підставі статистичного аналізу відмов.

Відомо, що при експлуатації рухомого складу найбільш відповідальним, з боку безпеки руху, устаткуванням є ходові частини. Викликане це тим, що останні забезпечують безпосередню взаємодію одиниць рухомого складу з верхньою будовою колії. Стикові зазори рейок, хрестовини, стрілки, нерівномірний знос рейок, пучини, розширення колії, нерівномірність твердості земляного полотна, а також негативні атмосферні впливи обумовлюють тяжкі умови експлуатації ходових частин рухомого складу [1, 2]. Збільшення жорсткості баласту колії й застосування більш потужних профілів рейок ведуть до збільшення динамічних навантажень виникаючих при взаємодії РС і колії.

Теоретичний аналіз дослідження. В публікаціях [3, 4] та дисертаційному дослідженні [5] запропоновано альтернативний підхід до контролю технічного стану ходових частин під час руху вагона, в основі якого лежить реєстрація пружних коливань колісної пари через повітря датчиками, які розташовані на рамі вагона. Принцип дії пристрою акустичного контролю колісних пар проілюстровано у відеоматеріалі [6]. Недоліками цієї системи є неможливість проводити контроль технічного стану рухомого складу під час зупинок поїздів на станціях.

Мета статті. Запропонувати спосіб та пристрій контролю технічного стану ходових частин вагонів в експлуатації, а саме під час зупинок на станціях.

Задачі дослідження. Дослідити вплив засобів контролю технічного стану та технічного діагностування на експлуатаційну готовність рухомого складу залізниць, проаналізувати існуючі способи контролю технічного стану вагонів під час зупинок, запропонувати новий спосіб і концепт пристрою оглядача вагонів.

Викладення основного матеріалу дослідження. Важливою характеристикою експлуатаційної надійності ходових частин вагонів є витрати часу на технічне обслуговування і поточний ремонт. Тому одними із основних показників, що характеризують надійність ходових частин у експлуатації є коефіцієнт готовності (A) та коефіцієнт простою (U). Коефіцієнти готовності та простою показують безпосередній зв'язок між показниками безвідмовності та ремонтпридатності і широко використовуються у загальній теорії надійності машин. Позначення комплексних показників надійності прийнято згідно [7].

Стационарні значення коефіцієнтів готовності та простою для відновлюваних об'єктів визначаються за виразами 1 та 2:

$$A = \frac{T_c}{T_c + T_e} = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \quad (1)$$

де T_c - середній напрацювання на відмову;
 T_e - середній час відновлення;
 μ - інтенсивність відновлення ($\mu=1/T_e$);
 λ - інтенсивність відмов.

$$U = \frac{T_e}{T_c + T_e} = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \quad (2)$$

З виразу 1 видно, що для збільшення коефіцієнта готовності потрібно прагнути не тільки до збільшення напрацювання на відмову вузлів вагона, але й до скорочення часу змушеного простою вагона на операціях ТО і Р. Застосування сучасних засобів контролю технічного стану ходових частин вагонів дозволяє значно скоротити час змушеного простою вагонів.

Для ілюстрації впливу засобів контролю технічного стану на експлуатаційну готовність приведено складові середнього часу відновлення ходових частин на прикладі заміни колісної пари на шляху прямуювання наведено в (табл. 1). Складові приведені у виразі:

$$T_e = t_3 + t_o + t_{n.o}, \quad (3)$$

Відомо, що основі діагностування лежать три види завдань: діагноз, прогноз і генезис. Поняття діагноз означає розпізнавання, визначення. Таким чином, діагностування вагонів або їх складових частин вирішує завдання по визначенню технічного стану, в якому знаходиться об'єкт зараз. За результатами діа-

гностування визначається якість виготовлення або ремонту вагонів.

Таблиця 1

Аналіз складових середнього часу відновлення

Позначення	Загальнотехнічне визначення	Модифіковане визначення	Чисельне значення, хв
t_3	активний час заміни елементу конструкції	час заміни колісної пари	42 - 54
t_d	час, що витрачається на доставку запасних частин від місця зберігання до місця ремонту об'єкту	час на маневрові роботи	20-40
t_o	організаційний час, тобто час, обумовлений витратами на виклик фахівців до місця експлуатації об'єкту, діагностув. технічного стану	час обробки рухомого складу	15 - 30
$t_{п.д.}$	додатковий час простою у зв'язку з відсутністю запасних частин в наявності	затримка в зв'язку з відсутністю потрібної колісної пари	не нормується

Завданнями другого типу є прогнозування технічного стану, в якому виявиться вагон через деякий період експлуатації. Ці завдання постійно вирішуються на пунктах технічного обслуговування вагонів (ПТО), де не тільки визначається технічний стан вагонів, а й оцінюється можливість їх проходження до наступного ПТО без виникнення відмов.

До третього типу відносяться завдання визначення технічного стану вагона в певний момент часу в минулому. За аналогією такі завдання називають генезом. Завдання генезису постійно виникають, наприклад, коли необхідно встановити причину несправності, відмови, тобто визначити технічний стан рухомого складу перед транспортною подією.

Всі перераховані завдання в експлуатації рухомого складу залізниць вирішуються різними методами. Діагностування вагонів на шляху прямуювання виконує оглядач вагонів (рис. 1) за допомогою органів чуття (органолептичне діагностування):

- оглядом визначають тріщини, ослаблення кріплення, зміщення;
- обмацування - нагріву, ослаблення кріплень;
- по запаху - замикання, перегріву, витоки і т. д.
- на слух (при русі поїзда) - дефекти на поверхні кочення коліс, деталі що волочаться, несправності буксових вузлів та ін.
- на слух (при простукуванні молотком) - тріщини, ослаблення кріплень, обриви деталей.

Якість суб'єктивного діагностування або контролю технічного стану має дуже великий розкид, так як залежить від стану і досвіду оглядача, змінюється від умов погоди і пори доби, а головне, визначається

тільки явний прояв відмови об'єкта. Виявлення же прихованих дефектів, визначення граничних станів об'єкта органолептичним методом фактично неможливо, особливо у складних конструкцій.



Рис. 1. Органолептичне діагностування вагонів оглядачем під час зупинки

Для удосконалення технології технічного обслуговування, автоматизації та переважного виключення суб'єктивних методів контролю технічного стану пропонується застосування багатофункціонального пристрою оглядача вагонів на основі технологій автоматизованого контролю технічного стану та ідентифікації рухомого складу залізниць під час зупинок поїздів на станціях.

Поставлена задача вирішується тим, що у комплект контролю рейкового рухомого складу під час зустрічі з ходу та зупинки на станції входять наступні складові:

- багатофункціональний пристрій оглядача вагонів, який складається з акустичного сенсора (мікрофона), пірометра, лазерного дальноміра, світлодіодного ліхтаря, зчитувача RFID, зчитувача штрих-коду, модему цифрового радіозв'язку, GPS-приймача, дисплея, клавіатури, акумуляторної батареї та usb-порту, які підключені до мікропроцесорного блоку управління і відповідного програмного забезпечення;

- АРМ диспетчера, яке складається з серверу системи дистанційного контролю рейкового рухомого складу до якого підключений модем цифрового радіозв'язку та відповідного програмного забезпечення;

- віддаленого клієнта, який складається з ПК клієнта до якого підключений модем та відповідного програмного забезпечення;

- об'єкт контролю;
- збуджувач власних коливань.

Суть процедури контролю технічного стану пояснюється ілюстрацією (рис. 2) де зображено взаємодію об'єкту контролю 27, збуджувача власних коливань 28, багатофункціонального пристрою оглядача вагонів 26, АРМа диспетчера та віддаленого клієнта.

Для забезпечення операцій контролю технічного стану та ідентифікації одиниць рухомого складу пристрій оглядача містить в собі: акустичний сенсор (мікрофон) 10, пірометр 11, лазерний дальномір 9, світлодіодний ліхтар 8, зчитувач RFID 12 та штрих-коду 13, модем цифрового радіозв'язку 20, антену 5, GPS-приймач 19, антену 6, дисплей і клавіатуру 15, акумуляторну батарею 17 та USB-порт 18, які підключені до мікропроцесорного блоку управління 7.

Для підвищення готовності одиниць рухомого складу багатофункціональний пристрій оглядача вагонів підключений за допомогою технології цифрового радіозв'язку 1 до АРМ диспетчера 29, який складається з серверу системи дистанційного контролю рейкового рухомого складу 22, модему цифрового радіозв'язку 31, антени 32 та відповідного програмного забезпечення 24, що за допомогою дротової або бездротової технології зв'язку 2 АРМ диспетчера 29 підключено до віддаленого клієнта 30, який складається з ПК клієнта (портативного або стаціонарного), модему 21 (якщо технологія зв'язку 2 бездротова до складу також входить антена 33) та відповідного програмного забезпечення 25.

Збуджувач власних коливань може використовуватися для різних деталей ходових частин вагонів: колеса, вісі, буксові вузли, поводки, деталі гальмівної важільної передачі та ін. Після збудження власних коливань у деталі утворюються звукові хвилі, які фіксуються мікрофоном і обробляються мікропроцесорним блоком управління відповідно до розроблених алгоритмів, після чого інформація про технічний стан елементів ходових частин стає доступною на дисплеї пристрою оглядача і передається до АРМ диспетчера та начальника поїзда. Пірометр потрібний для вимірювання температури буксових вузлів, лазерний дальномір для перевірки розмірів взаємного розташування, зчитувачі RFID та штрих-коду для забезпечення операцій автоматичної ідентифікації вагонів та їх деталей.

Висновки. Важливим напрямком вдосконалення системи технічного обслуговування і ремонту вагонів є широке впровадження об'єктивних методів і автоматизованих засобів технічної діагностики і контролю. В той же час впровадження на залізницях систем автоматичної ідентифікації рухомого складу сприяє оперативному доступу до інформації про параметри вагонів в реальному режимі часу. Завдяки поєднанню систем контролю технічного стану та автоматичної ідентифікації стає можливим впровадження нових концепцій системи технічного обслуговування та ремонту.

Подяка

Дані дослідження проведені в рамках наукової теми молодих вчених "Інноваційні засади створення ресурсозберігаючих конструктивів вагонів шляхом урахування уточнених динамічних навантажень та функціонально-адаптивних флеш-концептів", яка виконується за рахунок коштів державного бюджету України з 2020 р.

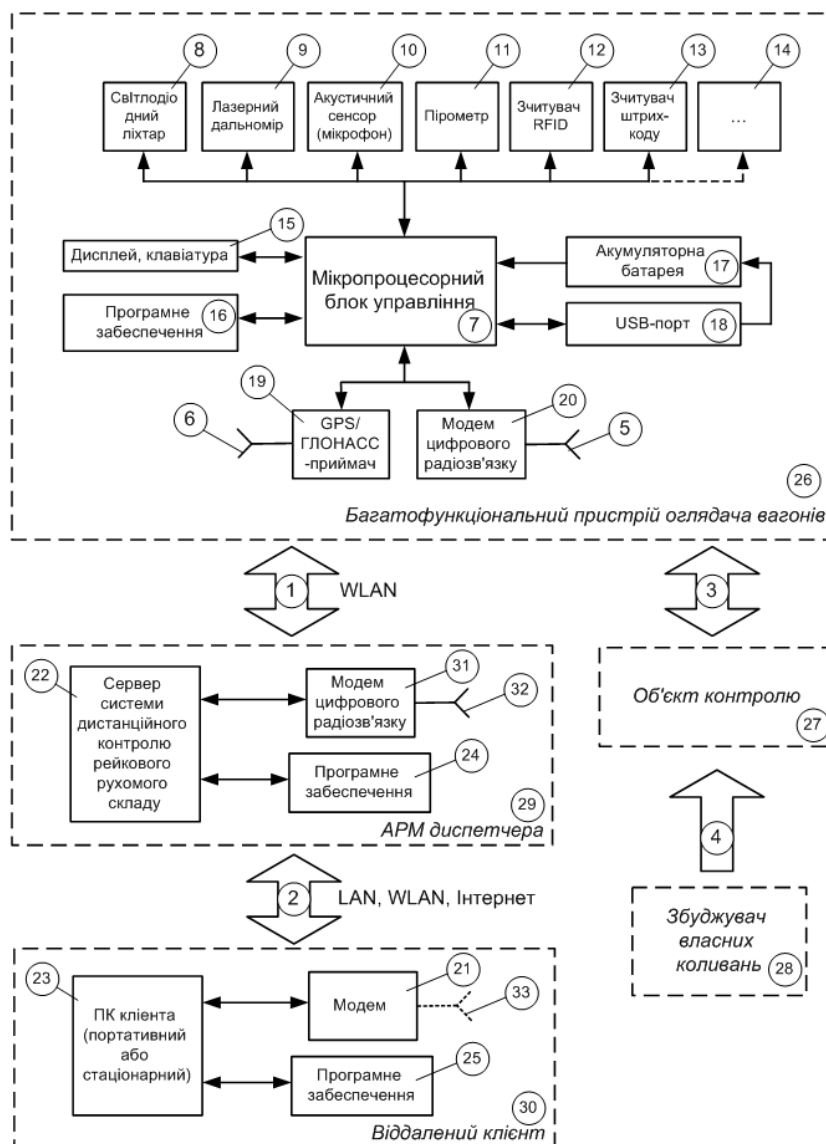


Рис. 2. Концепт багатофункціонального пристрою оглядача вагонів

Література

1. Fomin Oleksij, Lovska Alyona, Radkevych Valentyna, Horban Anatoliy, Skliarenko Inna and Gurenkova Olga The dynamic loading analysis of containers placed on a flat wagon during shunting collisions. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. Vol. 14, No. 21, November 2019: PP 3747-3752 http://www.arnpjournals.org/jeas/research_papers/rp_2019/jeas_1119_7989.pdf
2. Fomin Oleksij, Lovska Alyona. Establishing patterns in determining the dynamics and strength of a covered freight car, which exhausted its resource. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6, Issue 7 (108). PP. 21–29.
3. Мартинов І.Е., Бондаренко В.В., Скуріхін Д.І. Підвищення експлуатаційної надійності пасажирських вагонів на основі акустичного контролю колісних пар. *Міжнародний інформаційно-технічний журнал «Вагонний парк»*. Харків. 2011. Вип. 6. С. 36–39.
4. Бондаренко В.В., Скуріхін Д.І., Мосійчук Т.В. Розроблення та випробування макетного зразка пристрою акустичного контролю колісних пар. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. Харків. Вип. 141. 2013. С. 83 – 87.

5. Скуріхін Д. І. Удосконалення технології технічного обслуговування та діагностики колісних пар пасажирських вагонів на основі методу акустичного контролю: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / ДНДЦ УЗ Київ, 2014. 143 с.
6. Onboard Acoustic Diagnostic System of railway vehicle. URL: <https://youtu.be/hWA4xnJubH0> (дата звернення: 13.02.2021).
7. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. [Чинний від 1996-01-01] Вид. офіц. Київ, 1994. 91 с. (Інформація та документація).

References

1. Fomin Oleksij, Lovska Alyona, Radkevych Valentyna, Horban Anatoliy, Skliarenko Inna and Gurenkova Olga The dynamic loading analysis of containers placed on a flat wagon during shunting collisions. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. Vol. 14, No. 21, November 2019: PP 3747-3752 http://www.arnpjournals.org/jeas/research_papers/rp_2019/jeas_1119_7989.pdf
2. Fomin Oleksij, Lovska Alyona. Establishing patterns in determining the dynamics and strength of a covered

- freight car, which exhausted its resource. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 6, Issue 7 (108). PP. 21 – 29.
- Martynov I.E., Bondarenko V.V., Skurihin D.I. Pidvyshhennja ekspluatacijnoi' nadijnosti pasazhyr'skyh vagoniv na osnovi akustychnogo kontrolju kolisnyh par. Mizhnarodnyj informacijno-tehnichnyj zhurnal «Vagonnyj park». Harkiv. 2011. Vyp. 6. S. 36 – 39.
 - Bondarenko V.V., Skurihin D.I., Mosijchuk T.V. Rozroblennja ta vyprobuvannja maketnogo zrazka prystroju akustychnogo kontrolju kolisnyh par. Zbirnyk nauovyh prac' UkrDAZT. Harkiv. Vyp. 141. 2013. S. 83 – 87.
 - Skurihin D.I. Udoskonalennja tehnologii' tehnichnogo obslugovuvannja ta diagnostyky kolisnyh par pasazhyr'skyh vagoniv na osnovi metodu akustychnogo kontrolju: dys. ... kand. tehn. nauk: 05.22.07 / DNDC UZ Kyi'v, 2014. 143 s.
 - Onboard Acoustic Diagnostic System of railway vehicle. URL: <https://youtu.be/hWA4xnJubH0> (data zvernennja: 13.02.2021).
 - DSTU 2860-94. Nadijnist' tehniky. Terminy ta vyznachennja. [Chynnyj vid 1996-01-01] Vyd. ofic. Kyi'v, 1994. 91 s. (Informacija ta dokumentacija).

Фомин А.В., Ловская А.А., Скурихин Д.И., Бондаренко В.В. Многофункциональное устройство для контроля технического состояния ходовых частей вагонов в эксплуатации

В публикации представлены результаты исследования влияния средств контроля технического состояния и технической диагностики на эксплуатационную готовность железнодорожного подвижного состава. В результате показано, что для увеличения коэффициента готовности нужно стремиться не только к увеличению наработки на отказ узлов вагона, но и к сокращению времени вынужденного простоя вагона на операциях технического обслуживания и ремонта. Применение современных средств контроля технического состояния ходовых частей вагонов позволяет значительно сократить время вынужденного простоя вагонов. Выяснено, что важным направлением совершенствования системы технического обслуживания и ремонта вагонов является широкое внедрение объективных методов и автоматизированных средств технической диагностики и контроля. Отмечено, что во время остановок поездов на станциях техническое обслуживание носит субъективный характер, а качество субъективного диагностирования или контроля технического состояния имеет очень большой разброс, так как зависит от состояния и опыта осмотрщика, меняется от условий погоды и времени суток и т.д. Для усовершенствования технологии технического обслуживания, автоматизации и преимущественного исключения субъективных методов контроля технического состояния предложено применение многофункционального устройства осмотрщика вагонов на основе технологий автоматизированного контроля технического состояния и идентификации подвижного состава во время остановок поездов на станциях. Отмечено, что внедрение на железных дорогах систем автоматической идентификации подвижного состава способствует оперативному доступу к информации о параметрах вагонов в реальном режиме времени, поэтому ожидается, что благодаря сочетанию систем контроля технического состояния и автоматической идентификации станет возможным внедрение новых концепций системы технического обслуживания и ремонта, повышение эксплуатационной готовности подвижного состава железных дорог.

Ключевые слова: вагон, ходовые части, контроль технического состояния, устройство осмотрщика вагонов, собственные колебания, автоматическая идентификация

Fomin O.V., Lovska A.O., Skurikhin D.I., Bondarenko V.V. Multi-functional device for monitoring of the technical condition of running gears of wagons during operation

The publication presents the results of a study of the influence of technical condition monitoring and technical diagnostics on the operational readiness of railway rolling stock. As a result, it was shown that in order to increase the availability factor, it is necessary to strive not only to increase the mean time between failures of the car's units, but also to reduce the time of the forced downtime of the car during maintenance and repair operations. The use of modern means of monitoring the technical condition of the running gears of cars can significantly reduce the time of forced downtime of cars. It was found that an important direction of improving the system of maintenance and repair of cars is the widespread introduction of objective methods and automated means of technical diagnostics and control. It was noted that during train stops at stations, maintenance is subjective, and the quality of subjective diagnostics or monitoring of technical condition has a very wide spread, since it depends on the condition and experience of the inspector, changes from weather conditions and time of day, etc. To improve the technology of maintenance, automation and the predominant elimination of subjective methods of monitoring the technical condition, it is proposed to use a multifunctional device for a car inspector based on technologies for automated monitoring of the technical condition and identification of rolling stock during train stops at stations. A vibration monitoring system is a set of tools used to measure one or more parameters to identify changes along machinery life. Monitoring these parameters help identifying early faults like imbalance, bearing faults, looseness among others. It was noted that the introduction of automatic identification systems for rolling stock on the railways facilitates prompt access to information on the parameters of cars in real time, therefore it is expected that, thanks to a combination of technical condition monitoring and automatic identification systems, it will become possible to introduce new concepts of the maintenance and repair system, increase operational readiness of railway rolling stock.

Key words: railway car, bogies, technical condition monitoring, car inspector device, natural vibrations, automatic identification

Фомін Олексій Вікторович – д.т.н., доц., професор кафедри вагонів та вагонного господарства, Державний університет інфраструктури та технологій (м. Київ), fomialeksejvictorovic@gmail.com

Ловська Альона Олександрівна – к.т.н., доц., доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту (м. Харків), alyonalovskaya.vagons@gmail.com

Скурихін Дмитро Ігорович – к.т.н., доц., доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту (м. Харків), skurikhin@kart.edu.ua

Бондаренко В'ячеслав Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту (м. Харків), bondarenko@kart.edu.ua

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-133-137>

УДК 621.867.82

КОМПЛЕКСНІ ВИПРОБУВАННЯ НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЙ ПАСАЖИРСЬКОГО ВАГОНА З ЗАКІНЧЕНИМ ПРИЗНАЧЕНИМ ТЕРМІНОМ СЛУЖБИ ЗАВОДОМ ВИРОБНИКОМ

Фомін О.В., Прокопенко П.М.

COMPLEX TESTING OF THE CARRIER CONSTRUCTIONS OF THE PASSENGER WAGON WITH THE DEFINED DESIGNATED SERVICE PERIOD OF THE PLANT MANUFACTURER

Fomin O.V., Prokopenko P.M.

Аналіз технічного стану пасажирських вагонів після проведення планових видів ремонту показує, що значна їх частина знаходиться в задовільному стані. Через недостатнє фінансування придбання нових вагонів для забезпечення безперервного виконання пасажирських перевезень залізничним транспортом актуальним залишається завдання проведення робіт щодо дослідження з визначення залишкового ресурсу та можливості продовження експлуатації пасажирських вагонів в межах України за межами призначеного терміну служби.

Ключові слова: пасажирський вагон, строк служби, випробування, несучі конструкції.

Вступ. З метою забезпечення безперервного виконання пасажирських перевезень, актуальним залишається завдання з забезпечення експлуатації рухомого складу поза подовженим строком служби, у тому числі некупейних пасажирських вагонів. Виходячи з цього, впливає необхідність проведення комплексних досліджень, спрямованих на обґрунтування можливості щодо забезпечення експлуатації зі збереженням динамічних та міцнісних характеристик. На даний час на мережі залізниць України перебувають в експлуатації пасажирські вагони різних моделей і їх модифікацій з продовженим строком служби, який наближається до граничного. Для вирішення питання про можливість подальшої експлуатації з вичерпаним терміном служби проводиться їхнє технічне діагностування.

Аналіз технічного стану пасажирських вагонів після проведення планових видів ремонту показує, що значна їх частина знаходиться в задовільному стані. Через недостатнє фінансування придбання нових пасажирських вагонів для забезпечення безперервного виконання пасажирських перевезень залізничним транспортом актуальним залишається завдання проведення робіт щодо дослідження з ви-

значення залишкового ресурсу та можливості продовження експлуатації пасажирських вагонів.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Питання дослідження несучої здатності кузовів пасажирських вагонів приділено не достатню увагу. Робота [1] описує дослідження несучої здатності напіввагонів моделі 12-9745. В матеріалі [2] наведено удосконалення несучих конструкцій напіввагонів, в тому числі і шляхом збільшення строку експлуатації. Збільшення строку досягається методом удосконаленням їх конструктивних властивостей, наприклад за рахунок впровадження матеріалів з поліпшеними характеристиками. В роботі [3] висвітлені особливості кузовів нового покоління. В праці описані плюси використання нових прогресивних матеріалів для окремих складових конструкцій вагонів. Однак питанням подовження реалізації такого напрямку при подовженні строку експлуатації напіввагонів не приділено увагу. Заходи щодо удосконалення несучої конструкції кузова напіввагона з метою забезпечення надійності його кріплення на палубі залізничного порому наведені у [4, 5]. Оцінка точності транзиту залізничних колій, для переміщення сировини та готової продукції гірнично-металургійної промисловості викладені у [6, 7]. Конструкційні особливості вагона для інтермодальних перевезень розглянуті у [8]. Вагон має понижену середню частину, а наявність оборотної частини дає можливість здійснювати завантаження/вивантаження автотехніки на/з нього самокатом. В роботі [9] наведено результати досліджень з визначення характеру та рівня впливу різних вантажних візків на міцнісні якості несучих систем вагонів. Однак, в задачі такого дослідження не включались питання визначення відповідного впливу на кузови, які експлуатуються поза нормований строк. В

дослідженнях [10, 11] аналізувались особливості руху та взаємодії одиниць нового рухомого складу. А відповідні дослідження для одиниць з показниками, які відображають експлуатаційний знос не проведені. Підсумовуючи результати наведеного вище аналізу можна відзначити, що на теперішній час питання щодо можливостей продовження строку експлуатації несучих конструкцій кузовів вагонів у повному обсязі не вирішувались.

Мета і завдання дослідження. Ціль роботи – це описання теоретичних аспектів проведення комплексних випробувань пасажирських вагонів з визначенням характеристик міцності несучих конструкцій, їх залишкового ресурсу та можливість продовження строку експлуатації.

Основний матеріал. Об'єктом дослідження було обрано пасажирський некупейний вагон побудови КВЗ (рис. 1, 2).

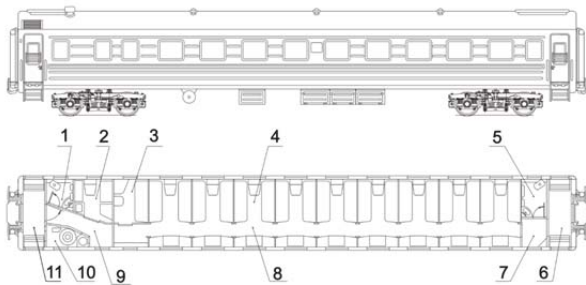


Рис. 1. Пасажирський некупейний вагон:
1, 5 – туалетні відділення; 2 – службове приміщення;
3 – купе для провідників; 4 – дев'ять шестимісних пасажирських відділень; 6, 11 – два тамбури;
7, 9 – два малі коридори; 8 – коридор вздовж вагона

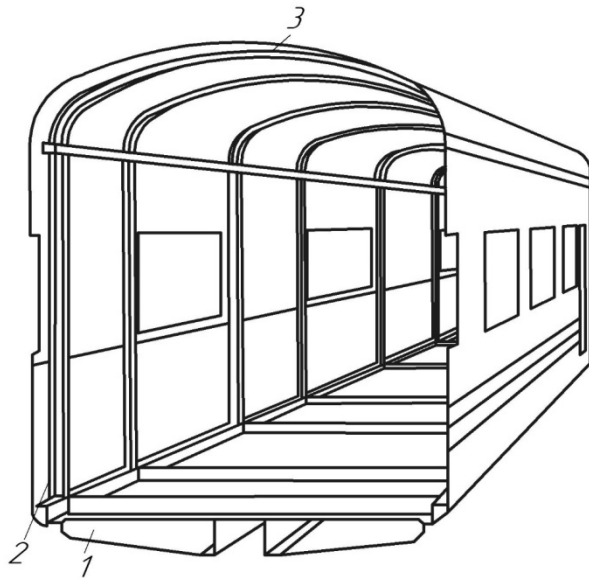


Рис. 2. Рама некупейного вагона:
1 – Поперечна балка рами, 2 – стійка стіни, 3 – дуга даху

Основним завданням випробування скидання з клинів є оцінка власних частот коливань та динамічних напружень в елементах рами кузова вагона.

Завданням типових випробувань міцності при зіткненні: визначення і оцінка динамічних напружень і деформацій в несучих конструкціях рами кузова вагона при прикладанні нормативних ударних сил через автозчепне обладнання, залишкового ресурсу та коефіцієнта запасу опору втомі.

Виконавши аналіз особливості конструкції несучих систем вагона та відмови в експлуатації розроблено схему встановлення тензорезисторів на несучих конструкціях пасажирського вагона (рис. 3).

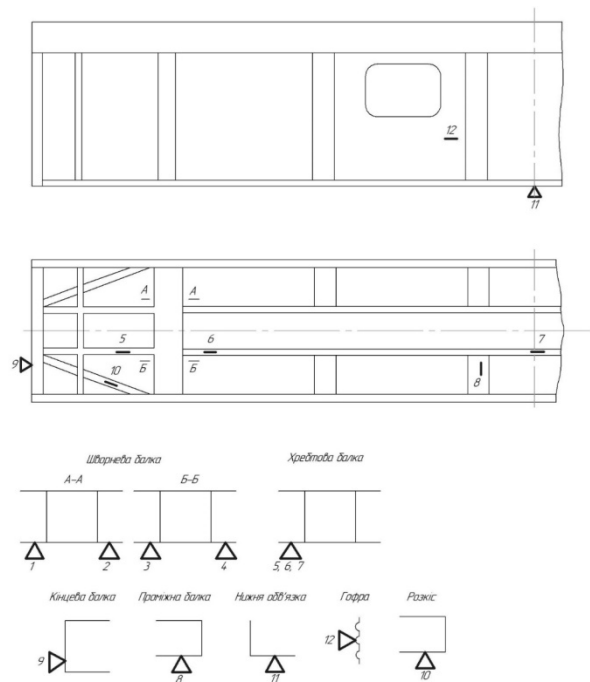


Рис. 3. Схема розміщення тензорезисторів на рамі вагона

Оцінка власних частот коливань здійснюється за результатами випробувань «скидання з клинів». Суть випробувань полягає в тому, що під колеса дослідного вагона в залежності від досліджуваних частот власних коливань встановлюються клини, а потім проводиться скидання вагона шляхом його нахилу на клин.

Для визначення поздовжніх зусиль, що діють на випробовуваний вагон в момент удару, застосовується автозчеп-динамометр, обладнаний тензорезисторами і попередньо проградуєований статичним навантаженням до 3,5 МН на стенді.

Типові випробування на співудар для визначення міцності елементів конструкції пасажирського вагона проводяться на прямій горизонтальній ділянці залізничної колії за допомогою локомотива шляхом накопчування локомотивом вагона-бойка на дослідний вагон, який знаходиться в підпертому стані.

Крім локомотива при цьому використовується наступне обладнання:

- вагон-бойок масою не менше маси дослідного вагона;

- підпірне обладнання з трьох-чотирьох загальмованих вагонів загальною масою не менше 300 т, переміщення яких обмежено рейковими башмаками. Різниця рівнів осей автозчепів дослідного вагона і вагона-бойка не повинна перевищувати 50 мм.

Схема розміщення рухомого складу під час ударних випробувань наведена на рис. 4.

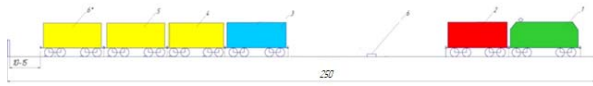


Рис. 4. Схема розміщення рухомого складу під час випробувань:

- 1 – локомотив; 2 – вагон бойок; 3 – дослідний вагон;
- 4,5,6* – вагони підпори; 6 – пристрій для вимірювання швидкості

Співударі вагона при типових випробуваннях проводять за швидкостями, які вказані в таблиці.

Таблиця

Кількість співударів в кожному інтервалі швидкості

Діапазон швидкості зіткнення, км/год.	Кількість співударів	
	Підпертий стан	Вільний стан
Від 3 до 6 вкл.	3	3
Від 6 до 10 вкл.	3	3
Від 10 до 12 вкл.	1	1

Випробування на співудар проводять у такій послідовності:

- вагон обладнується засобами вимірювальної техніки згідно розробленої схеми (установка тензорезисторів у дослідних точках);
- на вагон встановлювався автозчеп-динамометр;
- установка вагона на ділянку залізничної колії для випробувань, пристрою для визначення швидкості накочування вагона-бойка;
- випробування на співудар;
- вимірювання деформацій, швидкості накочування та сили удару вагона-бойка за допомогою засобів вимірювальної техніки;
- огляд конструкції при типових ударними випробуваннях проводиться після кожних 3-5 ударів.

Вибір режиму випробувань на ресурс, обробка і оцінка результатів випробувань виноконується на основі:

- лінійної гіпотези суми пошкоджень;
- кривої втоми у напруженнях: $\sigma_i^{nt} N_i = const$, де N_i – кількість циклів коливань з амплітудою σ_i , m – показник степені.

При визначенні залишкового строку служби вагона враховується вертикальне та поздовжнє динамічні навантаження, які виникають в процесі експлуатації. Розрахунок здійснюється за формулою:

$$T_p = \frac{\left(\frac{\sigma_{a,N}}{[n]}\right)^m \cdot N_0}{N_{cl} \cdot \sum_j (\sigma_{aj}^I)^m \cdot P_j^I + N_{clII} \cdot \sum_k (\sigma_{aj}^{II})^m \cdot P_k^{II}} \quad (1)$$

де T_p - розрахунковий залишковий строк служби вагона, роки;

$\sigma_{a,N}$ - межа витривалості (по амплітуді) для контрольної зони при симетричному циклі та встановленому режимі навантаження при базовому числі циклів, МПа;

m - показник ступеня в рівнянні кривої втоми. Для зварних конструкцій із прокату без зміцнюючої обробки швів $m=4$;

$[n]$ мінімально допустимий коефіцієнт запасу

опору втоми для вибраної зони вагона, $[n] = 1,5$;

N_0 - базове число циклів, $N_0 = 10^7$;

N_{cl}, N_{clII} - число циклів за 1 рік експлуатації для кожного із експлуатаційного навантаження (вертикального та поздовжнього);

$\sigma_{aj}^I, \sigma_{aj}^{II}$ – амплітуди динамічних напруг, приведені до симетричного циклу для кожного із експлуатаційних навантажень та їх діапазонів, МПа;

P_j - ймовірність появи амплітуди з рівнем σ_{aj} .

$$\sigma_{a,N} = \sigma_{a,N}^- (1 - z_p v), \quad (2)$$

де z_p – квантиль розподілення, відповідаючий односторонній ймовірності 95%, $z_p = 1,645$;

v – коефіцієнт варіації порогу витривалості деталі:

- для зварних рам і балок з листового і фасонного прокату при автоматичній зварці під слоєм флюса і в середині захисного газу $v = 0,05$;
- також при напівавтоматичному і ручній зварці $v = 0,07$;

$\sigma_{a,N}^-$ – середнє розрахункове значення порогу витривалості рами:

$$\sigma_{a,N}^- = \frac{\sigma_{-1}^-}{(K_\sigma^-)_k}, \quad (3)$$

σ_{-1}^- – середнє значення порога витривалості гладкого стандартного зразка із матеріала рами при симетричному циклі згину на базі N_0 .

$(K_\sigma^-)_k$ – середнє значення коефіцієнта зниження порога витривалості рами по відношенню до порога витривалості гладкого стандартного зразка, $(K_\sigma^-)_k = 4,5$.

Для оцінки показників опору втоми враховуються напруження несучих конструкцій вагону під час випробувань:

- сил, що виникають під час руху вагону під час коливань підскакування, скручування кузова, галопування та бокової хитації;
- сили взаємодії між вагонами, вагону з локомотивом, гальмування, співударів.

Оцінку n – запасу опору втоми виконується наступним чином.

$$n = \frac{\sigma_{a,N}}{\sigma_{a,e}} \geq [n] \quad (4)$$

де $\sigma_{a,N}$ – границя витривалості (за амплітудою) на-турної деталі в разі симетричного циклу та сталого режиму навантаження на базі випробування $N_0=10^7$ циклів, МПа.

$\sigma_{a,e}$ – розрахункова значення амплітуди динамічного напруження умовного симетричного циклу, приведена до бази N_0 , еквіваленте за пошкоджувальною дією реальному режиму експлуатаційних випадкових напружень протягом проектного терміну служби, МПа.

Висновки. Виході проведення теоретичних досліджень з визначення можливості продовження строку служби пасажирських вагонів, які експлуатуються на залізницях України, було визначено, що стан несучих металевих конструкцій вагонів після тривалої експлуатації не наближається до граничного.

Таким чином отримані теоретичні результати дозволять розробити комплекс робіт та заходів для оцінки залишкового ресурсу несучих металевих конструкцій пасажирських вагонів, які експлуатуються на залізницях України.

Л і т е р а т у р а

- Fomin O.V., Burlutsky O.V., Fomina Yu.V. Development and application of cataloging in structural design of freight car building, Scientific and technical journal «Metallurgical and Mining Industry». 2015, No. 2 – P.250-256.
- Фомін, О.В. Розробка методики впровадження різних профілів в якості складових елементів несучих систем вантажних вагонів, Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків. – 26'2012 С.29-33
- Freight cars major metals / Trains, 2015, Marts. – 20 p.
- Lovska, A. A. Peculiarities of computer modeling of strength of body bearing construction of gondola car during transportation by ferry-bridge, Scientific and technical journal «Metallurgical and Mining Industry». – 2015. - №1. – p. 49 – 54.
- Mirosław Nader, Marian Sala, Jarosław Korzeb, Arkadiusz Kostrzewski. (2014). Kolejowy wagon transportowy jako nowatorskie, innowacyjne rozwiązanie konstrukcyjne do przewozu naczep siodłowych i zestawów drogowych dla transportu intermodalnego, Logistyka. – 2014. – №4. – P. 2272 – 2279.
- Фомін, О.В., Гостра А.В., Вараційне описання конструктивних виконань вантажних вагонів, Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології». – Київ: ДЕТУТ, 2015. – Вип.26-27. – С.137-147.
- Divya Priya G., Swarnakumar A., Modeling and analysis of twenty tonne heavy duty trolley, Intern. J. of Innovative Technology and Research. – 2014. – Vol. 2, №. 6. – P. 1568–1580.
- Krason W., Niezgoda T., Fe numerical tests of railway wagon for intermodal transport according to PN-EU standards, Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences. – 2014. – Vol. 62. – Iss. 4. – P. 843–851.
- Мороз, В. І. "Математичний запис задачі оптимізаційного проектування напіввагонів за критерієм мінімальної матеріалоемності." Зб. наук. праць.-Харків: УкрДАЗТ (2009): 121-131.
- Hauser V., Nozhenko O.S., Kravchenko K.O., Loulova M., Gerlici J., Lack T. Impact of wheelset steering and wheel profile geometry to the vehicle behavior when passing curved track. «Manufacturing Technology». June 2017, Vol. 17, No. 3, p. 306-312.
- Tartakovskiy, E., Gorobchenko O., Antonovych A., Improving the process of driving a locomotive through the use of decision support systems, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 5, Issue 3 (83). – P. 4–11.

References

- Fomin O.V., Burlutsky O.V., Fomina Yu.V. (2015) Development and application of cataloging in structural design of freight car building, Scientific and technical journal «Metallurgical and Mining Industry». No. 2 – P.250-256.
- Fomin, O.V. (2012). Rozrobka metodyky vprovadzhenya riznykh profiliv v yakosti skladovykh elementiv nesuchykh system vantazhnykh vahoniv. [Development of the method of introduction of different profiles as constituent elements of load-bearing systems of freight wagons], Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPi» [Bulletin of the National Technical University "KPI"]. – Kharkiv. – 26'2012 S.29-33.
- Freight cars major metals. Trains, 2015, Marts. – 20 p.
- Lovska, A. A. (2015). Peculiarities of computer modeling of strength of body bearing construction of gondola car during transportation by ferry-bridge, Scientific and technical journal «Metallurgical and Mining Industry». №1. p. 49 – 54.
- Mirosław Nader, Marian Sala, Jarosław Korzeb, Arkadiusz Kostrzewski. (2014). Kolejowy wagon transportowy jako nowatorskie, innowacyjne rozwiązanie konstrukcyjne do przewozu naczep siodłowych i zestawów drogowych dla transportu intermodalnego, [Railway transport wagon as an innovative, innovative construction solution for the transport of semi-trailers and road sets for intermodal transport]. Logistyka. №4. P. 2272 – 2279.
- Fomin, O.V., Hostra A.V. (2015). Variatsiyne opysannya kons-truktyvnykh vykonan' vantazhnykh vahoniv. [Variational description of cons-constructive designs of freight wagons]. Zbirnyk naukovykh prats' Derzhavnoho ekonomiko-tekhnologichnoho universytetu transportu Ministerstva osvity i nauky Ukrayiny: Seriya «Transportni systemy i tekhnolohiyi». [Collection of scientific papers of the State Economic and Technological University of Transport of the Ministry of Education and Science of Ukraine: Series "Transport Systems and Technologies"]. Kyiv: DETUT. Vyp.26-27. – S.137-147.
- Divya Priya G., Swarnakumar A. (2014) Modeling and analysis of twenty tonne heavy duty trolley, Intern. J. of Innovative Technology and Research. Vol. 2, №. 6. – P. 1568–1580.
- Krason W., Niezgoda T. (2014). Fe numerical tests of railway wagon for intermodal transport according to PN-EU standards, Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences. Vol. 62. – Iss. 4. – P. 843–851.
- Moroz, V. I. (2009): Matematychny zapys zadachi optymizatsiynoho proektuvannya napivvahoniv za kry-teriyem minimal'noyi materialoyemnosti. [Mathematical recording of the problem of optimization design of semi-wagons by the criterion of minimal material capacity] Zb. nauk.

- prats'. [Collection of scientific papers]. Kharkiv: UkrDAZT 121-131.
10. Hauser V., Nozhenko O.S., Kravchenko K.O., Loulová M., Gerlici J., Lack T. (2017). Impact of wheelset steering and wheel profile geometry to the vehicle behavior when passing curved track. «Manufacturing Technology». Vol. 17, No. 3, p. 306-312.
 11. Tartakovskiy, E., Gorobchenko O., Antonovych A. (2016). Improving the process of driving a locomotive through the use of decision support systems, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 5, Issue 3 (83). – P. 4–11.

Фомин А.В., Прокопенко П.Н. Комплексные испытания несущих конструкций пассажирских вагонов с истекшим назначенным сроком службы заводом изготовителем

С целью обеспечения бесперебойного выполнения пассажирских перевозок, актуальным остается задача по обеспечению эксплуатации подвижного состава за удлиненным сроком службы, в том числе некупейных пассажирских вагонов. Исходя из этого, следует необходимость проведения комплексных исследований, направленных на обоснование возможности по обеспечению эксплуатации с сохранением динамических и прочностных характеристик. В настоящее время на сети железных дорог Украины находятся в эксплуатации пассажирские вагоны различных моделей и их модификаций с продленным сроком службы, который приближается к предельному. Для решения вопроса о возможности дальнейшей эксплуатации с истекшим сроком службы проводится их техническое диагностирование.

Ключевые слова: пассажирский вагон, срок службы, испытания, несущие конструкции.

Fomin O.V., Prokopenko P.M. Complex testing of the carrier constructions of the passenger wagon with the defined designated service period of the plant manufacturer. In order to ensure the smooth performance of passenger transportation, the task of ensuring the operation of rolling stock beyond extended service life, including non-bundled passenger coaches, remains relevant. On this basis, there is a need for comprehensive research aimed at substantiating the possibility of providing exploitation with the preservation of dynamic and durable characteristics. At present, railway cars of various models and their modifications are being commis-

sioned on the railway network of Ukraine with extended service life, which is approaching the limit. In order to resolve the issue of the possibility of further exploitation with an exhausted service life, their technical diagnostics is carried out. The analysis of the technical condition of passenger cars after the scheduled types of repair shows that a large part of them is in a satisfactory condition. Due to the lack of financing for the purchase of new passenger cars to ensure the smooth running of passenger transportation by rail, the task of carrying out research on residual resource determination and the possibility of continuing the operation of passenger cars remains urgent. The purpose of the work is to highlight the theoretical aspects of carrying out complex tests of passenger cars with determining the characteristics of the strength of load-bearing structures, their residual life and the possibility of extending the service life. The main task of the wedge test is to estimate the natural oscillation frequencies and dynamic stresses in the car body frame elements. Task of typical tests of collision durability: determination and estimation of dynamic stresses and deformations in the supporting structures of the car body frame when applying normative shock forces through auto-coupling equipment, residual life and resistance factor of fatigue resistance. In the course of theoretical studies to determine the possibility of extending the service life of passenger cars operated on the railways of Ukraine, it was determined that the condition of load-bearing metal structures of wagons after a long operation is not approaching the limit. Thus, obtained theoretical results will allow to develop a complex of works and measures for estimation of residual life of load-bearing metal structures of passenger cars used on the railways of Ukraine.

Key words: passenger wagon, service life, tests, load-bearing structures

Фомін Олександр Вікторович – д.т.н., доц., професор кафедри вагони та вагонне господарство, Державний університет інфраструктури та технологій (м. Київ), fomin1985@ukr.net

Прокопенко Павло Миколайович – аспірант кафедри вагони та вагонне господарство, Державний університет інфраструктури та технологій (м. Київ), prokopenko1520mm@gmail.com

Стаття подана 23.01.2021 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-138-151>

УДК 621.793(088.8)

ІМПУЛЬСНІ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ

Харламов Ю.О.

PULSED COMBUSTION CHAMBERS

Kharlamov Y.O.

Узагальнені та проаналізовані конструктивні схеми імпульсних камер згоряння (ІКЗ), які використовуються в установках для детонаційно-газового напилення покриттів. Сформульовано основні вимоги до імпульсних камер згоряння. Розроблено класифікацію ІКЗ за основними ознаками, в тому числі: за функціональним призначенням; видом використовуваного палива; характером подачі газів; за геометричними параметрами ІКЗ – осі каналів горіння і їх кількості, поперечним перерізом і ін.; компоновці та ін. Показана можливість використання перешкоди детонаційної хвилі (ДХ), одержуваних в профільованих ІКЗ, що розширює технологічні можливості методу з нанесення покриттів з тугоплавких матеріалів і відкриває перспективи створення малогабаритних детонаційно-газових установок, включаючи нанесення покриттів на внутрішні поверхні деталей. Дано рекомендації по областям раціонального застосування розглянутих схем ІКЗ і їх проектування.

Ключові слова: газова детонація; газотермічне напилення покриттів; горючі суміші газів; двофазний струмінь; камери згоряння; поперечний переріз; порошки

Вступ. Детонаційно-газовий метод дозволяє отримувати високоякісні покриття різного призначення з порошкових матеріалів – металів, сплавів, тугоплавких сполук і їх композицій [1 – 4]. До його основних переваг відносяться: можливість отримання високої міцності зчеплення покриттів без або при помірному підігріванні основи; зниження вимог до якості підготовки напилюваної поверхні; відносна простота конструкцій технологічної апаратури для нанесення покриттів; можливість створення надійної технологічної апаратури при відсутності конструктивних елементів з низьким терміном служби і ін. Однак, є ряд істотних недоліків [5 – 7]: циклічність процесу нанесення покриттів ускладнює стабілізацію технологічних режимів і контроль за ходом процесу нанесення покриття; високий рівень шуму і наявність інших шкідливих вимагають обов'язкової ізоляції зони обробки; наявність кисневмісного високотемпературного середовища обмежує можливість нанесення покриттів з порошків, що містять ак-

тивні метали і сполуки та ін. Незважаючи на численні дослідження детонаційно-газового методу, до сих пір немає прийнятних уявлень про фізичні механізми явищ, що протікають в детонаційно-газових установках для напилення покриттів (ДГУ), а також рекомендацій з проектування їх основних вузлів і елементів. Основний елемент ДГУ – камера згоряння, де організовується регулярне імпульсне (пульсуюче) спалювання газової суміші, нагрів і прискорення частинок порошку, які формують напилювальний струмінь [4, 7 – 9].

Метою даної статті є узагальнення та аналіз конструктивних схем імпульсних камер згоряння, які використовуються в установках для детонаційно-газового напилення покриттів і розробка рекомендацій щодо їх проектування.

Основні вимоги до імпульсних камер згоряння (ІКЗ). Одиначний робочий цикл детонаційно-газового напилення здійснюється за чотири основні стадії: 1. Повне або часткове заповнення обсягу ІКЗ підготовленої свіжої горючою сумішшю з необхідним за технологічними умовами вмістом палива і окислювача з одночасною або подальшою подачею в певну зону камери порції порошку напилюваного матеріалу. 2. Ініціювання та збудження в ІЗС детонаційного режиму вигорання підготовленої горючої суміші. 3. Вихлоп через відкритий кінець ІКЗ продуктів детонації, що супроводжується нагріванням і прискоренням частинок порошку і осадженням їх на поверхню виробу, розплодженням на заданій відстані - дистанції напилювання. 4. Витіснення з обсягу камери суміші залишкових продуктів згоряння і повітря і заповнення його свіжою підготовленою горючою

Ефективне здійснення процесу сумішшю детонаційно-газового напилення і формування високоякісних покриттів вимагає дотримання ряду умов: суворе підтримання складу і ступеня заповнення ІКЗ горючою сумішшю; точне дозування і подача порошку в оптимальну за технологічними умовами зону ІКЗ; забезпечення ініціювання детонації поблизу за-

критого торця ІКЗ або короткої переддетонаційної відстані; максимально можливе ефективне використання енергії потоку продуктів детонації в процесі наплення; високу частоту повторення циклів наплення тощо. Конструкція ІКЗ повинна забезпечити: мінімальні робочий об'єм ІКЗ і витрата газів; виключення передчасного займання горючої суміші від гарячих стінок ІКЗ і контакту з залишковими продуктами згоряння; надійну локалізацію детонації в робочому обсязі ІКЗ; надійну роботу систем подачі газів і порошку та ін.

Класифікація імпульсних камер згоряння. 1. По виконуваних функцій у складі ДГУ розрізняють: *основні та допоміжні ІКЗ*. Основні ІКЗ призначені для виконання основного призначення – формування напилувального гетерогенного потоку при нагріванні і прискоренні частинок порошку. Допоміжні ІКЗ можуть бути використані для виконання допоміжних переходів і впливів – форкамерно запалювання з переходом горіння в детонацію, нагріву або попереднього очищення напилуваної поверхні, оплавлення напиленого покриття.

2. За родом використовуваного палива розрізняють ІКЗ, що працюють на: газоподібному, рідкому або комбінованому (на газовому і рідкому) паливі.

3. У напрямку потоків подавання свіжої горючої суміші і виділення продуктів детонації: *прямоточні і протиточні ІКЗ*. У прямоточних ІКЗ ці напрямки однакові, в протиточних – протилежні.

4. За характером подачі газів розрізняють ІКЗ: з *циклічної* (клапанної) і *безклапанної* подачею газів.

5. По виду осі основної камери розрізняють ІКЗ: *прямі і вигнуті* (з поворотами).

6. За кількістю секцій в робочій камері розрізняють ІКЗ: *односекційні і багатосекційні*.

7. За поперечним перерізом робочої камери розрізняють ІКЗ: з *постійним поперечним перерізом і змінним перерізом* (профільовані).

8. По розташуванню точки введення порошку розрізняють ІКЗ: з введенням порошку у закритого торця, в середній частині, у вихідного (відкритого) торця і зовні відкритого торця.

9. По компоновці розрізняють ІКЗ: з *вбудованими та виносними* камерами змішування і запалювання.

10. По геометрії стінок розрізняють ІКЗ: *гладкі, шорсткі і проникні*.

11. За наявності конструктивних елементів в робочому каналі розрізняють ІКЗ: *без перешкод* (регуляторів поперечного перерізу, екранів спеціальних конструктивних елементів (для подачі і видалення газів, порошку тощо.) і з *наявністю перешкод*.

12. За кількістю камер для нагріву і прискорення порошку: *однокамерні і багатокамерні* ІКЗ.

При конструюванні ІКЗ повинні враховуватися скорострільність ДГУ, кращий склад горючої суміші, її обсяг, геометрія і розміри, котрі значною мірою визначають технологічні можливості ДГУ. Крім того, конструктивні особливості ІКЗ в значній мірі визначають режим вигорання свіжого заряду горючої

суміші: переддетонаційний, детонація Чемпен-Жуге або пересжата детонація.

Прямі імпульсні камери згоряння з постійним поперечним перерізом. На початковому етапі розвитку детонаційно-газового наплення в ДГУ застосовували прямі ІКЗ, зазвичай круглого перетину. Характерні розміри ІКЗ за даними робіт [10 – 12] наведені в табл.

Обмеження щодо використання ІКЗ діаметром менше 10 ... 15 мм пов'язані з підвищенням тепловтрат в їх стінки і, відповідно, несприятливим впливом на режими детонації. Однак, останнім часом показана можливість використання форкамер для здійснення переходу горіння в детонацію в субкритичних каналах і оптимізації витрат пального в імпульсному і частотному детонаційних режимах. Це дозволяє здійснювати проектування портативних пристроїв, що використовують газову детонацію [13, 14].

Таблиця

Розміри імпульсних камер згоряння в ДГУ для наплення покриттів [10-12]

Тип ДГУ	Довжина ІКЗ, м	Внутрішній діаметр ІКЗ, мм	Скорострільність, Гц
D-Gun	1	25	4 – 8
ППМ, Україна	2	22	1 – 6
АДК-1М	1,85	16 – 25	1 – 5
Корунд	1,2	26	2 – 4
Обь	1,25	25	4 – 6
Aachen University, Germany	2	25	4 – 6
Перун Р	0,6; 1,1	21	3,3; 6,6
HFPD	0,25 – 0,9	15 – 20	45 – 75
Hiroshima University, Japan	0,35 – 0,65	10	150

Прямі ІКЗ часто виконують з вбудованими камерами змішування палива з окислювачем і запалювання [15 – 21]. Камера згоряння може бути виконана також з додатковими пристроями, що забезпечують можливість заповнення робочого об'єму горючою сумішшю змінного складу по її довжині [22]. Для цього ІКЗ забезпечена пристроями подачі палива і окислювача для отримання горючих сумішей різних складів в різних зонах камери згоряння з утворенням зон більшою або меншою енергії всередині одного і того ж обсягу камери для розширення її технологічних можливостей і наплення покриттів з матеріалів з різними властивостями.

Багатокамерні ІКЗ мають кілька самостійних каналів для нагрівання і прискорення напилуваного порошку. Їх зазвичай також виконують з постійним поперечним перерізом, зазвичай круглим [23 – 26]. В ДГУ за патентом [23] ІКЗ виконана у вигляді обертового барабана з трьома послідовно працюючими каналами згоряння. За патентом [24] ІКЗ виконана у вигляді блоку декількох камер згоряння, з'єднаних

жорстко між собою всередині обертового барабана, із загальною камерою змішання і займання. Кожна з камер забезпечена порошковим живильником. Камери згоряння працюють послідовно при обертанні барабана. За патентом [25] ІКЗ виконана з двох наскрізних циліндричних каналів, герметично з'єднаних з одного торця через пази обертового золотника і пази плаваючої шайби з магістралями підведення газів. Детонаційно-газова гармата по [26] має чотири вихідних каналу, отриманих в результаті установки поздовжніх перегородок в вихідній частині камери згоряння, при наявності загальних камер змішування газів і запалювання. Кожен з каналів оснащений системами порошкових живильників. Перевага цієї ІКЗ дозволяє збільшувати швидкість осадження покриттів. Крім того, подаючи різні порошки в окремі системи порошкових живильників, можна легко отримувати багатошарові і композиційні покриття.

Можна застосовувати ІКЗ з квадратним, прямокутним, овальним і іншими формами поперечного перерізу, якщо це обґрунтовано більш раціональним використанням напилюваного порошку при обробці дрібних деталей або локальних ділянок поверхонь. Можливість напилення покриттів з ІКЗ квадратного перетину розмірами 14×14 і 20×20 мм експериментально підтверджена автором в роботі [4].

Схема ІКЗ з прямокутним перетином показана на мал.1, а [27]. У вихідну частину 1 прямокутного перетину вводиться кілька сопел 2 порошкового живильника 3. Вхідна частина 4 ІКЗ виконана звужується, на вході змонтований запальник 5. Використання поздовжніх перегородок дозволяє створювати ІКЗ зі збільшеними розмірами поперечного перерізу (рис. 1, б). Утворені поздовжні осередку стабілізують утворення і поширення детонації, проте збільшують втрати енергії [28].

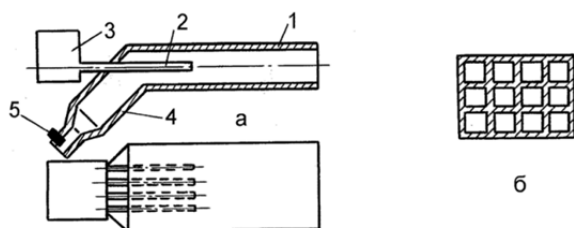


Рис. 1. ІКЗ прямокутного поперечного перерізу

Для нанесення покриттів на кільцеві поверхні відносно невеликого розміру ІКЗ може бути виконана з кільцевим поперечним перерізом (рис. 2, а). В цьому випадку в циліндричній камері згоряння 1 розміщується співвісно циліндричний сердечник 2 з каналами 3 для охолоджуючої рідини. Для стабілізації необхідних режимів горіння кільцева камера згоряння може бути розділена на поздовжні секції (рис. 2, б). Використовуючи цей принцип, можна наносити покриття і на інші види периметральних ділянок поверхонь.

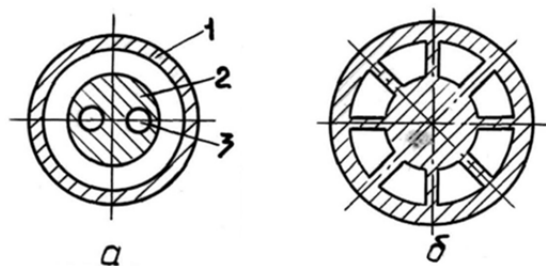


Рис. 2. ІКЗ з кільцевим поперечним перерізом

У камеру згоряння ІКЗ можуть вводитися різні екрани [29]. На рис. 3, а показана конструкція ІКЗ з циліндричним екраном у вихідній частині. Трубка подачі порошку входить в обсяг ІКЗ, обмежений екраном по перерізу потоку. Надаючи екрану різну форму, як наприклад, на рис. 3, б, в, г, д, можна управляти формою і розмірами вихідної порошкової хмарки в робочому каналі, умовами газообміну при його наповненні свіжою горючою сумішшю, а також умовами формування і витікання імпульсного двофазного струменя. За рахунок цього при вихлопі імпульсного двофазного струменя забезпечується її екранізація від навколишнього середовища кільцевим потоком продуктів детонації. Цим досягається також більш висока однорідність температури і швидкості частинок по перерізу потоку.

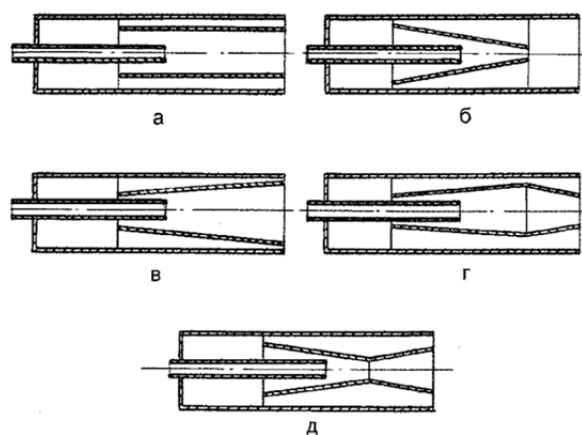


Рис. 3. ІКЗ з екранами в робочій камері

Прямі імпульсні камери згоряння з перемінним поперечним перерізом. Розрізняють ІКЗ з постійним по довжині поперечним перерізом, що змінюється по довжині площею поперечного перерізу (різко або плавно), що змінюється по довжині формою поперечного перерізу, а також формою і площею поперечного перерізу. Однією з таких конструкцій є ступінчаста ІКЗ (рис. 4, а) з зменшуваним перетином у напрямку витікання продуктів детонації [30]. За рахунок виникнення відбитих хвиль на переході ступенів збільшується питома енергія потоку продуктів детонації. Розташування циліндричних ступенів зі збільшенням діаметра по ходу руху продуктів детонації доцільно для скорочення переддетонаційної відстані при ініціюванні горіння безо-

середньо в ІКЗ [31]. Ці ступені (секції) ІКЗ можуть сполучатися плавними переходами. ІКЗ з двох ступенів може бути виконана телескопічною [32], що дозволяє регулювати робочий об'єм камери. Вихідна секція з меншим діаметром використовується в установці по [33].

Для поліпшення умов течії продуктів детонації із зваженими частинками порошку в СНУ ім. В. Даля розроблені ІКЗ з плавно зменшуваним поперечним перерізом, в т.ч. конічні (рис. 4, б) [34 – 36]. У таких ІКЗ досягається можливість отримання пересжаття детонаційних хвиль і посилення енергетичного впливу на частки напилуваного порошку [37]. Вихідна ділянка ІКЗ може бути виконаний з постійним перерізом, а також у вигляді сопла (рис. 4, в, г), що дозволяє додатково управляти швидкісною, тепловою та хімічною релаксацією частинок порошку. При великому перепаді діаметрів ступенів ІКЗ може мати форму, що нагадує луковидну [36, 38]. Особливо корисні подібні ІКЗ при використанні горючих газів - заміників ацетилену. Однак тут важче забезпечити виникнення детонації і локалізацію вихідного порошкової хмарки в заданій зоні. Частково ця задача вирішена в конструкції ІКЗ, зображеної на рис. 4, д [35, 36, 39]. Тут початкова ділянка 1 виконана з невеликою площею поперечного перерізу, що переходить різко або плавно в розширену ділянку 2. Патрубок введення порошку 3 і запальник 4 змонтовані на вхідній ділянці у закритого торця. Це полегшує ініціювання детонації в розширеній вихідній частині ІКЗ, а також сприяє компактізованню порошкової хмарки при вході в розширену вихідну ділянку.

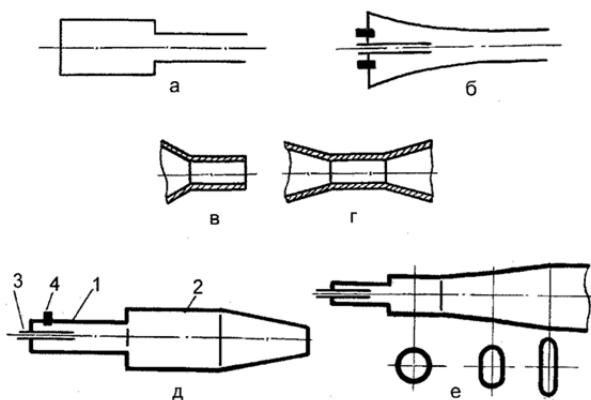


Рис. 4. ІКЗ із змінним по довжині поперечним перерізом

Теоретичному обґрунтуванню і експериментальному дослідженню профільованих ІКЗ присвячені роботи Інституту гідродинаміки СО РАН [40 – 42], в яких показано, що кінетична і теплова енергія продуктів детонації за фронтом пересжатих детонаційних хвиль значно вище, ніж за фронтом самопідтримуваних детонаційних хвиль Чепмена – Жуге, зазвичай використовуваних для напилування. Довжина зазвичай використовуваних ІКЗ в установках детонаційного напилування обмежена втратами енергії газу в їх стінки. Ці втрати становлять 60 ... 70 % енергії

газу, укладеного в ІКЗ, довжина якого дорівнює 50 ... 100 його діаметрам. Тому для напилування тугоплавких матеріалів ІКЗ діаметром менше 15 мм в установках, що працюють в режимі детонації ЧЖ, не застосовуються. При використанні пересжаття ДХ через коротке часу розігріву і розгону часток проблема втрат енергії в стінки стовбура зникає, що дозволяє зменшити вихідні діаметри ІКЗ.

Пересжатая детонаційна хвиля має більш високу швидкість і тиск і може бути сформована тільки з використанням зовнішнього джерела енергії, роль якого може грати газовий поршень. Застосування пересжаття детонаційних хвиль дозволяє наносити покриття з високотемпературних матеріалів з підвищеними властивостями. Пересжатая детонаційна хвиля може бути отримана при поширенні детонації ЧЖ у вибуховій суміші змінного складу (наприклад, у вибуховій суміші збільшується: вміст окислювача в напрямку поширення детонації ЧЖ) або при поширенні детонації ЧЖ в звуживаймих каналах, а також при комбінуванні цих двох способів. Заповнення звуживаймої частини каналу розведеною сумішшю дозволяє отримати пересжатую детонаційну хвилю, яка збільшує швидкість частинок і збільшує (або зменшує) їх температуру. При використанні пересжаття детонації відстань, на якому частинки набувають необхідні для формування покриття швидкість і температуру, зменшується до кількох міліметрів. В принципі швидкість, тиск і відповідна довжина загасання пересжаття детонації можуть бути будь-якими, але реально всі ці параметри залежать також від розміру осередку. Максимальна пересжаття в сильно розбавлених розчинах можна отримати тільки в разі, коли діаметр вузької частини каналу приблизно дорівнює розміру осередку в детонації ЧЖ. У цьому граничному випадку вузька частина каналу заповнюється: інертним газом.

Використання пересжаття ДХ, одержуваних в звуживаймих ІКЗ, відкриває перспективи створення детонаційно-газових мікропушек і розширення технологічних можливостей методів нанесення покриттів на внутрішні поверхні деталей. Це стимулює розробку математичних моделей для визначення просторово-часових параметрів потоку напилуваних частинок як всередині ІКЗ, так і в просторі між її зрізом і напилуванним виробом, в тому числі і при використанні ІКЗ змінного перерізу [43]. В результаті можна прогнозувати параметри напилуваних частинок безпосередньо перед взаємодією з напилуваним виробом з урахуванням впливу дистанції напилування, а також в разі часткового заповнення ІКЗ детонаційної сумішшю, коли решту ІКЗ займає інертний газ.

За технологічними умовами напилування покриттів в ряді випадків ІКЗ можуть виконуватися з плавним розширенням поперечного перерізу у напрямку витікання продуктів детонації [35, 36].

В енергетиці застосовують ІКЗ з послідовними секціями розширення і звуження, які можуть бути використані і в ДГУ для напилування покриттів. При

використанні секцій розширення і звуження (камер змінної геометричної форми, що складаються з послідовних секцій розширення і звуження) забезпечується режим багатоступінчастої детонації [44, 45]. Згоряння горючої суміші відбувається при більш високому тиску за рахунок розпаду детонаційної хвилі на ударну хвилю і фронт горіння в розширенні каналі з подальшим утворенням детонації в стислій середовищі.

Схема ІКЗ зі змінною по довжині формою поперечного перерізу показана на рис. 4, е [35, 36, 46]. Перехід від асиметричного поперечного перерізу до симетричного щодо однієї з осей площин забезпечує не тільки формування шару покриття відповідної форми, а й додаткову турбулізацію потоку газової суспензії і більш її краще перемішування з продуктами згоряння, деяке збільшення часу перебування порошку в потоці продуктів згоряння і поліпшення енергообміну між ними.

Для нанесення покриттів на кільцеві поверхні (торцеві і конічні) вихідна частина ІКЗ може бути виконана з плавним переходом від круглої форми поперечного перерізу в напрямку відкритого торця до форми кільцевого сектора [47]. При такому конструктивному виконанні пристрою досягається перетворення імпульсного гетерогенного потоку, що має круглий поперечний переріз, в потік з формою поперечного перерізу у вигляді кільцевого сектора, що збігається за розмірами з оброблюваною кільцевою поверхнею. Зменшення площі і форми поперечного перерізу сприяє формуванню перешкоди детонаційних хвиль. ІКЗ може бути виконана циліндричної з перетворенням круглої форми поперечного перерізу на всій або частині довжини в форму кільцевого сектора (рис. 5). Напилюваний порошок фокусується в кільцевому вихідному секторі, що виключає його зайві витрати. ІКЗ може бути виконана також на всій або частині довжини в формі конфузора, що розширюється в напрямку відкритого торця, або звужується.

ІКЗ по [48] виконується з неосесиметричним поперечним перерізом, яке звужується або розширюється до вихідного зрізу з одночасною зміною положень осей поперечного перерізу. Це сприяє додаткової турбулізації газів у фронті горіння, прискоренню полум'я і, відповідно, скорочення часу і відстані переходу горіння в детонацію. Виникаючі пульсації газів в гетерогенному потоці збільшують час перебування частинок порошку в ІКЗ і інтенсивності їх нагрівання.

Для регулювання швидкості і температури частинок порошку застосовують ІКЗ з регульованим прохідним поперечним перерізом. Відома конструкція, в якій на вихідному ділянці стовбура встановлені регульовальні елементи, які можна зсунути в поперечному напрямку [39]. Однак поперечне введення порошку через регульовальні елементи ускладнює отримання його рівномірного розпилу по поперечному перерізі. У конструкції, зображеної на рис. 6 [46], ІКЗ 1 виконана ступінчастою з конічним пере-

ходом між ступенями. З боку закритого торця співвідносно в камеру вмонтовано сопло 2 з отвором для введення порошку і конічною голівкою 3. Шляхом осевого зміщення сопла регулюють прохідний переріз між конічною голівкою 3 і конічною ділянкою камери.

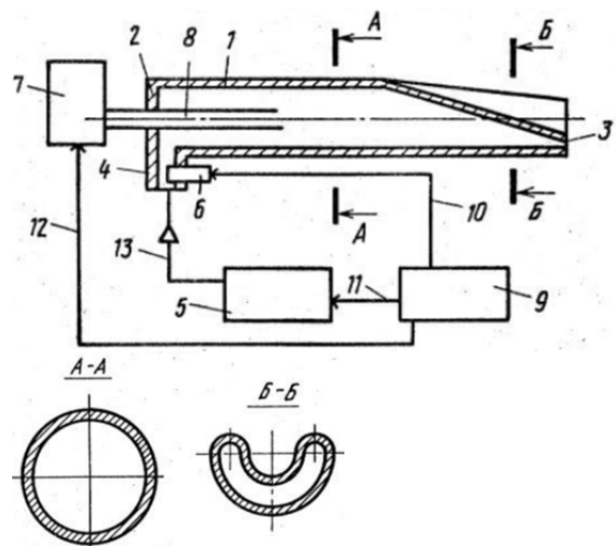


Рис. 5. Імпульсна камера згоряння з початкової циліндричної секцією: 1 – робоча камера згоряння; 2 – закритий торець; 3 – відкритий торець; 4 – патрубок введення газів в камеру у закритого торця; 5 – системи подачі газів; 6 – запальник горючої суміші; 7 – порошковий живильник; 8 – патрубок введення порошку в робочу порожнину; 9 – блок управління, з'єднаний ланцюгами управління; 10 – з воспламенителем; 11 – з системою 5 подачі газів; 12 – з порошковим живильником 7

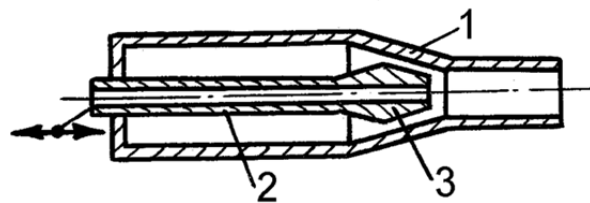


Рис. 6. ІКЗ з регульованим прохідним поперечним перерізом

ІКЗ з поворотами (вигнуті). Дослідження щодо ініціювання та поширення детонації в трубах з U-образними поворотами, витками і змійовиками [49, 50] показали, що такі конструктивні елементи дозволяють істотно скоротити відстань переходу горіння в детонацію (ПГД) і зменшити критичну інтенсивність ударних хвиль для ініціювання детонації, т. е. полегшують утворення детонації. Ці дослідження проводяться для створення повітряно-реактивних імпульсних детонаційних двигунів (ІДД) і високоефективних пальників спалювання палива в детонаційному режимі, проте представляють інтерес при створенні ДГУ для напилення покриттів. U-образні повороти сприяють фокусуванню і посилення

слабких ударних хвиль, утворених прискореним полум'ям. Однак такі повороти збільшують гідравлічний опір і ускладнюють періодичне заповнення каналів свіжою горючою сумішшю. Перші дослідження по детонаційно-газового напилювання кільцевими і спіральними ІКЗ з квадратним поперечним перерізом каналу проведені в СНУ ім. В. Даля [4]. Була показана необхідність введення напилюваного порошку в вихідну пряму секцію камери згоряння. В [51] запропоновано установка для детонаційно-газового напилення внутрішніх поверхонь деталей, в розгінній частині утворена вигином прямої камери по радіусу до прямого кута з конусним звуженням в кінці, причому ствол і розгінна частина можуть розташовуватися всередині напилюваної деталі. Співвідношення діаметрів конуса розгінної частини становить від 1/3 до 1/4.

В [52] вивчена ІКЗ у вигляді круглої труби постійного перерізу з радіусом $R = 14$ мм, що складається з трьох секцій: вхідної секції, гвинтової секції і вихідної секції. Гвинтова секція в свою чергу складається з трьох частин. Перша частина - поверхня, замітає окружність при її русі, розбивається на три складові: рівномірний рух уздовж осі X , поворот з постійною швидкістю на 90° і рівномірне видалення центру кола від осі X . Друга частина є циліндричну гвинтову поверхню з оборотом на 360° , намотану на вісь X . Третя частина гвинтової секції аналогічна першій, тільки центр окружності при русі не видалається, а рівномірно повертається до осі X . Такі рішення дозволяють скоротити довжину ділянок ПГД.

Багатокамерні ІКЗ. Багатокамерні ІКЗ застосовують як для отримання пересжаття детонаційних хвиль, так і для збільшення часу перебування порошку в продуктах детонації для забезпечення відповідного енергообміну і ступеня необхідних перетворень у вихідному матеріалі. Основні схеми багатокамерних ІКЗ розроблені в СНУ ім. В. Даля [53 – 58]. Одна з перших схем багатосекційних ІКЗ схематично зображено на рис. 7, а [53]. ІКЗ виконана з трьох концентрично розташованих секцій, причому вихід охоплюючої секції зміщений у напрямку руху потоку продуктів детонації щодо виходу. Секції виконуються, як правило, з зменшуваним у напрямку витікання продуктів детонації поперечним перерізом. Порошок вводиться в центральну (початкову) секцію, в якій ініціюється горіння і детонація горючої суміші. При виході горіння на зріз секції в охоплюючій секції формується два фронти горіння (або детонації), один з яких продовжує рухатися до відкритого торця секції, а другий по кільцевій ділянці секції в зворотному напрямку, причому напрямки протилежні. Аналогічні явища мають місце при переході горіння в наступну секцію. Використання подібних конструкцій ІКЗ з двома і більше секціями дозволяє забезпечувати необхідний час перебування порошку в продуктах детонації для протікання потрібних перетворень, а також отримання пересжаття хвиль детонації за рахунок підпору основного потоку продуктами детонації, стікаючи з охоплюючої секції. Для регулювання ступеня перетворень в час-

тинках порошку секції ІКЗ можуть заповнюватися різними видами горючих сумішей, а порошок вводиться безпосередньо в вихідну секцію [54]. Один з подібних варіантів показаний на рис. 7, б. Для захвнення двофазного потоку з метою інтенсифікації енергообміну порошку з продуктами детонації використовують тангенціальне з'єднання секцій (рис. 7, в) [55].

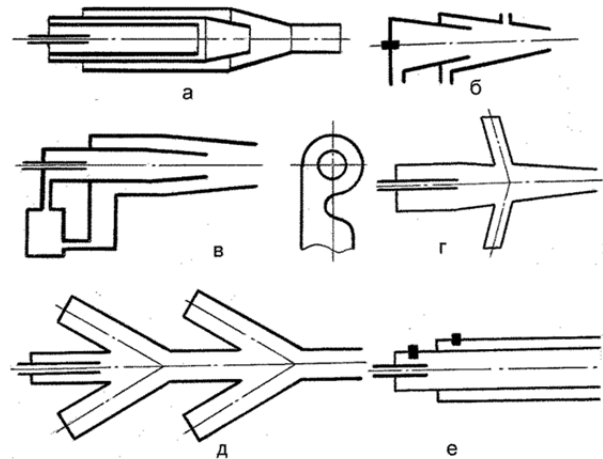


Рис. 7. Багатосекційні ІКЗ

Для отримання пересжаття детонаційних хвиль застосовують також додаткові секції у вигляді каналів, приєднаних до бічних стінок основної камери згоряння (рис. 7, г) [56], а також додаткові кільцеві секції, що охоплюють камеру згоряння, в якій відбувається обробка порошкового матеріалу (рис. 7, д) [57]. Додаткові секції сприяють отриманню пересжаття детонаційних хвиль, збільшення тривалості витікання продуктів детонації з стовбура до відповідної інтенсифікації процесів взаємодії їх з частинками порошку.

У ІКЗ з двома концентрично розташованими камерами згоряння (рис. 7, е) [58] формується імпульсна двухфазная струмінь, розділена на центральну струмінь, яка несе зважені частинки порошку, і навколишню її кільцеву струмінь продуктів згоряння.

Дво- і трикамерні ІКЗ за схемою на рис. 8 [59] забезпечують можливість термічного впливу на оброблювану поверхню за рахунок додаткових камер згоряння. Тут застосовані розгалужуються секції камери згоряння з загальними системами подачі газів, ініціювання детонації, а також можлива організація подачі порошку в основну (напилювальну) камеру продуктами детонації.

Трикамерна ІКЗ за патентом [60] має дві паралельні прямі камери згоряння, з'єднаних під прямим кутом з вихідною камерою зігнутої форми, відкритий торець якої звернений у бік внутрішньої поверхні виробів. В [61] описаний досвід створення кумулятивно-детонаційного пристрою для напилення покриттів, в якому здійснюється підсумовування енергії продуктів детонаційного згоряння горючих газових сумішей від декількох спеціально профільова-

них детонаційних камер. Кумуляція енергії дозволяє сформувати високошвидкісний потік робочого газу, який має кілька ударних хвиль, що забезпечує ефективну взаємодію їх з порошковим матеріалом. Це забезпечує раціональне використання енергії горючої газової суміші.

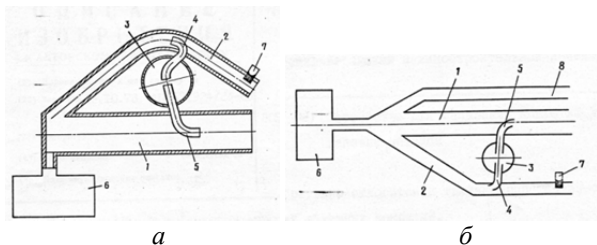


Рис. 8. Дво- і трикамерна ІКЗ: 1, 2 і 8 – камери згоряння; 3 – порошковий живильник; 4 і 5 – сопла порошкового живильника; 6 – система подачі газів; 7 – запальник

Подальший розвиток схема ІКЗ по рис. 7, д отримала в роботах [62, 63]. Схема запропонованого пристрою приведена на рис. 9. Пристрій має дві або більше камер згоряння з незалежними системами подачі, змішування і акустичного активування в них горючих сумішей. Ініціювання детонації в камерах згоряння здійснюється послідовно з синхронізацією за рахунок конструктивних особливостей систем сполучення камер. Кільцева камера 3 використовується для стиснення продуктів згоряння і створення додаткової струменя, яка «підпирає» в циліндричній вихідній камері 4 продукти детонації від основної камери 2. Камера 4 має внутрішній діаметр 16 ... 20 мм і довжину 300 ... 520 мм і вибирається в залежності від властивостей матеріалу напилуваного порошку. Звуження робочого об'єму циліндричної камери діаметром 24 мм до діаметра 16 мм забезпечує перешагтя режиму детонаційного горіння. Подальше поджатие продуктів згоряння відбувається за рахунок кільцевої камери. Газодинамічний процес ініціювання детонації в кільцевій камері забезпечує підтиснення продуктів згоряння по осі ІКЗ, що істотно підвищує їх швидкість, тиск і щільність.

Охолодження ІКЗ. Стабілізація температури стінок ІКС грає важливу роль в забезпеченні надій-

ності роботи ДГУ. Зазвичай застосовують водяне охолодження і камеру згоряння стовбур охоплюють порожнину для примусового переміщення охолоджувальної рідини. Традиційні конструкції ІКЗ з водяним охолодженням досить докладно описані в роботах [4, 37, 38]. В [64] для рівномірного охолодження між корпусом та обичайкою встановлена поєднана зі штуцером введення охолоджуючої рідини порожниста спіральна направляюча.

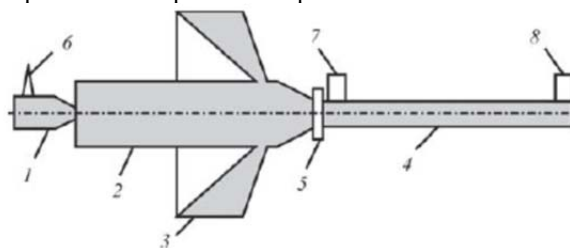


Рис. 9. Схема багатоканального детонаційно-газового пристрою: 1 – форкамера для ініціювання процесу детонації; 2 – основна циліндрична камера; 3 – кільцева камера зі щільним виходом в циліндричну камеру; 4, 5 – вузол подачі порошку; 6 – запальник; 7 і 8 – п'єзоелектричні датчики тиску

За патентом [65] засіб підведення охолоджуючої рідини розташовано в середній частині ІКЗ, біля основи дульної частини ДГУ (рис. 10). ІКЗ забезпечена засобом для створення прямого і зворотного потоків охолоджуючої рідини в зазорі між кожухом охолодження і ствольної трубою. Засіб створення прямого і зворотного потоків виконано у вигляді двох герметизуючих перегородок. Перегородки встановлені в дульній частині камери в зазорі між кожухом охолодження і ствольної трубою вздовж поздовжньої осі і не доходять до дульного зрізу. Між торцевою частиною ІКЗ і перегородками є зазори. В результаті забезпечується можливість значного розширення технологічних можливостей наплення; зменшення діаметра ІКЗ за рахунок організації прямого повернення потоку охолоджуючої рідини в дульній частині стовбура дає можливість вільного маніпулювання ІКЗ при напленні покриттів на внутрішні поверхні деталей.

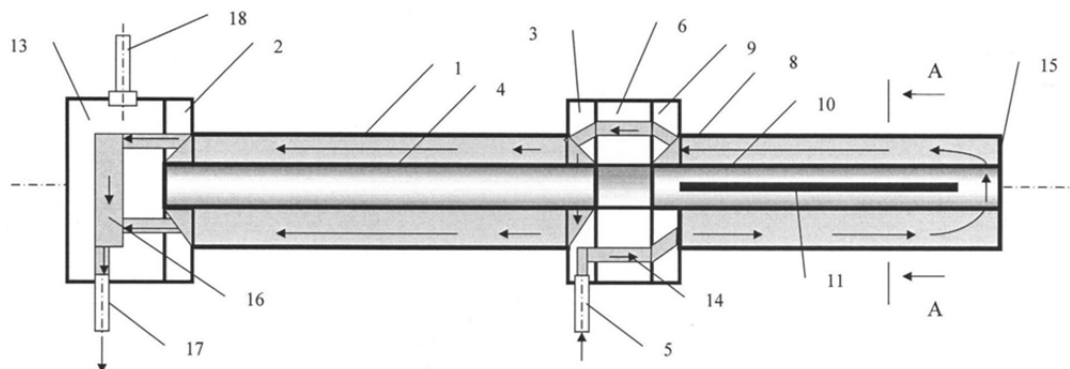


Рис. 10. Система охолодження ІКЗ: 1 і 8 – зовнішні труби; 2, 3 і 9 – фланці; 4 і 10 – стовбурні труби; 5 і 17 – штуцери подачі і відведення води; 6 – ствольна проставка; 7 і 14 – отвори (канали) для протікання води; 11 – герметизуючі перегородки; 12 – ущільнення; 13 – камера запалювання; 15 – кожух; 16 – канал для виведення води; 18 – свічка запалювання

Перспективне застосування систем випарного охолодження [66], які не потребують використання примусової циркуляції води і дозволяють скоротити її витрати в 20 – 40 разів і втрати тепла детонаційного згоряння палива. Вода в охолоджуючій сорочці нагрівається до кипіння і утворюється пара надходить в сепаратор рідинно-парової фази. В процесі наплення підтримується стабільна температура стінок.

При повітряному охолодженні на зовнішніх поверхнях ствола створюють спеціальні ребра охолодження [67]. Можна використовувати також повітряні примусові потоки для охолодження стінок камери згоряння. На рис. 11, а показана схема з витяжною системою, що здійснює відсмоктування газів від закритого торця через кільцеву порожнину, яка охоплює камеру охолодження стовбура. Може бути використано також комбіноване повітряне та водяне охолодження. Для нормального функціонування ДГУ створюються автономні системи водяного охолодження. У ряді випадків може виявитися доцільним використання засобів холодильної техніки, термоелектричного охолодження.

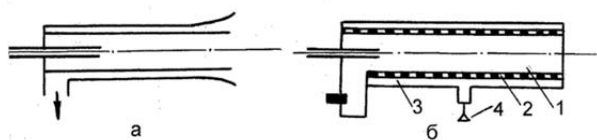


Рис. 11. Системи охолодження ІКЗ

Важливе завдання представляє утилізація тепла, що минає через стінки камери згоряння. Одним з таких способів являється використання цієї енергії для попереднього підгріву горючої суміші перед введенням в камеру згоряння [68], а також для регазифікації зріджених газів [69].

Однак найбільш перспективним слід визнати застосування теплових труб, що дозволяють найбільш точно підтримувати необхідний тепловий режим стінок камери згоряння і утилізацію тепла (для попереднього підгріву газів - компонентів детонуючої суміші, що розпилюється порошку та ін.).

Важливе завдання представляє утилізація тепла, що минає через стінки камери згоряння. Одним з таких способів є використання цієї енергії для попереднього підгріву горючої суміші перед введенням в камеру згоряння [68], а також для регазифікації зріджених газів [69].

Однак найбільш перспективним слід визнати застосування теплових труб, що дозволяють найбільш точно підтримувати необхідний тепловий режим стінок камери згоряння і утилізацію тепла (для попереднього підгріву газів - компонентів детонуючої суміші, що розпилюється порошку та ін.).

Висновки. 1. Імпульсні камери згоряння є найважливішими конструктивними елементами, що визначають технологічні можливості детонаційно-газових установок для наплення покриттів. Розроб-

лено класифікацію імпульсних камер згоряння технологічного призначення.

2. Геометрична форма і розміри камер згоряння істотно впливають на процеси формування і параметри гетерогенних імпульсних потоків і характеристики одержуваних покриттів.

3. Розглянуті в статті підходи можуть бути поширені на камери згоряння, що використовуються в інших детонаційно-газових технологіях.

Література

1. Kharlamov Y.A. Gaseous pulse detonation spraying: current status, challenges, and future perspective. Intern. Thermal Spray Conference & Exposition ITSC 2008: Maastricht, The Netherlands, June 2-4, 2008. Conference Proceedings. DVS German Welding Society. 2008. P. 159 – 166.
2. Применение детонации в газах для нанесения покрытий Ю.А. Харламов, М.Х. Шоршоров, В.В. Кудинов, О.В. Гусев, Б.Л. Рябошапка. Физика горения и взрыва, 1975, Т. 11, № 1. С.88 – 95.
3. Харламов Ю.А., Полонский Л.Г. Газотермическое напыление. Современное состояние и перспективы развития. Вісник Східноукр. нац. університету імені В.Даля. 2016, № 2 (226). С.5 – 19.
4. Шоршоров М.Х., Харламов Ю.А. Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий. М.: Наука, 1978 – 227 с.
5. Yuriy Kharlamov, Maksym Kharlamov. Design concepts of gaseous detonation guns for thermal spraying. TeKa Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa, 2013, V.13, № 4. P. 82 – 91.
6. Харламов Ю.А. Развитие детонационно-газовых технологий. Вісник Східноукр. нац. університету імені В.Даля, 2017, № 7 (237). С.114 – 132.
7. Харламов Ю.А. Конструктивные схемы детонационно-газовых устройств для обработки порошковых материалов. Порошковая металлургия, 1986, № 12. С.89 – 95.
8. Харламов Ю.А. Стволы установок для детонационно-газового напыления покрытий. Автоматическая сварка, 2001, № 10. С.17 – 21.
9. Харламов Ю.А., Сундарараджан Г., Цяпа А.Н. Конструктивные особенности детонационных камер сгорания для напыления. Вісник Східноукраїнського національного університету, 2001, № 5 (39). С.169 – 178.
10. Detonation propagation from a cylindrical tube into a diverging cone. Takuma ENDO, Ryuji KOBAYASHI, Shimon KUWAJIMA, Yoko SEKI, Wookyung KIM and Tomoyuki JOHSAKI. Journal of Thermal Science and Technology. 2020. Vol. 15, No.3. Paper No.20-00283. 12 p.
11. Харламов Ю.А. Детонационно-газовые установки для нанесения покрытий (обзор). Сварочное производство, 1989, № 11. С.21 – 24.
12. Харламов Ю.А. Научные и технологические основы детонационно-газового напыления покрытий: автореф. ... докт. техн. наук... «Технология и машины сварочного производства», Киев, 1994. 35 с.
13. Бакланов Д.И., Голуб В.В., Иванов К.В., Кривокорытов М.С., Переход горения в детонацию в канале с диаметром меньше критического диаметра существования стационарной детонации. Теплофизика высоких температур, 2011, том 49, № 6, с. 1 – 6.

14. Применение детонации водорода-воздушной смеси в устройствах для безыгольной инъекции. В.В. Голуб, Т.В. Баженова, Д.И. Бакланов, К.В. Иванов, М.С. Кривокрыотов. Теплофизика высоких температур, 2013, том 51, № 1, с. 1 – 3.
15. Пат. 1836161 Российская Федерация, МПК7 В 05 В 7/20. Устройство для газотермического нанесения покрытий. В.М. Голубец, В.В. Кошевой, М.И. Пехньо, А.И. Цыхан; заявитель и патентообладатель Физико-механический ин-т им. В.Карпенко АН Украины. - № 4768288/05; заявл. 5.12.89; опубл. 23.08.93, Бюл. № 31.
16. Пат. 2399430 Российская Федерация, МПК7 В 05 7/20. Установка для детонационного напыления покрытий. Ульяницкий В.Ю., Кирыкин А.Л., Штерцер А.А., Злобин С.Б.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Сибирские Технологии Защитных Покрытий". - № 2009105561/12; заявл. 17.02.2009; опубл. 20.09.2010, Бюл. № 26.
17. Пат. 2176162 Российская Федерация, МПК В05В 7/20. Лабиринтное устройство подачи газа и способ предотвращения обратной вспышки в детонационной пушке А.В. Чернышев, Г.Ю. Барыкин; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество "НовосибирскНИИХиммаш". - № 98114092/12; заявл. 23.12.1996; опубл. 27.11.2001.
18. А.с. 1603582 СССР. МКИ В 05 В 7/20. Устройство для детонационного напыления покрытий. Барыкин Г.Ю., Чернышов А.В., Бобров С.В. (СССР). Опубл. 2000, Бюл. № 8.
19. А.с. 1716253 СССР, МКИ В 05 В 7/20. Устройство для импульсного сжигания горючей смеси. Харламов Ю.А. (СССР). № 4825492/06; заявл. 19.03.90; Опубл. 29.02.92; Бюл. № 8.
20. А.с. 1827872 СССР, МКИ В05В 7/20. Устройство для детонационного напыления покрытий. Барыкин Г.Ю., Чернышов А.В., Коржик В.Н. (СССР). № 4795772/05; заявл. 19.12.89. Опубл. 27.03.96, Бюл. № 9.
21. Пат. 2201293 Российская Федерация, МПК В05В7/20. Устройство для самоподдержания детонации. Чернышев А.В., Барыкин Г.Ю., Лакиза С.Н.; заявитель и патентообладатель АЭРОСТАР КОАТИНГС, С.Л. (ES). № 98117840/12. Заявл. 1997-12-24. Опубл. 27.03.2003.
22. Пат. 2236910 Российская Федерация, МПК7 В05В 7/20. Высокопроизводительный детонационный пистолет-распылитель с высокой частотой повторения импульсов / Барыкин Г.Ю., Фагоага А.И.; заявитель и патентообладатель АЭРОСТАР КОАТИНГС, С.Л. (ES). - 2002113737/12, заявл. 1999.10.28; опубл. 2003.11.27.
23. Пат. 2460591 Российская Федерация, МПК В05В 7/20. Детонационный метатель / Кореньков В.И., Попов Ю.С.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество "НовосибирскНИИХиммаш". - № 2011112260/05; заявл. 30.03.2011; опубл. 10.09.2012 Бюл. № 25.
24. Пат. 2070442 Российская Федерация, МПК В05В7/20. Пушка для детонационного напыления. Берлин С.О., Кореньков В.И., Пекшев П.Ю., Попов Ю.С., Шуртов С.А., заявитель и патентообладатель Новосибирский филиал Всесоюзного научно-исследовательского и конструкторского института химического машиностроения. Заявл. 1992-06-23. Опубл. 20.12.1996.
25. Пат. 2112603 Российская Федерация, МПК В05В 7/20. Малогабаритный детонационный метатель. Вонг Чин Чунг, Кореньков В.И., Кустов Б.А., Макаров Г.Н., Попов Ю.С. Заявитель и патентообладатель АО открытого типа "НовосибирскНИИХиммаш". № 96117311/25. Заявл. 28.08.1996. Опубл. 10.06.1998.
26. Пат. 2176162 Российская Федерация, МПК В05В 7/20. Лабиринтное устройство подачи газа и способ предотвращения обратной вспышки в детонационной пушке. А.В. Чернышев, Г.Ю. Барыкин; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество "НовосибирскНИИХиммаш". № 98114092/12. Заявл. 23.12.1996; опубл. 27.11.2001.
27. А.с. 636845 СССР. МКИ В 05 В 7/20. Устройство для напыления покрытий. Ю.А. Харламов. № 2474567/23-05; заявл. 15.04.1977; не публ.
28. А.с. 736436 СССР, МКИ В 05 В 7/20. Устройство для напыления покрытий детонационно-газовым методом. Ю.А. Харламов. № 2476190/23-05. Заявл. 19.04.77, не публ.
29. А.с. 690837 СССР, МКИ С 23С 7/00. Устройство для детонационного напыления покрытий Ю.А. Харламов. № 2550826/222-02. Заявл. 01.12.1977, не публ.
30. А.с. 513728 (СССР). Устройство для детонационного напыления / Г.В. Самсонов, Б.Н. Двукраев, С.Ю. Шаривкер и др. Опубл. в БИ 1976 № 18, с. 19.
31. А.с. 702584 СССР, МКИ В05В7/20. Устройство для детонационно-газового напыления покрытий / Харламов Ю.А., Рябошапка Б.Л., Писклов Ю.И. - № 2648241/23-05; заявл. 19.07.78; не публ.
32. А.с. 1419737 СССР, МКИ В 05 В 7/20. Устройство для нанесения покрытий детонационным способом / Гончаров А.А., Федько Ю.П., Амлинский Р.А. и др. - № 3315309/23-05; заявл. 30.06.81; опубл. 30.08.88, Бюл. № 32.
33. А.с. 1827872 СССР, МКИ В05В 7/20. Устройство для детонационного напыления покрытий / Барыкин Г.Ю., Чернышов А.В., Коржик В.Н. (СССР). - № 4795772/05; заявл. 19.12.89; опубл. 27.03.96, Бюл. № 9.
34. А.с. 655109 СССР, МКИ В 05 В 7/20. Ствол детонационно-газового устройства для напыления покрытий / Ю.А. Харламов, В.И. Каленов; - № 2465914; заявл. 28.03.1977; не публ.
35. Pat. DE 3105 323 C2 Deutschland, В 05 В 7/20. Detonationsbeschichtung Vorrichtung / Y.A. Charlamov, V.I. Kalenov, B.L. Rjaboshapko, Ju.I. Pisklov; patentinhaber Voroshilovgradskij masinostroite'nyi institute, SSSR. - anmeldetag 13.2.81; offenlegungstag 2.9.82.
36. Brevet d'invention 2 499 874 Republique Francaise, В 05 В 7/20, 7/16. Dispositif de canon pour la projection de revetementspar détente de gas / Ju.A. Kharlamov, V.I. Kalenov, B.L. Ryaboshapko, Ju.I. Pisklov; deposant Voroshilovgradsky masinostroitelny institute, SU. - date de dépôt 13 février 1981; date de la mise a la disposition du public de la demande 20.8.1982.
37. Детонационно-газовая аппаратура для напыления покрытий / Ю.А. Харламов, М.Х. Шоршоров, Ю.И. Писклов, Б.Л. Рябошапка.- М.: Ин-т металлургии им. А.А. Байкова АН СССР, 1980 - 65 с.
38. Зверев А.И., Шаривкер С.Ю., Астахов Е.А. Детонационное напыление покрытий. Л.: Судостроение, 1979 - 232 с.
39. А.с. 551053 СССР, МКИ В 05 В 7/20. Установка для детонационного напыления порошковых покрытий / В.А. Попов, Э.А. Миронов.
40. Использование пересжатой детонации для нанесения покрытий / Т. П. Гавриленко, Ю. А. Николаев, В. Ю. Ульяницкий // Физика горения и взрыва. - 2010. - Т. 46, N 3. - С. 125-133.
41. Батраев И.С., Прохоров Е.С., Ульяницкий В.Ю. Разгон и нагрев порошковых частиц продуктами газовой

- детонации в каналах с коническим переходом // Физика горения и взрыва, 2014, т. 50, N-° 3. – С.78-86.
42. Злобин С.Б., Прохоров Е.С., Ульяницкий В.Ю. Разгон и нагрев частиц в профилированном стволе установки для детонационного напыления // XIV Минский международный форум по тепло- и массообмену, 10-13 сентября 2012 г.: тезисы докладов и сообщений - XIV Minsk international heat and mass transfer forum: abstracts of the reports and communication. Т.2, ч.2 / [редколл.: О.Г.Пенязьков и др.]. - Минск: Институт тепло- и массообмена НАН Беларуси, 2012. - С.468-471.
43. Динамика движения и нагрева порошка при детонационном напылении покрытий / В. А. Ульшин, М. Ю. Харламов, Ю. С. Борисов, Е. А. Астахов // Автоматическая сварка, 2006, № 9. – С.37-43.
44. Пат. 147755 Российская Федерация, МПК F23C 15/00. Устройство сжигания топлива в режиме многоступенчатой детонации / Звездин К.А., Голуб В.В., Баланов Д.И. и др.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН). - № 2012146388/06; заявл. 2012.10.314 опубл. 2014.11.20, Бюл. № 24.
45. Иницирование газовой детонации в трубе с профилированным препятствием [] / С. М. Фролов, В. С. Аксенов // Доклады Академии наук. - 2009. - Т. 427, N 3, июль. - С. 344-347.
46. А.с. 769857 СССР, МКИ В 05 В 7/20. Детонационно-газовая установка для напыления покрытий / Ю.А. Харламов; - № 2761643/23-05; заявл. 28.04.1979; не публ.
47. А.с. 1728582 СССР, МКИ F23 C 11/04; В05В7/20. Импульсная камера сгорания / Ю.А. Харламов, А. И. Зверев и В. Н. Гольдфайн. - № 4820353/06; заявл. 25.04.90; опубл. 23.04.92. Бюл. № 15.
48. А.с. 1572147 СССР, МКИ F 23 C 11/04, В 05 В 7/20. Импульсная камера сгорания / Харламов Ю.А.; - № 4218872/24-06; заявл. 27.03.87; не публ.
49. Иницирование газовой детонации в трубах с крутыми U-образными поворотами / С. М. Фролов, В. С. Аксенов, И. О. Шамшин // Доклады Академии наук. - 2008. - Т. 418, N 5, февраль. - С. 642-646.
50. Распространение ударных волн и детонации в каналах с U-образными поворотами предельной кривизны [] / С. М. Фролов, В. С. Аксенов, И. О. Шамшин // Химическая физика. - 2008. - Т. 27, N 10. - С. 5-21.
51. Пат. 2350403 Российская Федерация, МПК В05В7/20. Устройство для детонационного напыления внутренних поверхностей деталей / Мелехин ЛФ., Люханов А. В., Филатов М.А.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Кубанский государственный технологический университет". - № 2007129292/11; заявл 2007-07-30; опубл. 27.03.2009. Бюл. № 9.
52. Семенов И.В., Лебедева А.Ю., Ахмедьянов И.Ф. Иницирование детонации в винтовой трубе // Труды 52-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук». Часть VII. Управление и прикладная математика. Том 3. — М.: МФТИ, 2009. с.108-110.
53. А.с. 625339 СССР, МКИ В 05 В 7/20. Устройство для напыления покрытий / Ю.А. Харламов. - № 2488401/23-05; заявл. 10.05.1977; не публ.
54. А.с. 769853 СССР, МКИ В 05 В 7/20. Устройство для детонационного напыления покрытий / Ю.А.Харламов; - № 2699507/23-05; заявл. 21.12.1978; не публ.
55. А.с. 907913 СССР, МКИ В 05 В 7/20. Устройство для напыления покрытий / Ю.А. Харламов. - № 2988985/23-05; заявл. 04.10.1980; не публ.
56. А.с. 790433 СССР, МКИ В 05 В 7/20. Устройство для детонационного нанесения покрытий / Ю.А. Харламов. - № 2816356/23-05; заявл. 25.07.1980; не публ.
57. А.с. 828487 СССР, МКИ В 05 В 7/20. Устройство для детонационного нанесения покрытий / Ю.А. Харламов. - № 2831035/23-05; заявл. 24.10.1979; не публ.
58. А.с. 687666 СССР, МКИ В 05 В 7/20. Устройство для детонационно-газового напыления покрытий / Ю.А. Харламов. - № 2550232/23-05; заявл. 28.05.1979; не публ.
59. А.с. 733139 СССР, МКИ В 05 В 7/20. Устройство для напыления покрытий детонационно-газовым методом / Ю.А. Харламов. - №2672924/23-05; заявл. 12.10.78; не публ.
60. Пат. 2036022 Российская Федерация, МПК В05В 7/20. Устройство для детонационного нанесения покрытий на внутреннюю поверхность изделий / Яковлев В.А., Погорилый А.Г., Вольвач Ю.А.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Детон". - № 5041014/05; заявл. 28.05.1992; опубл. 27.05.1995.
61. Тюрин Ю.Н., Погребняк А.Д., Колисниченко О.В. Сравнительный анализ эффективности кумулятивно-детонационного и HVOF устройств для газотермического напыления покрытий // ФП ФИП PSE, 2009, т. 7, № 1-2, vol. 7, No. 1-2. – С.39-45.
62. Пат. 2506341 Российская Федерация, МПК С23С 4/12, В05В 7/20. Способ газодинамического детонационного ускорения порошков и устройство для его осуществления / Василек Н.Я., Тюрин Ю.Н., Колисниченко О.В.; заявитель и патентообладатель Василек Н.Я., Тюрин Ю.Н., Колисниченко О.В. - № 2012129061/02; заявл. 11.07.2012; опубл. 10.02.2014 Бюл. № 4.
63. Колисниченко О.В., Тюрин Ю.Н., Р. Товбин Р. Эффективность процесса напыления покрытий с использованием многокамерного детонационного устройства // Автоматическая сварка, 2017, № 10(768). – С.28-34.
64. А.с. 543221 СССР, МКИ В05 В 7/20. Ствол устройства для детонационного нанесения покрытий / Харламов Ю.А., Терновской Э.М., Рябошапко Б.Л. - № 2185883/05; заявл. 29.10.75; не публ.
65. Пат. 2404860 Российская Федерация, МПК В05В 7/20. Ствол установки детонационного напыления / Ульяницкий В.Ю., Штерцер А.А., Злобин С.Б.; заявитель и патентообладатель Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук. - № 2009100308/05; заявл. 23.12.2008; опубл. 27.11.2010, Бюл. № 33.
66. А.с. 790430 СССР, МКИ В05 В 7/20. Устройство для детонационного напыления покрытий / Харламов Ю.А.; - № 2811179/23-05; заявл. 15.08.79; не публ.
67. А.с. 803207 СССР, МКИ В05 В 7/20. Детонационно-газовая установка для напыления покрытий / Харламов Ю.А.; - № 2825701/23-05; заявл. 03.10.79; не публ.

68. 78. А.с. 769856 СССР, МКИ В05 В 7/20. Устройство для детонационного нанесения покрытий / Ю.А. Харламов; - № 2750470/23-05; заявл. 06.04.79; не публ.
69. 79. А.с. 790428 СССР, МКИ В05 В 7/20. Устройство для детонационного напыления покрытий / Ю.А. Харламов; - № 2804916/23-05; заявл. 31.07.79; не публ.
70. 80. А.с. 882061 СССР, МКИ В05 В 7/20. Детонационно-газовая установка для нанесения покрытий / Ю.А. Харламов; - № 2958749/23-05; заявл. 10.07.80; не публ.

References

- Kharlamov Y. A. Gaseous pulse detonation spraying: current status, challenges, and future perspective // Intern. Thermal Spray Conference & Exposition ITSC 2008: Maastricht, The Netherlands, June 2-4, 2008. Conference Proceedings. – DVS – German Welding Society. – 2008. – P. 159-166.
- Primenenie detonacii v gazah dlya nanoseniya pokrytij / Yu.A. Harlamov, M.H. Shorshorov, V.V. Kudinov, O.V. Gusev, B.L. Ryaboshapko // Fizika goreniya i vzryva, 1975, T.11, № 1. – S.88-95.
- Harlamov Yu.A., Polonskij L.G. Gazotermicheskoe napylenie. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya // Visnik Skhidnoukr. nac. universitetu imeni V.Dalya. 2016, № 2(226). – S.5-19.
- Shorshorov M.H., Harlamov Yu.A. Fiziko-himicheskie osnovy detonacionno-gazovogo napyleniya pokrytij. M.: Nauka, 1978 - 227 s.
- Yuriy Kharlamov, Maksym Kharlamov. Design concepts of gaseous detonation guns for thermal spraying // Tekh Komisiji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa, 2013, V.13, № 4. – P.82-91.
- Harlamov Yu.A. Razvitie detonacionno-gazovykh tekhnologij // Visnik Skhidnoukr. nac. universitetu imeni V.Dalya, 2017, № 7(237). – S.114-132.
- Harlamov Yu.A. Konstruktivnye skhemy detonacionno-gazovykh ustrojstv dlya obrabotki poroshkovykh materialov // Poroshkovaya metallurgiya, 1986, № 12. – S.89-95.
- Harlamov Yu.A. Stvolny ustanovok dlya detonacionnogo napyleniya pokrytij // Avtomaticheskaya svarka, 2001, № 10. – S.17-21.
- Harlamov Yu.A., Sundararadzhan G., Cyapa A.N. Konstruktivnye osobennosti detonacionnykh kamer sgoraniya dlya napyleniya // Visnik Skhidnoukraїns'kogo nacional'nogo universitetu, 2001, № 5(39). – S.169-178.
- Detonation propagation from a cylindrical tube into a diverging cone / Takuma ENDO, Ryuji KOBAYASHI, Shimon KUWAJIMA, Yoko SEKI, Wookyung KIM and Tomoyuki JOHZAKI // Journal of Thermal Science and Technology. 2020. Vol/15/ No.3. Paper No.20-00283. – 12 p.
- Harlamov Yu.A. Detonacionno-gazovye ustanovki dlya nanoseniya pokrytij (obzor) // Svarochnoe proizvodstvo, 1989, № 11. – S.21-24.
- Harlamov Yu.A. Nauchnye i tekhnologicheskie osnovy detonacionno-gazovogo napyleniya pokrytij: avtoref. ... dokt.tekhn.nauk... «Tekhnologiya i mashiny svarochnogo proizvodstva», Kiev, 1994. – 35 s.
- Baklanov D.I., Golub V.V., Ivanov K.V., Krivokorytov M.S., Perekhod goreniya v detonaciyu v kanale s diametrom men'she kriticheskogo diametra suschestvovaniya stacionarnoj detonacii/ Teplofizika vysokih temperatur, 2011, tom 49, № 6, s. 1–6.
- Primenenie detonacii vodorodo-vozdushnoj smesi v ustrojstvah dlya bezygol'noj in'ekcii / V. V. Golub, T. V. Bazhenova, D. I. Baklanov, K. V. Ivanov, M. S. Krivokorytov // Teplofizika vysokih temperatur, 2013, tom 51, № 1, s. 1–3.
- Pat. 1836161 Rossijskaya Federaciya, MPK7 V 05 V 7/20. Ustrojstvo dlya gazotermicheskogo nanoseniya pokrytij / B.M. Golubec, V.V. Koshevoj, M.I. Pekhn'ov, A.I. Cyhan; zayavitel' i patentoobladatel' Fiziko-mekhanicheskij in-t im. V.Karpenko AN Ukrainy. -№ 4768288/05; zayavl. 5.12.89; opubl. 23.08.93, Byul, № 31.
- Pat. 2399430 Rossijskaya Federaciya, MPK7 V 05 7/20. Ustanovka dlya detonacionnogo napyleniya pokrytij / Ul'yanickij V.YU., Kiryakin A.L., SHtercer A.A., Zlobin S.B.; zayavitel' i patentoobladatel' Obshchestvo s ograničennoj otvetstvennost'yu "Sibirskie Tekhnologii Zashchitnyh Pokrytij". - № 2009105561/12; zayavl. 17.02.2009; opubl. 20.09.2010, Byul. № 26.
- Pat. 2176162 Rossijskaya Federaciya, MPK B05B 7/20. Labirintnoe ustrojstvo podachi gaza i sposob predotvrashcheniya obratnoj vspyshki v detonacionnoj pushke / A. V. Chernyshev, G.YU. Barykin; zayavitel' i patentoobladatel' Otkrytoe akcionerное obshchestvo "NovosibirskNIIhimnash". - № 98114092/12; zayavl. 23.12.1996; opubl. 27.11.2001.
- A.s. 1603582 SSSR. MKI V 05 V 7/20. Ustrojstvo dlya detonacionnogo napyleniya pokrytij / Barykin G.YU., Chernyshov A.V., Bobrov S.V. (SSSR). – opubl. 2000, Byul. № 8.
- A.s. 1716253 SSSR, MKI V 05 V 7/20. Ustrojstvo dlya impul'snogo szhiganiya goryuchej smesi / Harlamov Yu.A. (SSSR). - № 4825492/06; zayavl. 19.03.90; opubl. 29.02.92; Byul. № 8.
- A.s. 1827872 SSSR, MKI B05B 7/20. Ustrojstvo dlya detonacionnogo napyleniya pokrytij / Barykin G.YU., Chernyshov A.V., Korzhik V.N. (SSSR). - № 4795772/05; zayavl. 19.12.89; opubl. 27.03.96, Byul. № 9.
- Pat. 2201293 Rossijskaya Federaciya, MPK B05B7/20. Ustrojstvo dlya samopodderzhaniya detonacii / Chernyshev A.V., Barykin G.YU., Lakiza S.N.; zayavitel' i patentoobladatel' AEROSTAR KOATINGS, S.L. (ES). - № 98117840/12; Zayavl. 1997-12-24; opubl. 27.03.2003.
- Pat. 2236910 Rossijskaya Federaciya, MPK7 B05B 7/20. Vysokoproizvoditel'nyj detonacionnyj pistollet-raspylitel' s vysokoj chastotoj povtoreniya impul'sov / Barykin G.YU., Fagoaga A.I.; zayavitel' i patentoobladatel' AEROSTAR KOATINGS, S.L. (ES). - 2002113737/12, zayavl. 1999.10.28; opubl. 2003.11.27.
- Pat. 2460591 Rossijskaya Federaciya, MPK B05B 7/20. Detonacionnyj metatel' / Koren'kov V.I., Popov YU.S.; zayavitel' i patentoobladatel' Otkrytoe akcionerное obshchestvo "NovosibirskNIIhimnash". - № 2011112260/05; zayavl. 30.03.2011; opubl. 10.09.2012 Byul. № 25.
- Pat. 2070442 Rossijskaya Federaciya, MPK B05B7/20. Pushka dlya detonacionnogo napyleniya / Berlin S.-O., Koren'kov V.I., Pekshev P.YU., Popov YU.S., SHutov S.A.; zayavitel' i patentoobladatel' Novosibirskij filial Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo i konstruktorskogo instituta himicheskogo mashinostroeniya. – zayavl. 1992-06-23; opubl. 20.12.1996.
- Pat. 2112603 Rossijskaya Federaciya, MPK B05B 7/20. Malogabaritnyj detonacionnyj metatel' / Vong CHin CHung, Koren'kov V.I., Kustov B.A., Makarov G.N., Popov YU.S.; zayavitel' i patentoobladatel' AO otkrytogo tipa "NovosibirskNIIhimnash". - № 96117311/25; zayavl. 28.08.1996; opubl. 10.06.1998.

26. Pat. 2176162 Rossijskaya Federaciya, MPK B05B 7/20. Labirintnoe ustrojstvo podachi gaza i sposob predotvrashcheniya obratnoj vspyshki v detonacionnoj pushke / A. V. Chernyshev, G.Yu. Barykin; zayavitel' i patentoobladatel' Otkrytoe akcionerное obshchestvo "NovosibirskNIHimmash". - № 98114092/12; zayavl. 23.12.1996; opubl. 27.11.2001.
27. A.s. 636845 SSSR, MKI V 05 V 7/20. Ustrojstvo dlya napyleniya pokrytij / Yu.A. Harlamov; - № 2474567/23-05; zayavl. 15.04.1977; ne publ.
28. A.s. 736436 SSSR, MKI V 05 V 7/20. Ustrojstvo dlya napyleniya pokrytij detonacionno-gazovym metodom / Yu.A. Harlamov; - № 2476190/23-05; zayavl. 19.04.77; ne publ.
29. A.s. 690837 SSSR, MKI S 23S 7/00. Ustrojstvo dlya detonacionnogo napyleniya pokrytij / Yu.A. Harlamov. - № 2550826/222-02; zayavl. 01.12.1977; ne publ.
30. A.s. 513728 (SSSR). Ustrojstvo dlya detonacionnogo napyleniya / G.V. Samsonov, B.N. Dvukraev, S.YU. SHarivker i dr. Opubl. v BI 1976 № 18, s. 19.
31. A.s. 702584 SSSR, MKI B05B7/20. Ustrojstvo dlya detonacionno-gazovogo napyleniya pokrytij / Harlamov Yu.A., Ryaboshapko B.L., Pisklov YU.I. - № 2648241/23-05; zayavl. 19.07.78; ne publ.
32. A.s. 1419737 SSSR, MKI V 05 V 7/20. Ustrojstvo dlya naneseniya pokrytij detonacionnym sposobom / Goncharov A.A., Fed'ko YU.P., Amlinskij R.A. i dr. - № 3315309/23-05; zayavl. 30.06.81; opubl. 30.08.88, Byul. № 32.
33. A.s. 1827872 SSSR, MKI B05B 7/20. Ustrojstvo dlya detonacionnogo napyleniya pokrytij / Barykin G.Yu., Chernyshov A.V., Korzhik V.N. (SSSR). - № 4795772/05; zayavl. 19.12.89; opubl. 27.03.96, Byul. № 9.
34. A.s. 655109 SSSR, MKI V 05 V 7/20. Stvol detonacionno-gazovogo ustrojstva dlya napyleniya pokrytij / Yu.A. Harlamov, V.I. Kalenov; - № 2465914; zayavl. 28.03.1977; ne publ.
35. Pat. DE 3105 323 C2 Deutschland, B 05 B 7/20. Detonationsbeschichtung Vorrichtung / Y.A. Charlamov, V.I. Kalenov, B.L. Rjaboshapko, Ju.I. Pisklov; patentinhaber Voroshilovgradskij masinostroite'nyi institute, SSSR. - anmeldetag 13.2.81; offenlegungstag 2.9.82.
36. Brevet d'invention 2 499 874 Republique Francaise, B 05 B 7/20, 7/16. Dispositif de canon pour la projection de revetementspar détente de gas / Ju.A. Kharlamov, V.I. Kalenov, B.L. Ryaboshapko, Ju.I. Pisklov; deposunt Voroshilovgradsky masinostroitelny institute, SU. - date de dépôt 13 février 1981; date de la mise a la disposition du public de la demande 20.8.1982.
37. Detonacionno-gazovaya apparatura dlya napyleniya pokrytij / YU.A Harlamov, M.H. SHorshorov, YU.I. Pisklov, B.L. Ryaboshapko. - M.: In-t metallurgii im. A.A. Bajkova AN SSSR, 1980 - 65 s.
38. Zverev A.I., SHarivker S.YU., Astahov E.A. Detonacionnoe napylenie pokrytij. L.: Sudostroenie, 1979 - 232 s.
39. A.s. 551053 SSSR, MKI V 05 V 7/20. Ustanovka dlya detonacionnogo napyleniya poroshkovyh pokrytij / V.A. Popov, E.A. Mironov.
40. Ispol'zovanie pereszhatoj detonacii dlya naneseniya pokrytij / T. P. Gavrilenko, YU. A. Nikolaev, V. Yu. Ul'yanickij // Fizika goreniya i vzryva. - 2010. - T. 46, N 3. - S. 125-133.
41. Batraev I.S., Prohorov E.S., Ul'yanickij V.Yu. Razgon i nagrev poroshkovyh chastic produktami gazovoj detonacii v kanalah s konicheskim perekhodom // Fizika goreniya i vzryva, 2014, t. 50, N- o 3. - S.78-86.
42. Zlobin S.B., Prohorov E.S., Ul'yanickij V.Yu. Razgon i nagrev chastic v profilirovannom stvole ustanovki dlya detonacionnogo napyleniya // XIV Minskij mezhdunarodnyj forum po teplo- i massoobmenu, 10-13 sentyabrya 2012 g.: tezisy dokladov i soobshchenij - XIV Minsk international heat and mass transfer forum: abstracts of the reports and communication. T.2, ch.2 / [redkoll.: O.G.Penyaz'kov i dr.]. - Minsk: Institut teplo- i massoobmena NAN Belarusi, 2012. - S.468-471.
43. Dinamika dvizheniya i nagreva poroshka pri detonacionnom napylenii pokrytij / V. A. Ul'shin, M. Yu. Harlamov, Yu. S. Borisov, E. A. Astahov // Avtomaticheskaya svarka, 2006, № 9. - S.37-43.
44. Pat. 147755 Rossijskaya Federaciya, MPK F23C 15/00. Ustrojstvo szhiganiya topliva v rezhime mnogostupenchatoj detonacii / Zvezdin K.A., Golub V.V., Balanov D.I. i dr.; zayavitel' i patentoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe uchrezhdenie nauki Ob"edinennyj institut vysokih temperatur Rossijskoj akademii nauk (OIVT RAN). - № 2012146388/06; zayavl. 2012.10.314 opubl. 2014.11.20, Byul. № 24.
45. Inicirovanie gazovoj detonacii v trube s profilirovannym prepjatstviem [] / S. M. Frolov, V. S. Aksenov // Doklady Akademii nauk. - 2009. - T. 427, N 3, iyul'. - S. 344-347.
46. A.s. 769857 SSSR, MKI V 05 V 7/20. Detonacionno-gazovaya ustanovka dlya napyleniya pokrytij / Yu.A. Harlamov; - № 2761643/23-05; zayavl. 28.04.1979; ne publ.
47. A.s. 1728582 SSSR, MKI F23 C 11/04; B05B7/20. Impul'snaya kamera sgoraniya / Yu.A. Harlamov, A. I. Zverev i V. N. Gol'dfajn. - № 4820353/06; zayavl. 25.04.90; opubl. 23.04.92. Byul. № 15.
48. A.s. 1572147 SSSR, MKI F 23 C 11/04, B 05 B 7/20. Impul'snaya kamera sgoraniya / Harlamov Yu.A.; - № 4218872/24-06; zayavl. 27.03.87; ne publ.
49. Inicirovanie gazovoj detonacii v trubah s krutymi U-obraznymi povоротami [] : tekst / S. M. Frolov, V. S. Aksenov, I. O. Shamshin // Doklady Akademii nauk. - 2008. - T. 418, N 5, fevral'. - S. 642-646.
50. Rasprostranenie udarnyh voln i detonacii v kanalah s U-obraznymi povоротami predel'noj krivizny [] / S. M. Frolov, V. S. Aksenov, I. O. Shamshin // Himicheskaya fizika. - 2008. - T. 27, N 10. - S. 5-21.
51. Pat. 2350403 Rossijskaya Federaciya, MPK B05B7/20. Ustrojstvo dlya detonacionnogo napyleniya vnutrennih poverhnostej detalej / Melekhin LF., Lyuhanov A. V., Filatov M.A.; zayavitel' i patentoobladatel' Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya "Kubanskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet". - № 2007129292/11; zayavl. 2007-07-30; opubl. 27.03.2009. Byul. № 9.
52. Semenov I.V., Lebedeva A.YU., Ahmed'yanov I.F. Inicirovanie detonacii v vintovoj trube // Trudy 52-j nauchnoj konferencii MFTI «Sovremennye problemy fundamental'nyh i prikladnyh nauk». Chast' VII. Upravlenie i prikladnaya matematika. Tom 3. — M.: MFTI, 2009. s.108-110.
53. A.s. 625339 SSSR, MKI V 05 V 7/20. Ustrojstvo dlya napyleniya pokrytij / Yu.A. Harlamov. - № 2488401/23-05; zayavl. 10.05.1977; ne publ.
54. A.s. 769853 SSSR, MKI V 05 V 7/20. Ustrojstvo dlya detonacionnogo napyleniya pokrytij / Yu.A. Harlamov; - № 2699507/23-05; zayavl. 21.12.1978; ne publ.

55. A.s. 907913 SSSR, MKI V 05 V 7/20. Ustrojstvo dlya napyleniya pokrytij / Yu.A. Harlamov. - № 2988985/23-05; zayavl. 04.10.1980; ne publ.
56. A.s. 790433 SSSR, MKI V 05 V 7/20. Ustrojstvo dlya detonacionnogo naneseniya pokrytij / YU.A. Harlamov. - № 2816356/23-05; zayavl. 25.07.1980; ne publ.
57. A.s. 828487 SSSR, MKI V 05 V 7/20. Ustrojstvo dlya detonacionnogo naneseniya pokrytij / YU.A. Harlamov. - № 2831035/23-05; zayavl. 24.10.1979; ne publ.
58. A.s. 687666 SSSR, MKI V 05 V 7/20. Ustrojstvo dlya detonacionno-gazovogo napyleniya pokrytij / YU.A. Harlamov. - № 2550232/23-05; zayavl. 28.05.1979; ne publ.
59. A.s. 733139 SSSR, MKI V 05 V 7/20. Ustrojstvo dlya napyleniya pokrytij detonacionno-gazovym metodom / YU.A. Harlamov. - № 2672924/23-05; zayavl. 12.10.78; ne publ.
60. Pat. 2036022 Rossijskaya Federaciya, MPK B05B 7/20. Ustrojstvo dlya detonacionnogo naneseniya pokrytij na vnutrennyuyu poverhnost' izdelij / YAKovlev V.A., Pogorilyj A.G., Vol'vach YU.A.; zayavitel' i patentoobladatel' Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu "Deton". - № 5041014/05; zayavl. 28.05.1992; opubl. 27.05.1995.
61. Tyurin YU.N., Pogrebnyak A.D., Kolisnichenko O.V. Sravnitel'nyj analiz effektivnosti kumulyativno-detonacionnogo i HVOF ustrojstv dlya gazotermicheskogo napyleniya pokrytij // FIP FIP PSE, 2009, t. 7, № 1-2, vol. 7, No. 1-2. - S.39-45.
62. Pat. 2506341 Rossijskaya Federaciya, MPK C23C 4/12, B05B 7/20. Sposob gazodinamicheskogo detonacionnogo uskoreniya poroshkov i ustrojstvo dlya ego osushchestvleniya / Vasilik N.YA., Tyurin YU.N., Kolisnichenko O.V.; zayavitel' i patentoobladatel' Vasilik N.YA., Tyurin YU.N., Kolisnichenko O.V. - № 2012129061/02; zayavl. 11.07.2012; opubl. 10.02.2014 Byul. № 4.
63. Kolisnichenko O.V., Tyurin Yu.N., R. Tovbin R. Effektivnost' processa napyleniya pokrytij s ispol'zovaniem mnogokamernogo detonacionnogo ustrojstva // Avtomaticheskaya svarka, 2017, № 10(768). - S.28-34.
64. A.s. 543221 SSSR, MKI V05 V 7/20. Stvol ustrojstva dlya detonacionnogo naneseniya pokrytij / Harlamov Yu.A., Ternovskoj E.M., Ryaboshapko B.L. - № 2185883/05; zayavl. 29.10.75; ne publ.
65. Pat. 2404860 Rossijskaya Federaciya, MPK B05B 7/20. Ctvol ustanovki detonacionnogo napyleniya / Ul'yanickij V.Yu., SHtercer A.A., Zlobin S.B.; zayavitel' i patentoobladatel' Institut gidrodinamiki im. M.A. Lavrent'eva Sibirskogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk. - № 2009100308/05; zayavl. 23.12.2008; opubl. 27.11.2010, Byul. № 33.
66. A.s. 790430 SSSR, MKI V05 V 7/20. Ustrojstvo dlya detonacionnogo napyleniya pokrytij / Harlamov Yu.A.; - № 2811179/23-05; zayavl. 15.08.79; ne publ.
67. A.s. 803207 SSSR, MKI V05 V 7/20. Detonacionno-gazovaya ustanovka dlya napyleniya pokrytij / Harlamov Yu.A.; - № 2825701/23-05; zayavl. 03.10.79; ne publ.
68. A.s. 769856 SSSR, MKI V05 V 7/20. Ustrojstvo dlya detonacionnogo naneseniya pokrytij / Yu.A. Harlamov; - № 2750470/23-05; zayavl. 06.04.79; ne publ.
69. A.s. 790428 SSSR, MKI V05 V 7/20. Ustrojstvo dlya detonacionnogo napyleniya pokrytij / Yu.A. Harlamov; - № 2804916/23-05; zayavl. 31.07.79; ne publ.
70. A.s. 882061 SSSR, MKI V05 V 7/20. Detonacionno-gazovaya ustanovka dlya naneseniya pokrytij / Yu.A. Harlamov; - № 2958749/23-05; zayavl. 10.07.80; ne publ.

Харламов Ю.А. Импульсные камеры сгорания

Обобщены и проанализированы конструктивные схемы импульсных камер сгорания ИКС), используемых в установках для детонационно-газового напыления покрытий. Сформулированы основные требования к импульсным камерам сгорания. Разработана классификация ИКС по основным признакам, в том числе по функциональному назначению, виду используемого топлива, характеру подачи газов, по геометрическим параметрам – оси каналов горения и их количеству, поперечному сечению и пр., компоновке и др. Показана возможность использования пересжатых ДВ, получаемых в сужающихся ИКС, что расширяет технологические возможности метода по нанесению покрытий из тугоплавких материалов и открывает перспективы создания малогабаритных детонационно-газовых установок, включая нанесение покрытий на внутренние поверхности деталей. Даны рекомендации по областям рационального применения рассмотренных схем ИКС и их проектированию.

Ключевые слова: газовая детонация; газотермическое напыление покрытий; горючие смеси газов; двухфазная струя; камеры сгорания; поперечное сечение; порошки

Kharlamov Y.O. Pulsed combustion chambers

The design diagrams of pulsed combustion chambers (PCC) used in installations for detonation-gas spraying of coatings are generalized and analyzed. The main requirements for pulsed combustion chambers are formulated. A classification of PCC was developed according to the main features. According to the functions performed into the D-Gun it is distinguished main and auxiliary PCC. The main PCC are designed to form a sprayed heterogeneous flow, the auxiliary ones are designed to perform additional functions into D-Gun. By the type of fuel used, PCC are distinguished, operating on: gaseous, liquid or combined (gas and liquid) fuel. In the direction of the flows of the supplied fresh combustible mixture and the outflow of detonation products there are direct-flow and counter-flow PCC. By the nature of the gas supply, PCC are distinguished with cyclic (valve) and valveless gas supply. On the cross-section of the working chamber, PCC are distinguished: with a constant section and a variable section (profiled). By geometry, PCC are distinguished: straight and curved (with turns). By the number of sections, PCC are distinguished: single-section and multi-section. According to the location of the powder injection point, PCC are distinguished: with the powder injection at the closed end, in the middle part, at the output (open) end and outside the open end. According to the location of the powder injection point, PCC are distinguished: with the powder injection at the closed end, in the middle part, at the output (open) end and outside the open end. According to the layout, PCC are distinguished: with built-in and remote mixing and ignition chambers. According to the geometry of the

walls, PCC are distinguished: smooth, rough and permeable. By the presence of structural elements in the working channel, the PCC are distinguished: without obstacles (cross-section regulators, screens of special structural elements (for supplying and removing gases, powder, etc.) and with the presence of obstacles. By the number of chambers for heating and accelerating the powder: single-chamber and multi-chamber PCC. The possibility of using over-compressed detonation waves obtained in tapering PCC, which expands the technological capabilities of the D-Gun method for the deposition of coatings from refractory materials and opens up prospects for the creation of small-size detonation-gas installations, including the deposition of coatings on the inner surfaces of parts.

Recommendations on the areas of rational application of the considered PCC schemes and their design are given.

Key words: gas detonation; thermal spraying of coatings; combustible gas mixtures; two-phase jet; combustion chambers; cross section; powders

Харламов Юрій Олександрович – д.т.н., проф., професор кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк) yuriy.kharlamov@gmail.com

Стаття подана 03.02.2021 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-152-164>

УДК 621.793

ФОРМУВАННЯ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ

Харламов Ю.О., Міщик А.В., Романченко О.В.

FORMATION OF THERMAL SPRAY COATINGS

Kharlamov Y.O., Mitsyk A.V., Romanchenko O.V.

Розглянуто перспективи використання методу неруйнівних випробувань безперервним вдавненням індентора для визначення механічних властивостей газотермічних покриттів. Проведено випробування з оцінки мікротвердості й модуля пружності композиційних покриттів на основі карбідів вольфраму і хрому, отриманих методом детонаційно-газового напилення. Розглянуто діаграми проникнення для покриттів з порошків ВК8, ВК15, ВК18С, КХН15С. Показано, що при оптимальних режимах напилювання мікротвердість одержуваних покриттів близька до мікротвердості спечених твердих сплавів того ж складу. Визначено значення коефіцієнтів варіації значень мікротвердості зі збільшенням глибини відбитка для зразків зі спеченого твердого сплаву і напилених покриттів. При оптимальних режимах напилювання досягаються не тільки максимальні значення мікротвердості та модуля пружності покриттів, але і більш однорідні структура і механічні властивості покриттів. Більш чутливими до змін технологічних параметрів є значення модуля пружності напилених покриттів, що більш зручно при відпрацюванні технологічних процесів.

Ключові слова: глибина відбитка; випробування безперервним вдавненням індентора; коефіцієнт варіації; мікротвердість; модуль пружності; покриття; режими напилення; фазовий склад

Вступ. Газотермічні покриття (ГТП) отримують все ширше застосування для захисту поверхні відповідальних деталей різних виробів машинобудування в якості теплозахисних і термобар'єрних, зносостійких і антифрикційних і т.д. Багатофункціональне застосування ГТП пов'язано з можливістю використання в цих технологіях дуже широкої номенклатури напилюваних порошкових матеріалів (шнурів, дротів). Це забезпечує можливість вибору найбільш ефективного матеріалу для конкретних умов експлуатації виробів, для ГТП характерна висока технологічність і можливість управління їх експлуатаційними властивостями в процесі їх осадження.

Ефективність застосування ГТП значною мірою визначається особливостями їх структури [1]. Характерна структура ГТП товщиною 0,3 ... 0,6 мм

має шаруватий характер і складається з сильно деформованих дископодібних частинок (сплетів), розташованих уздовж поверхні основи, горизонтальних і вертикальних границь між частинками та пір між ними. Товщина кожної дископодібної частки становить 2 ... 10 мкм і в 10 – 20 разів менше її характерного поздовжнього розміру. Вертикальні границі обмежені з двох сторін монолітним матеріалом інших дископодібних частинок. Процентний вміст пористості варіюється режимами напилення в межах 2 ... 12 %. Адгезійна і когезійна міцність покриття на стиск і зсув значно перевищує аналогічні показники міцності покриття на розтягнення. Адгезійна міцність ГТП на відрив 25 ... 45 МПа і вище і когезійна міцність на розтягнення, що досягає значень 40 ... 80 % міцності монолітного матеріалу, забезпечують їх працездатність у всіх відомих випадках складного високонавантаженого застосування через їх експлуатації в умовах дії стискаючих або зсувних зовнішніх механічних зусиль. Сучасні ГТП мають високу демпфуючу здатність до знакозмінних механічних і температурних напружень, а також здатність локалізувати втомні пошкодження і мікротріщини усередині зерна кристалітів, не даючи їм можливості прорости до конструкційного матеріалу основи [2].

У технологіях газотермічного напилення відсутня можливість оперативного контролю якості покриттів, що ускладнює їх проектування та оптимізацію. Авторам не відомі будь-які фізично обґрунтовані та практично апробовані методи, що дозволяють з єдиних позицій підійти до проектування та оптимізації конкретних технологій отримання ГТП. Зазвичай відпрацювання процесів газотермічного напилення здійснюється шляхом постановки обмеженого набору технологічних експериментів на конкретному обладнанні з використанням вихідних матеріалів різного, в тому числі фракційного складу з подальшим дослідженням характеристик отриманих ГТП. Внаслідок досить великої кількості факторів, що визначають властивості одержуваних ГТП, метод «проб і помилок» часто доповнюють плануванням експерименту, діагностикою або моделюванням

стану частинок в напилювальному струмені перед зіткненням їх з поверхнею основи. Спроби постановки наскрізного комплексного експерименту при газотермічного напилення (ГТН) [2 – 4] з метою вивчення фізичних процесів, що протікають в ланцюжку «генерація високотемпературного газового потоку – введення порошкового або розпорошеного дротяного матеріалу – формування технологічного гетерогенного потоку – взаємодія частинок з поверхнею основи та формування покриття», вельми нечисленні та в основному являють методичний інтерес через його ресурсомісткість при відпрацюванні реальної технології.

Відомі моделі формування ГТП розглядають в якості елементарного акту взаємодії «крапля розплаву – підкладка» на стадії напірного розтікання, що реалізується по одному з чотирьох сценаріїв в залежності від співвідношення між контактною температурою T_c і температурами плавлення матеріалів частки T_{pm} і основи T_{bm} : 1) розтікання та одночасне затвердіння краплі розплаву на твердій основі ($T_{pm} > T_c < T_{bm}$); 2) розтікання, затвердіння краплі та одночасне підплавлення основи в зоні контакту її з часткою ($T_{pm} > T_c \geq T_{bm}$); 3) розтікання краплі на твердій основі ($T_{pm} \leq T_c < T_{bm}$); 4) розтікання краплі при одночасному підплавлення основи ($T_{pm} \leq T_c > T_{bm}$) [2 – 5].

Метою роботи є аналіз загальних закономірностей формування газотермічних покриттів з урахуванням особливостей взаємодії напилюваних частинок з поверхнею основи та основних етапів його моделювання.

Фізичні принципи отримання міцних покриттів. Для прогнозування структури та механічних властивостей ГТП важливу роль відіграє моделювання їх шаруватої структури, що формується з послідовно осаджених частинок матеріалу вихідного матеріалу. Процеси взаємодії частинок з поверхнею деталі можна розділити на дві групи: істотні (схоплювання) і неприпустимі (пошкодженість). До істотних належать явища, пов'язані з утворенням фізичного контакту матеріалів, що з'єднуються (частки та деталі), активації їх (його) і подальшої об'ємної взаємодії. До неприпустимих відносяться явища, що призводять до руйнування частинок і локальних ділянок поверхневого шару деталі (або формованого покриття), руйнуванню міжатомних зв'язків, що утворюються, між часткою і деталлю, утворенню на границі контакту вторинних структур, які не відповідають вимогам експлуатації покриття і не володіють достатньою міцністю та ін.

Відомий ряд класифікацій процесів взаємодії [3 – 18] частинок з деталлю з урахуванням умов їх зіткнення, параметрів термічної і термомеханічної взаємодії, структури та властивостей їх матеріалів та ін. При зіткненні частинок з основою протікають різні явища: підплавлення; кристалізація; пружна і пластична деформація; дифузія або аномальний масоперенос; екзотермічні реакції; гідродинамічне розтікання і кумулятивні ефекти; крихке руйнування; екзоелектронна емісія та ін. Явища, якісні та кількісні характеристики яких мають найбільший вплив на контактну взаємодію і схоплювання матеріалів, відносяться до провідних. Поряд з провідними протікають супутні явища, які незначно впливають на формування покриттів.

В основу класифікації видів взаємодії часток з основою можуть бути покладені наступні принципи. Система взаємодії часток з основою (PS) розглядається як відкрита термодинамічна система. Всі процеси контактної взаємодії матеріалів частинок і основи виникають і розвиваються в результаті двох основоположних явищ, активування, тобто збільшення вільної енергії матеріалів PS, і пасивації – її зменшення. Енергія термомеханічної взаємодії частинок з основою, включаючи теплову та кінетичну енергію частинок w_p , що є джерелом загального активування GA_p , в основному витрачається на нагрів основи Q (термічне активування GA_T) і частково запасастся матеріалами поверхневих шарів ΔE (структурне активування GA_C), тобто, $w_p = Q + \Delta E = GA_p$. Основними складовими пасивації $GP_{d,s}$ є енергія G_d , що розсіюється оброблюваним виробом (деталлю і формується покриттям), і енергія G_s , що запасастся матеріалами PS, тобто, $w_p = G_d + G_s = GP_{d,s}$.

Все різноманіття процесів, що виникають при взаємодії частинок з основою, може бути розділене на три основні групи: 1) нормальні процеси, що супроводжуються утворенням міцного зчеплення частинок з основою; 2) явища слабкої взаємодії, що супроводжуються утворенням слабких зв'язків матеріалів частинки та основи (з низькою міцністю зчеплення) або їх відсутністю; 3) явища пошкодженості, що супроводжуються руйнуванням поверхневого шару основи та частинок або утворенням дефектів в поверхневому шарі основи та формованому покритті.

Нормалізація взаємодії частинок з основою є результатом термодинамічної природи цих процесів, їх здатності при дотриманні певних умов спонтанно організовувати стійкі, впорядковані стани – енергетично стійкі конфігурації електронів між атомами поверхонь, що з'єднуються [7, 19].

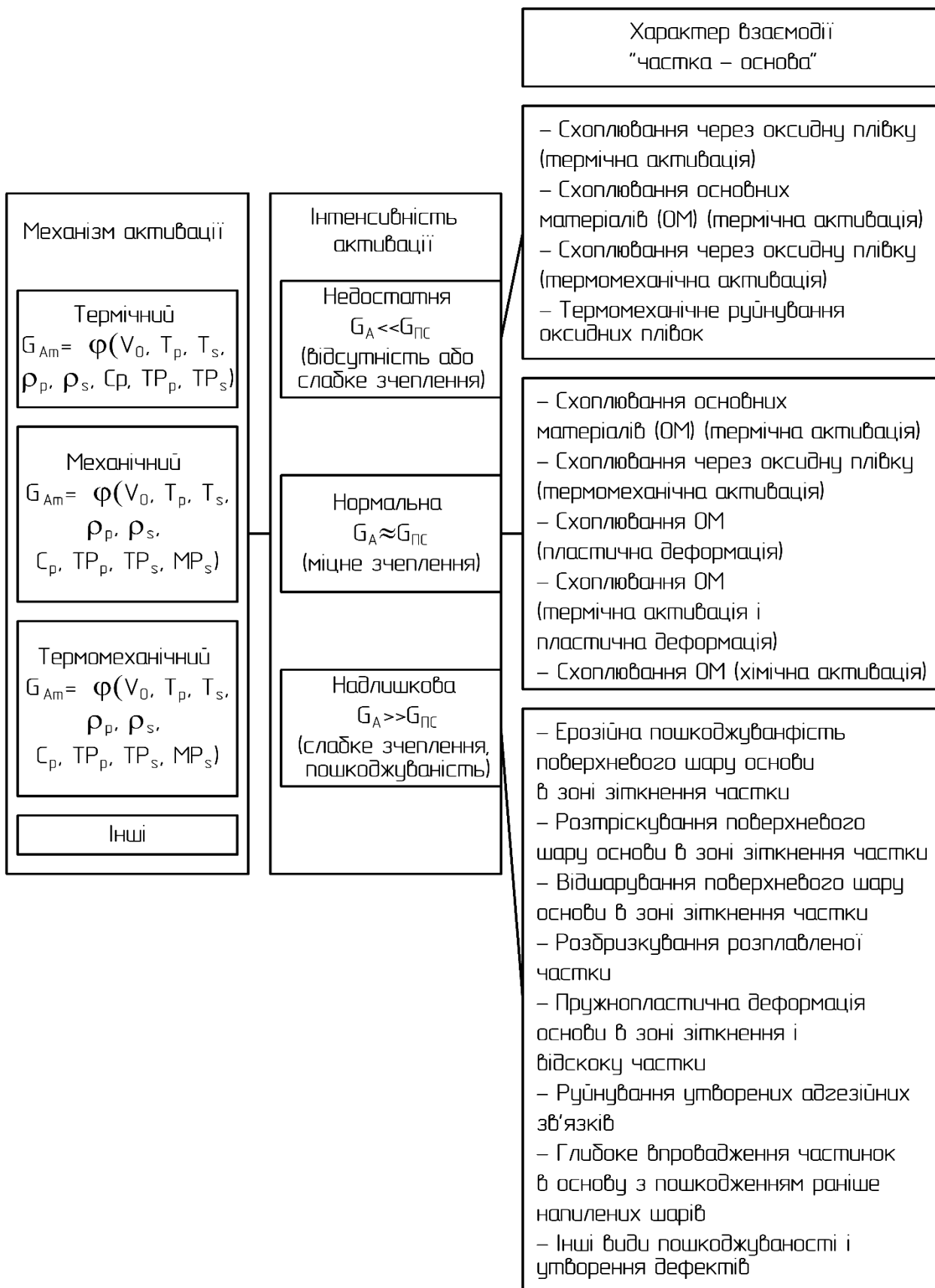


Рис. 1. Вплив інтенсивності активування на характер взаємодії напилених частинок з поверхнею основи

Всі види структурних змін і взаємодії контактних поверхонь при великих зовнішніх відмінностях мають єдину природу, обумовлену енергетикою активування і пасивації матеріалів (рис. 1). Інтенсивність активування

$G_A = \varphi(V_0, T_p, T_s, \rho_p, \rho_s, C_p, TP_p, TP_s, MP_s)$, де V_0 – швидкість частинок T_p, T_s – відповідно температура частинок і основи; ρ_p, ρ_s – щільність матеріалів частинок та основи відповідно; C_p – середовище; TP_p, TP_s – теплофізичні властивості матеріалів покриття та основи (поверхневого шару) відповідно; MP_s – механічні властивості матеріалу основи (поверхневого шару).

Можна виділити три основні групи реакцій пасивації поверхневих шарів матеріалів: утворення хімічних зв'язків між контактуючими матеріалами; внутрішня перебудова структури поверхневих шарів; взаємодія з активними елементами навколишнього середовища.

Нормальні процеси взаємодії частинок з основою характеризуються тим, що активація поверхонь полягає в розриві міжатомних зв'язків метал – кисень в оксиді або комплекси хімічної адсорбції та утворення на взаємодіючих поверхнях атомів з ненасиченими зв'язками, а пасивація – утворення міжатомних зв'язків між матеріалами частинки та основи. Явища слабкої взаємодії характеризуються або малою кількістю розривів міжатомних зв'язків метал – кисень або рекомбінацією розірваних зв'язків, або насиченням розірваних зв'язків в результаті взаємодії з навколишнім середовищем.

Пасивація протікає як на поверхнях контакту деталі з часткою, так і на їх вільних поверхнях. При взаємодії активованих поверхневих шарів металу з активними елементами навколишнього високотемпературного середовища можуть утворюватися найтонші однофазні або гетерофазні об'єкти. Для уникнення цього процеси нанесення покриттів здійснюються в вакуумі або захисному середовищі. Видалення оксидної плівки між покриттям і основою проводять подальшою лазерною обробкою, а також вводять в покриття розкислюючі елементи [20].

Необхідною умовою нормалізації процесів взаємодії частинок з деталлю є такф динамічна рівновага процесів активування і пасивування, при якому ефективна енергія активації знаходиться в межах значень енергії, необхідної для утворення міцних зв'язків, тобто $G_{Aef} = G_{ПС}$.

При нормальній взаємодії частинок з деталлю переважно структурне активування обумовлює стійкі механохімічні процеси. Переважно термічне активування обумовлює стійкі термохімічні процеси. Структурна і термічна активація при зіткненні частинок з основою відбуваються одночасно, проте в певних діапазонах умов зіткнення може проявлятися переважний вплив структурної або термічної активації.

Взаємозв'язок між різними процесами взаємодії частинок з основою ілюструється наявністю критичних точок переходу від нормальних процесів до явищ пошкоджуваності або слабкої взаємодії, існуванням граничних значень V_0, T_p, T_s концентрації активних елементів середовища, критичних значень механічних і теплофізичних властивостей взаємодіючих матеріалів. Запропоновано фізичні моделі процесів утворення з'єднання між частинками та основою (рис. 2), що описують незворотні процеси перетворення теплової та кінетичної енергії частинок в енергію внутрішніх процесів системи PS за різними механізмами.

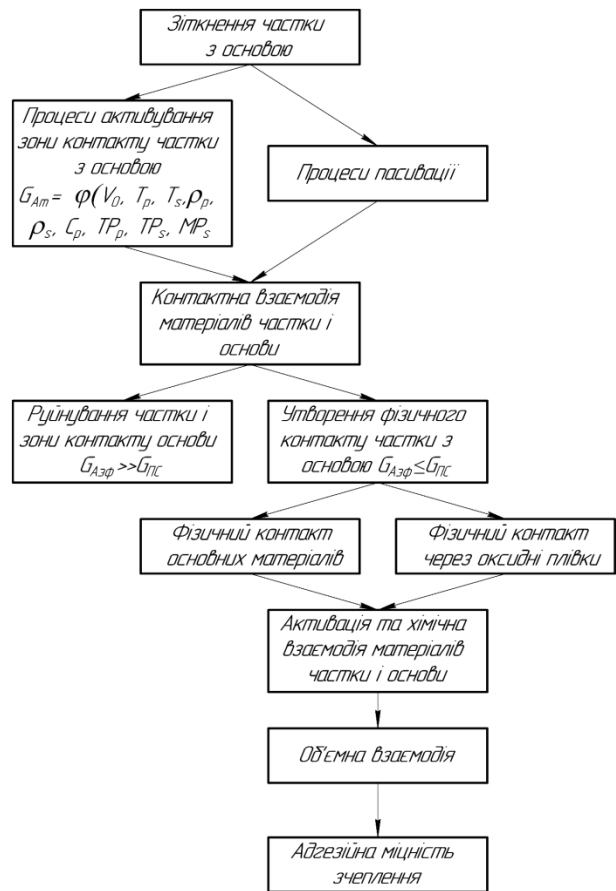


Рис. 2. Фізичні моделі процесів утворення з'єднання напилених частинок з поверхнею деталі

Сутність загальної закономірності формування ГТП полягає в наступному. Для певних поєднань матеріалів і робочих середовищ існують діапазони температури основи та частинок і швидкості їх зіткнення, в межах яких показники покриттів, що формуються (адгезійна $\sigma_{адг.}$ і когезійна $\sigma_{ког.}$ міцність, коефіцієнт використання порошку та ін.) стійкі та значно вищі, ніж поза цими діапазонами (рис. 3). Границі цих діапазонів (область III) визначаються критичними значеннями енергії активації та пасивації, відповідними умовами утворення фізичного контакту, утворення вторинних структур (ВС), їх ви-

явлення визначає постановку завдань по оптимізації технологічних процесів отримання ГТП.

Фізичним механізмом загальної закономірності може служити універсальне явище структурно-енергетичної адаптації матеріалів (СЕА) [21]. Мінімальні принципи СЕА проявляються в мінімізації ефективного обсягу всіх видів взаємодії частинок з основою при первинному зіткненні та з навколишнім середовищем. Це проявляється в локалізації взаємодії матеріалів в тонких поверхневих шарах і здійснюється, наприклад, при переході від макропластичної деформації шляхом проникнення частинок в основу до її інтенсивного розтікання та інтенсивної термічної й механічної активації поверхні основи на більшій площі контакту. Мінімальною повинна бути інтенсивність взаємодії активних центрів, що утворюються (або ювенільних ділянок) з навколишнім газовим середовищем. Об'єктом руйнування при взаємодії частинок з основою є вторинні структури у вигляді тонких плівок на поверхнях контакту. Умовою утворення міцного з'єднання є мінімізація товщини і міцності плівок вторинних структур.

Проблема моделювання схоплювання частки з поверхнею деталі є однією з основних в теорії та практиці ГТН. Досить докладний аналіз її міститься в роботах [7, 17, 19, 24]. Хімічна взаємодія між контактуючими матеріалами можлива за умови розриву зв'язків метал – кисень ($Me - O$) з боку кожної поверхні та видаленні із зони з'єднання кисню. Мож-

ливими каналами активації, що приводять до розриву міжатомних зв'язків в системі ($Me - O$), є [22]: 1) термічний; 2) механічний; 3) канал, пов'язаний з вивільненням енергії при виході на поверхню в результаті пластичної деформації структурних дефектів типу дислокацій, вакансій, міжвузлових атомів; 4) хімічна активація (взаємодія шару оксиду або хімічно адсорбованого кисню з будь-якою речовиною за механізмом відновної реакції).

Для утворення з'єднання потрібно: 1) накопичення розривів зв'язків у системі ($Me - O$) [23]; 2) одночасне синхронне накопичення зв'язків між атомами металів, що сполучаються. Ці необхідні вимоги накладають певні умови на властивості оточення флукуаційно утворившого зв'язку. Для збереження розривів в комплексі ($Me - O$) потрібно, очевидно, щоб у навколишній його області пройшла помітна деформація і роз'єднані атоми залишилися б в розведеному стані. Акти розривів зв'язків повинні супроводжуватися деформуванням навколишньої області, інакше термофлукуаційний процес руйнування зв'язків в комплексі ($Me - O$) не розвиватиметься. Синхронно слідом за розривом зв'язків ($Me - O$) і видаленням кисню із зони з'єднання повинно відбутися утворення зв'язків між атомами, що з'єднуються, що може здійснитися також тільки шляхом деформування навколишніх областей.

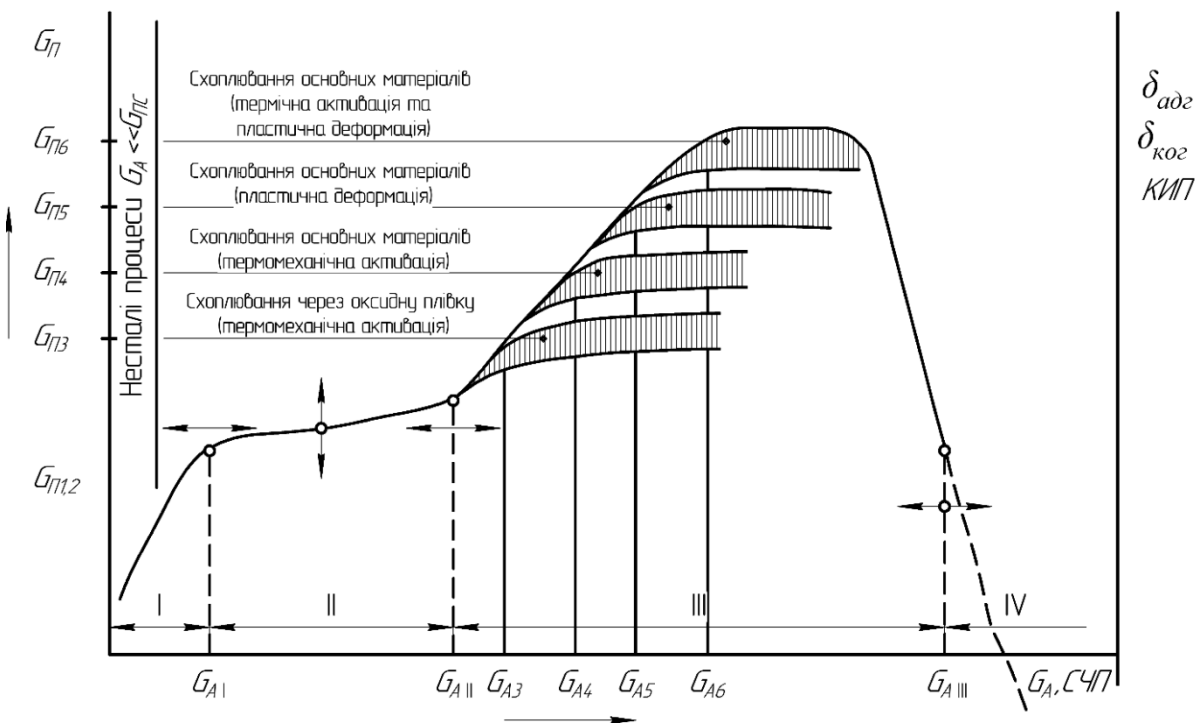


Рис. 3. Характерні діапазони енергії активування поверхні основи:

I – дуже низька, відсутність взаємодії між часткою та основою; II – низька, слабка взаємодія; III – оптимальна, нормальна взаємодія; IV – надмірно висока, явища пошкоджуваності

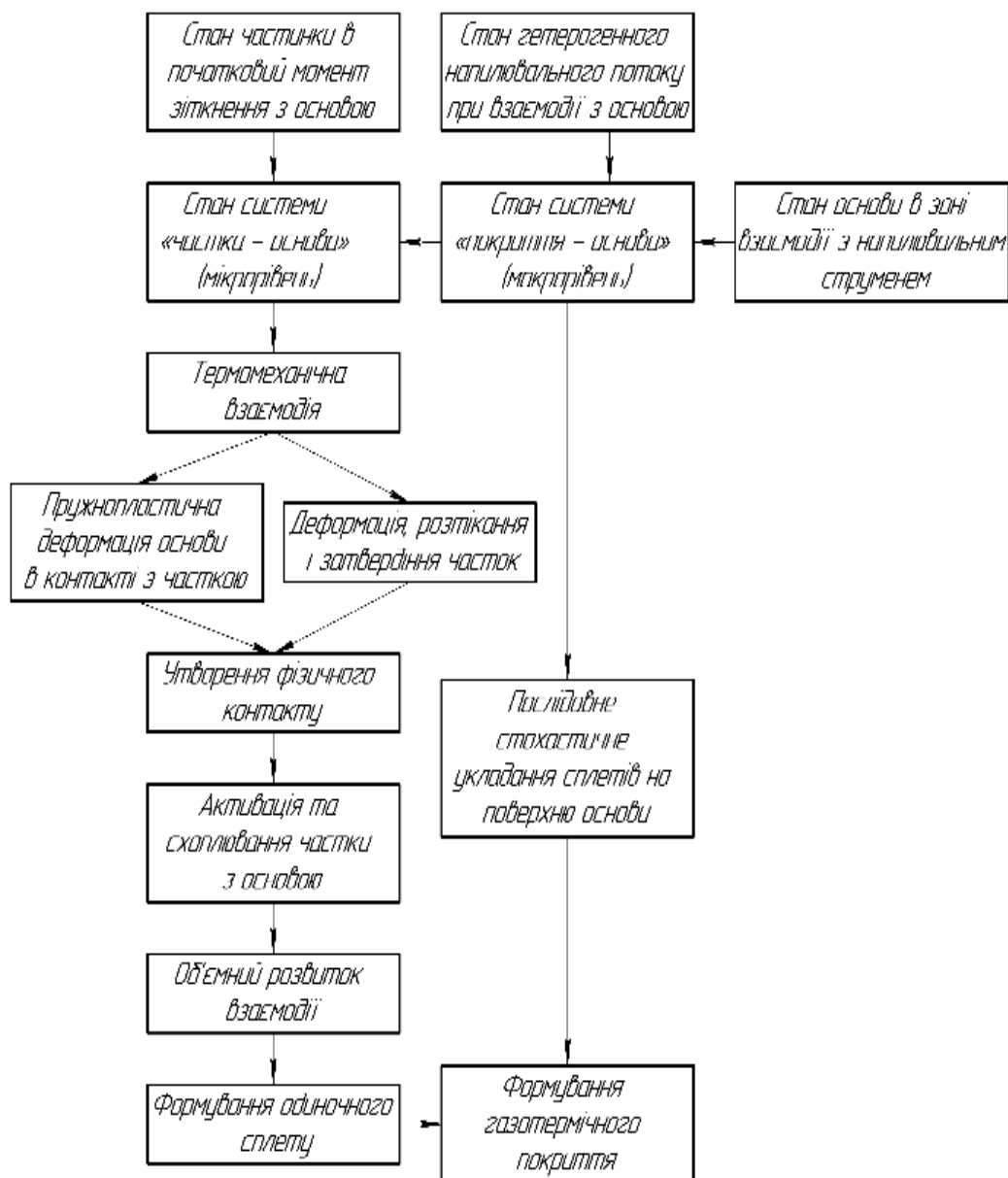


Рис. 4. Моделювання процесів формування газотермічних покриттів на різних масштабних рівнях

Деформаційні процеси можуть брати участь: 1) в розвитку руйнування комплексу (Me – O), не тільки запобігаючи актам рекомбінації, а й передуючи актам розриву зв'язків, сприяючи їх розвантаженню (розтягуванню); 2) в розвитку утворення сполуки (Me – Me), не тільки запобігаючи актам рекомбінації комплексу (Me – O), але і передуючи актам утворення зв'язків в комплексі (Me – Me), сприяючи їх завантаженню.

Основні етапи моделювання. Елементарним актом формування газотермічних покриттів є осадження одиничних сплетів в результаті зіткнення і розтікання на поверхні основи напилюваних частинок. Послідовним осадженням сплетів при відносному переміщенні напилювального струменя відносно виробів формують покриття необхідної товщини на поверхнях. Зазвичай товщина ГТП в межах 0,1 ... 0,6 мм. Багаторазовість елементарних актів оса-

дження сплетів є основною особливістю формування ГТП на відміну від процесів зварювання у твердій фазі. Після осадження сплетів їх знову утворена поверхня контактує з подальшими напиленими частинками. Характеристики поверхонь осаджених сплетів (геометрія, теплофізичні, механічні та ін.) залежать від історії процесів їх осадження і безперервно змінюються в міру формування покриття. Це, а також полідисперсність і розкид у властивостях напилюваного порошку, істотно ускладнюють процеси моделювання формування ГТП. Схема основних етапів моделювання процесів формування газотермічних покриттів представлена на рис. 4.

Кінцевою метою моделювання є забезпечення необхідних функціональних характеристик ГТП: адгезійної та когезійної міцності; мікро- і макропористі; мікро-, мезо-, макроструктури та фазового складу; внутрішніх границь розділу (міжфазні та струк-

турні) в об'ємі покриття; залишкові напруги в покриттях, основному матеріалі виробу та на їх границі розділу; геометричних характеристик напиляного покриття та ін. Одночасне задоволення покриттям декільком перерахованим характеристикам може істотно обмежити використання ряду технологій і способів ГТН, того чи іншого обладнання. Багато інших функціональних характеристик покриттів є похідними від перерахованих вище, а також тою чи іншою мірою успадковують властивості вихідних матеріалів (покриття та основи). Це такі властивості, як теплопровідність, газопроникність, електропровідність, твердість і мікротвердість, оптичні властивості, термостабільність, стійкість до різних видів зношування і корозії та ін.

Постановка наскрізного комплексного моделювання процесів формування ГТП зараз навряд чи можлива. Тому постановка моделювання на різних рівнях представляється раціональною.

При моделюванні на мікрорівні слід розглядати можливість зіткнення часток з поверхнею основи по різноманітним сценаріям, що залежать від властивостей матеріалів основи та частинок, стану частинок, умов зіткнення та ін.

Фізична природа утворення шаруватої структури при формуванні ГТП з дископодібних сплетів пов'язана з послідовним осадженням прискорених і нагрітих в напилювальному струмені частинок вихідного матеріалу до рідкого або пластичного стану, які при зіткненні з поверхнею деформуються і набувають дископодібну форму.

Залежно від властивості напилюваного матеріалу, дисперсності частинок і режиму наплення ступінь деформації частинок і кількість мікропорожнеч може значно змінюватися, викликаючи суттєві зміни структури та властивостей покриттів. Специфічна структура покриттів з явно вираженою шаруватістю і дископодібною формою утворюючих частинок (сплетів) отримала назву мезоструктурно-впорядкованої, а покриття з такою структурою – мезоструктурно-впорядкованих покриттів [2]. Кількісною характеристикою такої мезоструктурної впорядкованості використовують коефіцієнт мезоструктурної впорядкованості покриття, який визначається як відношення середнього характерного розміру дископодібного сплета в паралельному напрямку відносно поверхні основи до його середній товщини $\chi = D_k / h_k$.

Можливі варіанти зіткнення розглядалися раніше [6, 7, 14, 16 – 19, 22]. Однак до теперішнього часу вивчена обмежена кількість можливих сценаріїв зіткнення частинок з поверхнею основи. До стабільного формування сплетів, а тим самим забезпечення необхідного комплексу властивостей ГТП, пред'являються наступні основні вимоги: 1) геометричні параметри (стабільні розміри або безрозмірні значення товщини та діаметра, форми сплетів в межах плями наплення); 2) температурно-часовий режим формування (безрозмірний або розмірний час формування сплетів в заданих межах, те-

рмічний цикл зони контакту, швидкість охолодження, щільність потужності теплового потоку в основу); 3) матеріалознавчі вимоги (отримання необхідного фазового складу, ступеня кристалічності або евтектики, обмеження на міждендритну відстань для осей 1-го і 2-го порядку, забезпечення заданого рівня кристалічності, умова на швидкість охолодження сплета після його формування, умова на забезпечення міцності зчеплення сплета з основою, рівень залишкових термічних напружень в сплеті, забезпечення умов протікання необхідних поліморфних перетворень при формуванні сплета та ін.)

Вимагають подальшого розвитку підходи до аналізу моделювання: зіткнення частинок з поверхнею основи [25, 26]; різноманітних схем теплообміну в системі частинка – основа з урахуванням теплофізичних властивостей їх матеріалів [27 – 29]; впливу швидкості удару частинок на теплообмін і кристалізацію [30 – 40]; ролі напружень в контактній частинці – основа при зіткненні [41 – 44]; зіткнення з раніше осадженими сплетами [45]; самоочищення поверхні основи в зоні контакту з частинками, що співударяються [46, 47]; явищ схоплювання між сплетами та поверхнею основи [48 – 53]; ролі пластичної деформації при формуванні ГТП [54 – 57]; ролі мікрорельєфу поверхні основи та властивостей поверхневого її шару на взаємодію з напилюваними частинками [44, 58]; зміна умов формування контакту частинка – основа, теплообміну і параметрів зіткнення у міру нарощування шару покриття та ін.

На другому етапі моделювання на макрорівні розглядається формування шарів ГТП в міру осадження і нашарування сплетів. Моделювання формування шаруватої структури ГТП пошаровим укладанням окремих сплетів дозволяє прогнозувати комплекс властивостей ГТП. Поки наявні підходи дозволяють розраховувати пористість, шорсткість, відносну міцність зчеплення з основою [3, 59, 60]. Потрібен подальший розвиток робіт з побудови комплексних математичних моделей технологічних процесів газотермічного наплення покриттів [61]. Моделі, що розробляються повинні враховувати вплив основних технологічних параметрів на властивості покриттів, в тому числі матеріалознавчих. Ці моделі повинні враховувати: зміну мікрорельєфу, властивостей поверхневого шару та умов теплообміну і зіткнення частинок з поверхнею основи у міру нарощування шару покриття; оцінку можливого взаємного впливу напилюваних частинок на їх взаємодію з поверхнею основи та формування покриттів [62 – 64]; ролі основних фізико-хімічних явищ, що протікають при формуванні ГТП [65], а також вплив основних технологічних параметрів, наприклад, швидкості відносного переміщення напилювального струменя відносно виробів [66], конструктивно-технологічні параметри операцій газотермічного наплення та ін. Особливий інтерес представляє розвиток багаторівневого підходу до аналізу структури ГТП і процесів їх формування [67 – 70].

Висновки. 1. Недостатня вивченість процесів газотермічного напилення обумовлює необхідність для отримання газотермічних покриттів із заданими властивостями проведення великого комплексу витратних по трудо-, матеріало- та енергомісткості експериментів по підборі оптимальних технологічних параметрів. Ці витрати можуть бути істотно скорочені при використанні методів математичного моделювання.

2. У технологічних схемах газотермічного напилення найбільшу складність представляє моделювання процесів формування покриттів, що визначають остаточні властивості напилюваних покриттів.

3. Розробку методів моделювання процесів формування газотермічних покриттів слід здійснювати на двох рівнях – формування одиничних сплетів (мікрорівень) і формування шару покриття послідовним осадженням одиничних сплетів (макрорівень).

4. Формування одиничних сплетів є елементарним комплексним актом формування шарів покриття і супроводжується протіканням різноманітних фізико-хімічних явищ. Залежно від інтенсивності активування зони контакту частинки з поверхнею основи різноманіття їх видів взаємодії можна розділити на нормальні, що протікають при слабкій (недостатній) і зайвій активації.

Л і т е р а т у р а

- Handbook of Thermal Spray Technology, edited by J.R. Davis. Ohio: ASM International. 2004. 347 p.
- Математическое моделирование процесса формирования мезоструктурноупорядоченных плазменных покрытий. В.И. Богданович, В.А. Барвинок, И.А. Докукина, В.Г. Небога. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 13, № 4 (2), 2011. С.313 – 321.
- Солоненко О.П., Бледнов В.А., Иордан В.И. Компьютерное проектирование газотермических покрытий из порошков металлов. Теплофизика и аэромеханика, 2011, том 18, № 2. С.265 – 283.
- Солоненко О.П., А.В. Перфильев, Смирнов А.В. Растекание и затвердевание капель металлических расплавов в условиях подплавления подложки. Теория и модельный эксперимент. Письма в ЖТФ, 2013, том 39, вып. 20. С.63-69.
- Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники. В 3-х т. Том 1. А.П. Достанко, С.П. Кундас, М.Н. Босяков и др. Под общ. Ред. А.П. Достанко. Минск: ФУАинформ, 2000. 424 с.
- Харламов Ю.А. Классификация видов взаимодействия частиц с подложкой при нанесении покрытий // Порошковая металлургия, 1988, № 1. С.18 – 22.
- Шоршоров М.Х., Харламов Ю.А. Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий. М.: Наука. 1978. 224 с.
- Харламов Ю.А. Очистка подложек от поверхностных пленок в процессе напыления порошков. Порошковая металлургия. 1983. N 11. С.41 – 47.
- Харламов Ю.А., Хасан М.С., Андерсон Р.Н. Электронно-микроскопическое исследование частиц порошка, напыленных на твердую поверхность. Порошковая металлургия. 1979. N 12. С.40 – 45.
- Kharlamov Y.A., Hassan M.S., Anderson R.N. Cleaning and Surface Preparation Technology and Other Factors Related to Coatings Produced by Flame Spraying. Surface Contamination. Genesis, Detection and Control. Vol. 1. Edited by K.L.Mittal. New York: Plenum Press. 1977. p. 407 – 441.
- Харламов Ю.А., Хасан М.С., Андерсон Р.Н. Взаимодействие напыляемых частиц порошка алюминия и вольфрама с подложкой, имеющей тонкое покрытие. Порошковая металлургия. 1980. N 6. С. 96-102.
- Харламов Ю.А., Хасан М.С. Поведение окисной пленки на монокристаллическом кремнии при плазменном напылении порошками никеля и алюминия. Электронная обработка материалов. 1981. N 4. С. 33 – 35.
- Харламов Ю.А. Самоочищение поверхности подложек при газотермическом напылении. Теория и практика газотермического нанесения покрытий. Т. 1. Дмитров, 1983. С.41 – 47.
- Харламов Ю.А. Физико-химические явления при получении детонационно-газовых покрытий. Температуроустойчивые покрытия. Л. Наука, 1985. С. 119 – 123.
- Харламов Ю.А. Роль термического и скоростного факторов при газотермическом нанесении покрытий. Материалы современной техники. Межвуз. сб. научн. трудов. Пермь. ППИ, 1986. С. 112 – 117.
- Харламов Ю.А. Процессы соударения частиц с поверхностью детали при газо-термическом нанесении покрытий. Известия Сиб. отд. АН СССР. Сер. техн. наук, 1988, № 11, вып.3. С. 71 – 80.
- Формирование газотермических покрытий при производстве деталей. С.А. Клименко, Л.Г. Полонский, М.Ю. Харламов, Ю.А. Харламов, П.А. Витязь, В.С. Ивашко, М.Л. Хейфец, С.А. Чижик; под общ. Ред. Ю.А. Харламова и М.Л. Хейфеца. Минск. Беларуская навука, 2020. 416 с.
- Харламов Ю.А. Удар частиц при детонационно-газовом напылении. Северодонецк: изд-во СНУ ім. В. Даля. 2018. 144 с.
- Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. М. Металлургия, 1992. 432 с.
- Бохан С.Г., Василенко А.Г., Гречихин Л.И. Расчет некоторых параметров физико-химических процессов образования и разрушения окисных пленок на подложке при газотермическом напылении. Теория и практика газотермического нанесения покрытий. Т.1. Тез.докл. X Всес. совещ., июнь 1985. Дмитров, 1985. С.66 – 70.
- Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. М. Мир, 1979. 274 с.
- Черноиванов В.И., Каракозов Э.С. Физико-химические процессы образования соединения при напылении порошковых материалов. Сварочное производство, 1984. N 1, С. 2 – 5. N 2, С. 10 – 14. N3, С. 29 – 31.
- Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М. Наука, 1974. 560 с.
- Харламов Ю.А. Кинетика схватывания частиц порошка с поверхностью детали при газотермическом нанесении покрытий. Порошковая металлургия, 1989. № 3. С.50 – 54.
- Харламов Ю.А. Моделирование соударения частиц с поверхностью при газо-термическом нанесении покрытий. Ворошиловградский машиностр. ин-т, Ворошиловград, 1986. 74 с. Рукопись, деп. в УкрНИИТИ 30.10.86 № 2437 – Укр86.

26. Харламов Ю.А. Моделирование взаимодействия напыляемых частиц с основой: 1. Особенности системного подхода. Вісник Східноукраїнського національного університету, 2000. № 10 (32). С. 14 – 20.
27. Харламов Ю.А. Особенности тепловых расчетов при газотермическом нанесении покрытий. Сварочное производство, 1988, № 9. С. 30 – 32.
28. Харламов Ю.А. Контактный теплообмен при растекании расплавленных частиц на твердой поверхности // Физика и химия обработки материалов, 1990. № 6. С. 86 – 89.
29. Харламов Ю.А., Будагьянц Н.А., Шевченко А.В. Влияние перегрева жидких частиц на формирование газотермических покрытий. Вісник Східноукраїнського національного університету, 2001. № 11 (45). С. 90 – 95.
30. Харламов Ю.А. Влияние скорости частиц на их кристаллизацию при газотермическом напылении. Газотермическое напыление в промышленности. Л., 1991. С. 21 – 22.
31. Харламов Ю.А. Влияние скорости и температуры частиц на динамику и теплофизику их взаимодействия с поверхностью детали при газотермическом нанесении покрытий. Теоретич. и эксп. проблемы взаимодействия частиц с поверхностью. Киев: Ин-т сверхтв. материалов, 1988. С. 25 – 33.
32. Харламов Ю.А. Термическое взаимодействие частиц с подложкой с учетом скорости их соударения при газотермическом напылении. Известия вузов. Машиностроение, 1982, № 1. С. 152 – 156.
33. Харламов Ю.А. О роли скорости и температуры частиц при газотермическом напылении. Физика и химия обработки материалов, 1983. № 3. С. 69 – 73.
34. Харламов Ю.А. Роль термического и скоростного факторов при газотермическом нанесении покрытий. Материалы современной техники. Межвуз. сб. научн. трудов. Пермь: ППИ, 1986. С. 112 – 117.
35. Харламов Ю.А. Влияние скорости соударения на термический цикл в контакте между расплавленной частицей и поверхностью твердого тела. Физика и химия обработки материалов, 1987, № 6. С. 82 – 87.
36. Харламов Ю.А. Процессы соударения частиц с поверхностью детали при газо-термическом нанесении покрытий. Известия Сиб. отд. АН СССР. Сер. техн. наук, 1988, № 11, вып. 3. С. 71 – 80.
37. Харламов Ю.А. Динамика соударения частиц с подложкой при газотермическом нанесении покрытий. Газотермические способы нанесения защитных покрытий: Сб. научн. трудов Моск. авиац. технол. ин-та. Челябинск, 1986. С. 26 – 37.
38. Харламов Ю.А. О моделировании процесса соударения частиц с поверхностью при газотермическом нанесении покрытий. Физика и химия обработки материалов. 1990. № 4. С. 84 – 89.
39. Харламов Ю.А. Влияние скорости частиц на их кристаллизацию при газотермическом напылении. Газотермическое напыление в промышленности. Л. 1991. С. 21 – 22.
40. Харламов Ю.А. Влияние скорости капель в момент удара о твердую поверхность на их кристаллизацию. Порошковая металлургия, 1991. № 8. С. 23 – 30.
41. Харламов Ю.А. Напряжения на поверхности детали при соударении с расплавленной частицей. Физика и химия обработки материалов, 1990. № 6. С. 80 – 85.
42. Харламов Ю.А. Допустимая скорость частиц при газотермическом нанесении покрытий. Сварочное производство, 1989. № 8. С. 35 – 37.
43. Харламов Ю.А. Формирование покрытий при высокотемпературном газотермическом напылении. Температуроустойчивые функциональные покрытия. Труды XVII Совещания по температуроустойчивым функциональным покрытиям. Часть I. Пленарные доклады. Санкт-Петербург, 1997. С. 180 – 187.
44. Харламов Ю.А., Борисов Ю.С. Влияние микрорельефа поверхности на прочность сцепления с газотермическими покрытиями // Автоматическая сварка, 2001. № 6. С. 19 – 26.
45. Харламов Ю.А., Хасан М.С., Андерсон Р.Н. Взаимодействие напыляемых частиц порошка алюминия с подложкой, имеющей тонкое покрытие. Порошковая металлургия, 1980, № 6. С. 96 – 102.
46. Харламов Ю.А. Самоочищение поверхности подложек при газотермическом напылении. Теория и практика газотермического нанесения покрытий. Т.1. Дмитров, 1983. С. 41 – 47.
47. Харламов Ю.А., Харламов М.Ю. Влияние процессов адсорбции на формирование газотермических покрытий. Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 14-й Международной научно-технической конференции, 02 – 06 июня 2014 г., г. Свалява. Киев. АТМ Украины, 2014. С. 144 – 146.
48. Харламов Ю.А. Физические основы образования соединения частиц с поверхностью детали при газотермическом нанесении покрытий. Ворошиловградский машиностр. ин-т, Ворошиловград, 1987. 149 с. Рукопись, деп. в УкрНИИНТИ 30.012.87. № 3361 – Укр87.
49. Харламов Ю.А. Кинетика схватывания частиц порошка с поверхностью детали при газотермическом нанесении покрытий // Порошковая металлургия, 1989. № 3. С. 50 – 54.
50. Харламов Ю.А. Факторы, влияющие на адгезионную прочность газотермических покрытий. Защитные покрытия на металлах. Вып. 22. Киев: Наукова думка, 1988. С. 30 – 34.
51. Харламов Ю.А. Об условиях получения прочных газотермических покрытий. Теория и практика газотермического нанесения покрытий: Тез. докл. XI Всес. конф. сентябрь 1988 г., Т.1. Дмитров. С. 1 – 6.
52. Харламов Ю.А., Лившиц М.И., Омельченко В.В. Влияние твердости стальных деталей на прочность сцепления детонационно-газовых покрытий. Сварочное производство. 1990. № 10. С. 20 – 23.
53. Харламов Ю.А. Влияние скорости охлаждения напыляемых частиц на схватывание с основой. Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. пр. Луганськ, Вид-цтво СНУ ім. В. Даля, 2002. С. 131 – 139.
54. Харламов Ю.А. Термическое взаимодействие твердых частиц с деталью с учетом пластической деформации при газотермическом нанесении покрытий. Физика и химия обработки материалов. 1988, № 4. С. 73 – 78.
55. Харламов Ю.А. Экспериментальное исследование пластической деформации при детонационном напылении. Порошковая металлургия. 1988, № 10. С. 70 – 77.
56. Харламов Ю.А. Механизм пластической деформации при формировании газо-термических покрытий. Порошковая металлургия. 1988, № 12. С. 31 – 37.
57. Оценка возможности пластической деформации при газотермическом напылении. Ю.А. Харламов, С.А. Юдицкий, М.Ю. Харламов, А.В. Шевченко. Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. пр. Луганськ, Вид-цтво СНУ, 2001. С. 120 – 127.

58. Харламов Ю.А. Выбор оптимального микрорельефа поверхности для газотермического нанесения покрытий. Газотермическое напыление в промышленности. Л. 1991. С.12 – 13.
59. Харламов Ю.А. Прогнозирование пористости порошковых покрытий. Порошковая металлургия. 1990. № 12. С.36 – 41.
60. Харламов Ю.А. Расчет пористости газотермических покрытий. Редакция журнала «Автоматическая сварка». Киев, 1989. 12 с. Деп. в ВИНТИ 29.03.89. № 2061-В89.
61. Харламов Ю.А., Харламов М.Ю. Построение математических моделей технологических процессов газотермического напыления покрытий. Вісник Східноукраїнського державного університету. 1999. № 3 (18). С.211 – 219.
62. Харламов Ю.А., Шоршоров М.Х. Условия взаимного влияния напыляемых частиц на формирование покрытий. Физика и химия обработки материалов. 1977, № 3. С. 68 – 74.
63. Харламов Ю.А. Влияние напыляемых частиц на формирование детонационных покрытий. Диффузионное насыщение и покрытия на металлах. Киев. Наукова думка. 1977. С. 77 – 80.
64. Харламов Ю.А. Влияние физического состояния подложки и параметров потока напыляемых частиц на формирование покрытий. Теория и практика газотермического нанесения покрытий. Тез. докл. VII Совещания. Дмитров. 1978. С.79 – 82.
65. Харламов Ю.А. Физико-химические и технологические проблемы детонационно-газового напыления покрытий. Физика и химия обработки материалов. 1986, № 1. С. 74 – 81.
66. Влияние скорости перемещения напыляемой поверхности на качество детонационно-газовых покрытий. Ю.А. Харламов, Лившиц М.И., М.Х. Шоршоров, Э.Н. Капустян. Порошковая металлургия. 1981. № 2. С. 34 – 37.
67. Харламов Ю.А. Системный подход к анализу структуры газотермических покрытий. Теория и практика газотермического нанесения покрытий: Тез. докл. XII научно-техн. конф. февраль 1992 г., Т. 1. Дмитров, 1992. С. 10 – 15.
68. Харламов Ю.А. Принципы получения и управления структурой и свойствами детонационно-газовых покрытий. Напыление и покрытия-95. Тез. докл. междунаучно-техн. конф. СПб, 1995. С.10 – 13.
69. Kharlamov Y.A., Chattha J.A., Kharlamov M.Y., Fazli Rahman. The structure levels of thermal sprayed coatings and their use for properties (coatings) control. Proceedings of First International Conference on Frontiers of Advanced Engineering Materials (FAEM-04). 2005, Ch. M. Boota Printers, Lahore, PCSIR Labs Complex, Lahore-Pakistan. P.436 – 446.
70. Харламов Ю.А., Харламов М.Ю. Структурный подход к анализу износостойких покрытий. Вісник Східноукраїнського національного університету. 2000. № 11 (33). С. 130 – 139.
3. Solonenko O.P., Blednov V.A., Iordan V.I. Komp'juternoe proektirovanie gazotermicheskikh pokrytij iz poroshkov metallov. Teplofizika i aeromehanika, 2011, tom 18, № 2. С.265 – 283.
4. Solonenko O.P., A.V. Perfil'ev, Smirnov A.V. Rastekanie i zatverdevanie kapel' metallicheskih rasplavov v usloviyah podplavlenija podlozhki. Teorija i model'nyj jeksperiment. Pis'ma v ZhTF, 2013, tom 39, vyp. 20. S.63-69.
5. Plazmennye processy v proizvodstve izdelij jelektronnoj tehniki. V 3-h t. Tom 1. A.P. Dostanko, S.P. Kundas, M.N. Bosjakov i dr. Pod obshh. Red. A.P. Dostanko. Minsk: FUAinform, 2000. 424 s.
6. Harlamov Ju.A. Klassifikacija vidov vzaimodejstvija chastic s podlozhkoj pri nanesenii pokrytij // Poroshkovaja metallurgija, 1988, № 1. S.18 – 22.
7. Shorshorov M.H., Harlamov Ju.A. Fiziko-himicheskie osnovy detonacionno-gazovogo napylenija pokrytij. M.: Nauka. 1978. 224 s.
8. Harlamov Ju.A. Ochistka podlozhek ot poverhnostnyh plenok v processe napylenija poroshkov. Poroshkovaja metallurgija. 1983. N 11. S.41 – 47.
9. Harlamov Ju.A., Hasan M.S., Anderson R.N. Jelektronnomikroskopicheskoe issledovanie chastic poroshka, napylenyh na tverduju poverhnost'. Poroshkovaja metallurgija. 1979. N 12. S.40 – 45.
10. Kharlamov Y.A., Hassan M.S., Anderson R.N. Cleaning and Surface Preparation Technology and Other Factors Related to Coatings Produced by Flame Spraying. Surface Contamination. Genesis, Detection and Control. Vol. 1. Edited by K.L.Mittal. New York: Plenum Press. 1977. p. 407 – 441.
11. Harlamov Ju.A., Hasan M.S., Anderson R.N. Vzaimodejstvie napyljaemyh chastic poroshka aljuminija i vol'frama s podlozhkoj, imejushhej tonкое pokrytie. Poroshkovaja metallurgija. 1980. N 6. S. 96-102.
12. Harlamov Ju.A., Hasan M.S. Povedenie okisnoj plenki na monokristallicheskom kremnii pri plazmennom napylenii poroshkami nikelja i aljuminija. Jelektronnaja obrabotka materialov. 1981. N 4. S. 33 – 35.
13. Harlamov Ju.A. Samoochishhenie poverhnosti podlozhek pri gazotermicheskom napylenii. Teorija i praktika gazotermicheskogo nanesenija pokrytij. T. 1. Dmitrov, 1983. S.41 – 47.
14. Harlamov Ju.A. Fiziko-himicheskie javlenija pri poluchenii detonacionno-gazovyh pokrytij. Temperaturoustojchivye pokrytija. L. Nauka, 1985. S. 119 – 123.
15. Harlamov Ju.A. Rol' termicheskogo i skorostnogo faktorov pri gazotermicheskom nanesenii pokrytij. Materialy sovremennoj tehniki. Mezhevuz. sb. nauchn. trudov. Perm?. PPI, 1986. S. 112 – 117.
16. Harlamov Ju.A. Processy soudarenija chastic s poverhnost'ju detali pri gazo-termicheskom nanesenii pokrytij. Izvestija Sib. otd. AN SSSR. Ser. tehn. nauk, 1988, № 11, vyp.3. S. 71 – 80.
17. Formirovanie gazotermicheskikh pokrytij pri proizvodstve detalej. S.A. Klimentko, L.G. Polonskij, M.Ju. Harlamov, Ju.A. Harlamov, P.A. Vitjaz', V.S. Ivashko, M.L. Hejfec, S.A. Chizhik; pod obshh. Red. Ju.A. Harlamova i M.L. Hejfec. Minsk. Belaruskaja navuka, 2020. 416 s.
18. Harlamov Ju.A. Udar chastic pri detonacionno-gazovom napylenii. Severodonec'k: izd-vo SNU im. V. Dalja. 2018. 144 s.
19. Kudinov V.V., Bobrov G.V. Nanesenie pokrytij napyleniem. Teorija, tehnologija i oborudovanie. M. Metallurgija, 1992. 432 s.
20. Bohan S.G., Vasilenko A.G., Grechihin L.I. Raschet nekotoryh parametrov fiziko-himicheskikh processov obrazova-

References

1. Handbook of Thermal Spray Technology, edited by J.R. Davis. Ohio: ASM International. 2004. 347 p.
2. Matematicheskoe modelirovanie processa formirovanija mezostrukturnouporjadochennyh plazmennyh pokrytij. V.I. Bogdanovich, V.A. Barvinok, I.A. Dokukina, V.G. Neboga. Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk, t. 13, № 4 (2), 2011. S.313 – 321.

- nija i razrushenija okisnyh plenok na podlozhke pri gazotermicheskom napylenii. Teorija i praktika gazotermicheskogo nanosenija pokrytij. T.1. Tez.dokl. H Vses. soveshh., ijun' 1985. Dmitrov, 1985. S.66 – 70.
21. Jebeling V. Obrazovanie struktur pri neobratimyh processah. M. Mir, 1979. 274 s.
 22. Chernoi vanov V.I., Karakozov Je.S. Fiziko-himicheskie processy obrazovanija soedinenija pri napylenii poroshkovykh materialov. Svarochnoe proizvodstvo, 1984. N 1, S. 2 – 5. N 2, S. 10 – 14. N3, S. 29 – 31.
 23. Regel' V.R., Slucker A.I., Tomashevskij Je.E. Kineticheskaja priroda prochnosti tverdyh tel. M. Nauka, 1974. 560 s.
 24. Harlamov Ju.A. Kinetika shvatyvvanija chastic poroshka s poverhnost'ju detali pri gazotermicheskom nanosenii pokrytij. Poroshkovaja metallurgija, 1989. № 3. S.50 – 54.
 25. Harlamov Ju.A. Modelirovanie soudarenija chastic s poverhnost'ju pri gazo-termicheskom nanosenii pokrytij. Voroshilovgradskij mashinostr. in-t, Voroshilovgrad, 1986. 74 s. Rukopis', dep. v UkrNIINTI 30.10.86 № 2437 – Ukr86.
 26. Harlamov Ju.A. Modelirovanie vzaimodejstvija napyljaemykh chastic s osnovoj: 1. Osobennosti sistemnogo podhoda. Visnik Shidnoukraïnskogo nacional'nogo universitetu, 2000. № 10 (32). S. 14 – 20.
 27. Harlamov Ju.A. Osobennosti teplovykh raschetov pri gazotermicheskom nanosenii pokrytij. Svarochnoe proizvodstvo. 1988, № 9. S. 30 – 32.
 28. Harlamov Ju.A. Kontaktnyj teploobmen pri rastekanii rasplavlennykh chastic na tverdoj poverhnosti // Fizika i himija obrabotki materialov, 1990. № 6. S.86 – 89.
 29. Harlamov Ju.A., Budag'janc N.A., Shevchenko A.V. Vlijanie peregreva zhidkikh chastic na formirovanie gazotermicheskikh pokrytij. Visnik Shidnoukraïnskogo nacional'nogo universitetu, 2001. № 11 (45). S. 90 – 95.
 30. Harlamov Ju.A. Vlijanie skorosti chastic na ih kristallizaciju pri gazotermicheskom napylenii. Gazotermicheskoe napylenie v promyshlennosti. L., 1991. S.21 – 22.
 31. Harlamov Ju.A. Vlijanie skorosti i temperatury chastic na dinamiku i teplofiziku ih vzaimodejstvija s poverhnost'ju detali pri gazotermicheskom nanosenii pokrytij. Teoretich. i jeksp.problemy vzaimodejstvija chastic s poverhnost'ju. Kiev: In-t sverhtv. materialov, 1988. S.25 – 33.
 32. Harlamov Ju.A. Termicheskoe vzaimodejstvie chastic s podlozhkoj s uchetom skorosti ih soudarenija pri gazotermicheskom napylenii. Izvestija vuzov. Mashinostroenie, 1982, № 1. S.152 – 156.
 33. Harlamov Ju.A. O roli skorosti i temperatury chastic pri gazotermicheskom napylenii. Fizika i himija obrabotki materialov, 1983. № 3. S. 69 – 73.
 34. Harlamov Ju.A. Rol' termicheskogo i skorostnogo faktorov pri gazotermicheskom nanosenii pokrytij. Materialy sovremennoj tehniki. Mezhevuz. sb. nauchn. trudov. Perm': PPI, 1986. S. 112 – 117.
 35. Harlamov Ju.A. Vlijanie skorosti soudarenija na termicheskij cikl v kontakte mezhdru rasplavlennoj chasticej i poverhnost'ju tverdogo tela. Fizika i himija obrabotki materialov, 1987, № 6. S.82 – 87.
 36. Harlamov Ju.A. Processy soudarenija chastic s poverhnost'ju detali pri gazo-termicheskom nanosenii pokrytij. Izvestija Sib. otd. AN SSSR. Ser. tehn. nauk, 1988, № 11, vyp.3. S. 71 – 80.
 37. Harlamov Ju.A. Dinamika soudarenija chastic s podlozhkoj pri gazotermicheskom nanosenii pokrytij. Gazotermicheskie sposoby nanosenija zashitnykh pokrytij: Sb. nauchn. trudov Mosk. aviac. tehnol. in-ta. Cheljabinsk, 1986. S.26 – 37.
 38. Harlamov Ju.A. O modelirovanii processa soudarenija chastic s poverhnost'ju pri gazotermicheskom nanosenii pokrytij. Fizika i himija obrabotki materialov. 1990. № 4. S. 84 – 89.
 39. Harlamov Ju.A. Vlijanie skorosti chastic na ih kristallizaciju pri gazotermicheskom napylenii. Gazotermicheskoe napylenie v promyshlennosti. L. 1991. S. 21 – 22.
 40. Harlamov Ju.A. Vlijanie skorosti kapel' v moment udara o tverduju poverhnost' na ih kristallizaciju. Poroshkovaja metallurgija, 1991. № 8. S.23 – 30.
 41. Harlamov Ju.A. Naprjazhenija na poverhnosti detali pri soudarenii s rasplavlennoj chasticej. Fizika i himija obrabotki materialov, 1990. № 6. S.80 – 85.
 42. Harlamov Ju.A. Dopustimaja skorost' chastic pri gazotermicheskom nanosenii pokrytij. Svarochnoe proizvodstvo, 1989. № 8. S. 35 – 37.
 43. Harlamov Ju.A. Formirovanie pokrytij pri vysokotemperaturnom gazotermicheskom napylenii. Temperaturoustojchivye funkcional'nye pokrytija. Trudy XVII Soveshhanija po temperaturoustojchivym funkcional'nym pokrytijam. Chast' I. Plenarnye doklady. Sankt-Peterburg. 1997. S. 180 – 187.
 44. Harlamov Ju.A., Borisov Ju.S. Vlijanie mikrorel'efa poverhnosti na prochnost' sčepenija s gazotermicheskimi pokrytijami // Avtomaticheskaja svarka, 2001. № 6. S.19 – 26.
 45. Harlamov Ju.A., Hasan M.S., Anderson R.N. Vzaimodejstvie napyljaemykh chastic poroshka aluminija s podlozhkoj, imejushhej tonkoe pokrytie. Poroshkovaja metallurgija, 1980, № 6. S. 96 – 102.
 46. Harlamov Ju.A. Samoochishhenie poverhnosti podlozhek pri gazotermicheskom napylenii. Teorija i praktika gazotermicheskogo nanosenija pokrytij. T.1. Dmitrov, 1983. S.41 – 47.
 47. Harlamov Ju.A., Harlamov M.Ju. Vlijanie processov adsorbicii na formirovanie gazotermicheskikh pokrytij. Inzhenerija poverhnosti i renovacija izdelij: Materialy 14-j Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoi konferencii, 02 – 06 ijunja 2014 g., g. Svaljava. Kiev. ATM Ukrainy, 2014. S. 144 – 146.
 48. Harlamov Ju.A. Fizicheskie osnovy obrazovanija soedinenija chastic s poverhnost'ju detali pri gazotermicheskom nanosenii pokrytij. Voroshilovgradskij mashinostr. in-t, Voroshilovgrad, 1987. 149 s. Rukopis', dep. v UkrNIINTI 30.012.87. № 3361 – Ukr87.
 49. Harlamov Ju.A. Kinetika shvatyvvanija chastic poroshka s poverhnost'ju detali pri gazotermicheskom nanosenii pokrytij // Poroshkovaja metallurgija, 1989. № 3. S.50 – 54.
 50. Harlamov Ju.A. Faktory, vlijajushhie na adgezionnuju prochnost' gazotermicheskikh pokrytij. Zashhitnye pokrytija na metallah. Vyp.22. Kiev: Naukova dumka, 1988. S.30 – 34.
 51. Harlamov Ju.A. Ob uslovijah poluchenija prochnykh gazotermicheskikh pokrytij. Teorija i praktika gazotermicheskogo nanosenija pokrytij: Tez. dokl. XI Vses. konf. sentjabr' 1988 g., T.I. Dmitrov, 1989. S. 1 – 6.
 52. Harlamov Ju.A., Livshic M.I., Omel'chenko V.V. Vlijanie tverdsti stal'nykh detalej na prochnost' sčepenija detonacionno-gazovykh pokrytij. Svarochnoe proizvodstvo. 1990. № 10. S.20 – 23.
 53. Harlamov Ju.A. Vlijanie skorosti ohlazhdenija napyljaemykh chastic na shvatyvvanie s osnovoj. Resursozberigajuchi tehnologii virobniictva ta obrobki tiskom materialiv u mashinobuduvanni: Zb. nauk. pr. Lugans'k, Vidctvo SNU im. V. Dalja, 2002. S. 131 – 139.

54. Harlamov Ju.A. Termicheskoe vzaimodejstvie tverdyh chastic s detal'ju s uchetoм plasticheskoy deformacii pri gazotermicheskom nanesenii pokrytij. Fizika i himija obrabotki materialov. 1988, № 4. S. 73 – 78.
55. Harlamov Ju.A. Jeksperimental'noe issledovanie plasticheskoy deformacii pri detonacionnom napylenii. Poroshkovaja metallurgija. 1988, № 10. S. 70 – 77.
56. Harlamov Ju.A. Mehanizm plasticheskoy deformacii pri formirovanii gazo-termicheskikh pokrytij. Poroshkovaja metallurgija. 1988, № 12. S. 31 – 37.
57. Ocenka vozmozhnosti plasticheskoy deformacii pri gazotermicheskom napylenii. Ju.A. Harlamov, S.A. Judickij, M.Ju. Harlamov, A.V. Shevchenko. Resursozberigajuchi tehnologii virobništva ta obrabotki tiskom materialiv u mashinobuduvanni: Zb. nauk. pr. Lugans'k, Vid-ctvo SNU, 2001. S. 120 – 127.
58. Harlamov Ju.A. Vybor optimal'nogo mikrorel'efa poverhnosti dlja gazotermicheskogo nanesenija pokrytij. Gazotermicheskoe napylenie v promyshlennosti. L. 1991. S.12 – 13.
59. Harlamov Ju.A. Prognozirovanie poristosti poroshkovykh pokrytij. Poroshkovaja metallurgija. 1990. № 12. S.36 – 41.
60. Harlamov Ju.A. Raschet poristosti gazotermicheskikh pokrytij. Redakcija zhurnala «Avtomaticeskaja svarka». Kiev, 1989. 12 s. Dep. v VINITI 29.03.89. № 2061-V89.
61. Harlamov Ju.A., Harlamov M.Ju. Postroenie matematicheskikh modelej tehnologicheskikh processov gazotermicheskogo napylenija pokrytij. Visnik Shidnoukrajns'kogo derzhavnogo universitetu. 1999. № 3 (18). S.211 – 219.
62. Harlamov Ju.A., Shorshorov M.H. Uslovija vzaimnogo vlijanija napyljaemykh chastic na formirovanie pokrytij. Fizika i himija obrabotki materialov. 1977, № 3. S. 68 – 74.
63. Harlamov Ju.A. Vlijanie napyljaemykh chastic na formirovanie detonacionnykh pokrytij. Diffuzionnoe nasyshhenie i pokrytija na metallah. Kiev. Naukova dumka. 1977. S. 77 – 80.
64. Harlamov Ju.A. Vlijanie fizicheskogo sostojanija podlozhki i parametrov potoka napyljaemykh chastic na formirovanie pokrytij. Teorija i praktika gazotermicheskogo nanesenija pokrytij. Tez. dokl. VII Soveshhanija. Dmitrov. 1978. S.79 – 82.
65. Harlamov Ju.A. Fiziko-himicheskie i tehnologicheskie problemy detonacionno-gazovogo napylenija pokrytij. Fizika i himija obrabotki materialov. 1986, № 1. S. 74 – 81.
66. Vlijanie skorosti peremeshhenija napyljaemoj poverhnosti na kachestvo detonacionno-gazovykh pokrytij. Ju.A. Harlamov, Livshic M.I., M.H. Shorshorov, Je.N. Kapustjan. Poroshkovaja metallurgija. 1981. № 2. S. 34 – 37.
67. Harlamov Ju.A. Sistemnyj podhod k analizu struktury gazotermicheskikh pokrytij. Teorija i praktika gazotermicheskogo nanesenija pokrytij: Tez. dokl. XII nauchno-tehn. konf. fevral' 1992 g., T. 1. Dmitrov, 1992. S. 10 – 15.
68. Harlamov Ju.A. Principy poluchenija i upravlenija strukturij i svojstvami detonacionno-gazovykh pokrytij. Napylenie i pokrytija-95. Tez. dokl. mezhd. nauchno-tehn. konf. SPb, 1995. S.10 – 13.
69. Kharlamov Y.A., Chattha J.A., Kharlamov M.Y., Fazli Rahman. The structure levels of thermal sprayed coatings and their use for properties (coatings) control. Proceedings of First International Conference on Frontiers of Advanced Engineering Materials (FAEM-04). 2005, Ch. M.

Boota Printers, Lahore, PCSIR Labs Complex, Lahore-Pakistan. P.436 – 446.

70. Harlamov Ju.A., Harlamov M.Ju. Strukturnyj podhod k analizu iznosostojkih pokrytij. Visnik Shidnoukrajns'kogo nacional'nogo universitetu. 2000. № 11 (33). S. 130 – 139.

Харламов Ю.О., Мицьк А.В., Романченко А.В. Формирование газотермических покрытий

Статья посвящена анализу общих закономерностей формирования газотермических покрытий с учетом особенностей взаимодействия напыляемых частиц с поверхностью основы и основных этапов его моделирования. Все многообразие процессов, возникающих при взаимодействии частиц с основой, разделено на три основные группы: 1) нормальные процессы, сопровождающиеся образованием прочного сцепления частиц с основой; 2) явления слабого взаимодействия, сопровождающиеся образованием слабых связей материалов частицы и основы (с низкой прочностью сцепления) или их отсутствием; 3) явления повреждаемости, сопровождающиеся разрушением поверхностного слоя основы и частиц или образованием дефектов в поверхностном слое основы и формируемом покрытии. Для определенных сочетаний материалов и рабочих сред существуют диапазоны температуры основы и частиц и скорости их соударения, в пределах которых показатели формируемых покрытий (адгезионная и когезионная прочность, коэффициент использования порошка и др.) устойчивы и значительно выше, чем вне этих диапазонов. Показана целесообразность моделирования процессов формирования газотермических покрытий на двух уровнях – формирование одиночных сплэтов (микроуровень) и формирование слоев покрытия последовательным осаждением одиночных сплэтов (макроуровень).

Ключевые слова: глубина отпечатка, испытания непрерывным вдавливанием индентора, коэффициент вариации; микротвердость, модуль упругости; покрытия; режимы напыления; фазовый состав.

Kharlamov Y.O., Mitsyk A.V., Romanchenko O.V. The study of the mechanical properties of D-gun sprayed coatings by microindentation test

The prospects of using the method of non-destructive testing by continuous microindentation to determine the mechanical properties of thermal sprayed coatings are considered. Tests were conducted to assess the micro-hardness and elastic modulus of composite coatings based on tungsten and chromium carbides deposited by the method of D-gun spraying. Implementation diagrams for coatings sprayed by powders VK8 (WC-8%Co), VK15 (WC-15 % Co), VK18S (WC-18 % Co, spheroidized) KKhN15S (Cr_xC_y-15 % Ni, spheroidized) are considered. It is shown that, under optimal spraying conditions, the microhardness of the deposited coatings is close to the microhardness of sintered hard alloys of the same composition. The values of the coefficients of variation of the microhardness values with increasing imprint depth for samples of sintered hard alloy and sprayed coatings are determined. With optimal spraying conditions, not only the maximum values of microhardness and elastic modulus of the coatings are achieved, but also more uniform structure and mechanical properties of the coatings. More sensitive to changes in technological parameters are the elastic modulus of the sprayed coatings, which is more convenient when practicing technological processes. A change in the nature and intensity of phase transformations of powders under various technological conditions leads to a change in the mechanical properties of the resulting coatings. X-ray diffraction studies of the phase

composition of coatings were performed on samples for measuring microhardness. Qualitatively, the phase composition of the coatings differs insignificantly, at the same time, the average values of the microhardness of the samples range from 10418 to 22495 MN/m² due to the different contents of phases with different properties in the coatings. The microhardness of coatings is significantly affected by the composition of the detonating acetylene-oxygen mixture, the spraying distance, and the powder flow rate per unit spraying cycle. Mechanical testing by continuous indentation pressing is a convenient express method for determining the microhardness and Young's modulus of elasticity of hard coatings based on refractory carbides obtained by detonation gun and other methods of thermal spraying.

Key words: indent depth, indentation continuous indentation tests, the coefficient of variation, microhardness, elastic modulus, coatings, thermal spraying modes; phase composition

Харламов Юрій Олександрович – д.т.н., проф., професор кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк) yuriy.kharlamov@gmail.com

Міцик Андрій Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк) an.mitsyk@gmail.com

Романченко Олексій Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк) alexvromanchenko@gmail.com

Стаття подана 03.02.2021 р

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-165-173>

УДК 621.793.71:669.056.9

КОНТАКТНА ВЗАЄМОДІЯ ЧАСТИНОК З ПОВЕРХНЕЮ ОСНОВИ ПРИ ГАЗОТЕРМІЧНОМУ НАПИЛЕННІ

Харламов Ю.О., Романченко О.В., Міцик А.В.

ON THE POSSIBILITY OF USING OF METAL PARTICLES OXIDATION IN-FLIGHT DURING THERMAL SPRAYING

Kharlamov Y.O., Romanchenko O.V., Mitsyk A.V.

Показана роль контактної взаємодії частинок, що напилюються, з основою у формуванні міцних газотермічних покриттів. В якості основних структуроутворюючих елементів в покриттях прийняті сплети – поодинокі напилені частинки. Проаналізовано основні фактори, що визначають структуру і властивості газотермічних покриттів в процесі напилення, причому найважливішу роль відіграє утворення контакту частинки – основа і процеси, що протікають на ньому. Проаналізовано основні фактори, що визначають взаємодію матеріалів частинки та основи. Розглянуто основні роботи, присвячені проблемі схоплювання частинок з основою при напиленні. Запропоновано при аналізі утворення фізичного контакту розглядати площу контакту, що утворюється, з урахуванням розмірів напилюваних частинок і наявності на поверхні основи мікро- і наношорсткості чотирьох рівнів: номінальної, контурної, фактичної і фізичної. Фізична площа контакту на кілька порядків менше контурної площі та на її площахках формуються найбільш міцні адгезійні зв'язки. Запропоновано рівняння для оцінки фізичної площі контакту в зоні дії напірного тиску.

Ключові слова: газотермічне напилення покриттів, детонаційно-газове напилення покриттів, алюміній, температура плавлення, густина, параметр складності плавлення, коефіцієнт акумуляції тепла, частка порошку.

Вступ. Газотермічне напилення захисних і функціональних покриттів знаходить широке застосування в високотехнологічних галузях промисловості. Безперервно протягом останнього століття удосконалюються способи газополуменевого та електродугового напилення, а також нові, такі як, наприклад, плазмові, детонаційно-газові, високошвидкісні газополум'яні, холодного газодинамічного напилення та інші, а також розширюється їх застосування в гібридних зміцнюючих технологіях. Однією з найважливіших проблем теорії та практики газотермічного напилення є забезпечення високої адгезійної та когезійної міцності нанесених покриттів.

Основним структуроутворюючим елементом в газотермічному покритті (ГТП) є напилювана частка, під якою мається на увазі частка після повного завершення взаємодії з підкладкою (удару та охолодження). Їх також називають ламелями або сплетами.

Успішне застосування газотермічних покриттів (ГТП) в інженерії сильно залежить від якості адгезії між покриттям і підкладкою або попередньо осадженими шарами [1]. Механізм утворення щільного зчеплення визначається комплексом чинників. Механічна складова визначається заповненням западин і поглиблень шорсткої поверхні основи розплавом частинок. Однак, основну роль відіграє утворення міжатомних зв'язків між частинками та основою. При певних умовах можливе сплавлення матеріалів, протікання дифузійних процесів.

Адгезійна і когезійна міцність покриттів сильно пов'язана, як і багато інших властивостей покриттів (термічні, електричні, механічні та ін.), з якістю контакту між сукупністю напилених частинок, що утворюють покриття. При ударі частки розплющуються і деформують пластичну основу. Кінетична енергія частинки трансформується в роботу в'язкої деформації та поверхневу енергію. Затвердіння залежить від товщини напиленої частки, температуропровідності як напилюваного матеріалу, так і нижчого шару, і якості контакту між ними.

Якість контакту на границі розділу частинка – основа є функцією ударного тиску частинки та залежить також від змочуваності основи краплею і десорбції адсорбатів і конденсатів. Крім того, контакт між послідовно нашаровуваними частинками залежить також від релаксації залишкових напружень, викликаних тепловим стисненням напилених частинок в процесі охолодження. Накопичена енергія пружної деформації може звільнитися за різними механізмами: мікророзтріскуванням, пластичним перебігом, повзучістю та ін. [2 – 4]. Однак в літературі не розглядаються особливості формування і ро-

лі контакту напилюваних частинок з поверхнею основи.

Метою статті є дослідження та аналіз основних факторів, що впливають на формування структури та властивостей газотермічних покриттів, роль і значення в цьому зони контакту частинка – основа, особливостей його утворення та участі в цьому нашошорткості поверхні основи.

Основні фактори, що визначають структуру і властивості газотермічних покриттів. Формування структури та властивостей ГТП відбувається на етапах: 1) виготовлення та підготовка вихідного матеріалу; 2) рух частинок в напилювальному струмені; 3) зіткнення частинок з деталлю; 4) взаємодія шарів, що формуються, з навколишнім і робочим газовим середовищем; 5) післянапилювальна обробка виробу, включаючи й раніше нанесене покриття; 6) експлуатація покриття. Частинки напилюваного матеріалу й осадженні шари покриття на всіх етапах піддаються впливу навколишнього середовища. Джерелом окислення частинок є вільний кисень, складні гази, що містять кисень (CO, CO₂, H₂O); оксидні плівки та волога на частинках вихідного порошку. При нанесенні покриттів з оксидів можливо їх часткове або повне відновлення. Слід зазначити також: дисоціацію деяких хімічних сполук; взаємодію частинок з азотом, воднем і вуглецем; взаємодію компонентів композиційних порошоків; плавлення частинок, що супроводжується їх дробленням і інтенсифікацією протікання реакції взаємодії з навколишнім газовим середовищем та ін. Тому при формуванні ГТП будова і властивості частинок можуть істотно відрізнятися від їх вихідного стану, що призводить до великої різноманітності видів їх зіткнення [3, 5, 6].

При зіткненні розплавлених частинок з основою протікають фізико-хімічні перетворення, пов'язані з їх надшвидким охолодженням, а у твердих частинках під дією пластичної деформації та ударних хвиль, протіканням твердофазних реакцій в контактні частинки. Високі швидкості зіткнення призводять до кристалізації розплавлених частинок під високим тиском, зростання температури плавлення, а тим самим ступеня переохолодження, збільшення швидкості зародження центрів кристалізації та отримання мікрочастинкових або аморфізованих структур затверділих частинок [7 – 11].

Нагрівання виробу залежить від параметрів напилювального потоку, геометрії виробу та умов його обтікання. Виріб може охолоджуватися внаслідок теплообміну з навколишнім середовищем або спеціальних технологічних прийомів. Температура виробу буде залежати також від швидкості його переміщення. Проблему сумісності матеріалів покриття та основи слід розглядати за аналогією з композиційними матеріалами [12] у двох аспектах: фізико-хімічному (забезпечення міцного зв'язку і запобігання неприпустимого розвитку фізико-хімічних процесів взаємодії типу розчинення і реакційної дифузії) і фізико-механічному (формування сприятли-

вого характеру розподілу і зниження рівня внутрішніх напруг термічного і механічного походження та ін.).

Формування зони контакту частинок з поверхнею пов'язано з одночасним протіканням ряду складних процесів і явищ, що забезпечують просторовий перерозподіл речовин в прилеглих шарах. Як показано нами раніше [13], можливе утворення перехідних зон різного типу: 1) утворення фізичного контакту шляхом розтікання частки по поверхні; 2) утворення фізичного контакту внаслідок деформації поверхні та частки; 3) проникання тонких струминок розплаву вглиб твердої фази (в т.ч. по межах зерен і субзерен); 4) утворення перехідної зони звичайного дифузійного типу в результаті термічної обробки або в умовах високотемпературної експлуатації; 5) утворення перехідної зони в результаті механічного перемішування матеріалів основи та покриття.

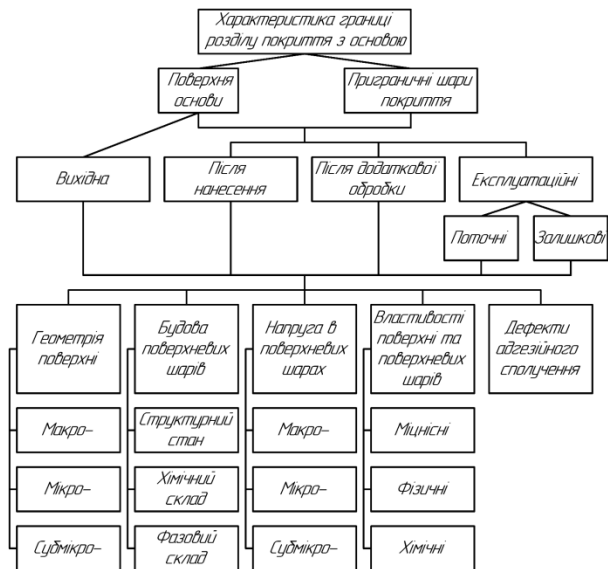


Рис. 1. Основні параметри та види стану границі розділу газотермічного покриття з основним матеріалом виробу

Стан перехідної зони покриття з основою описується комплексом характеристик (рис. 1). Для ГТП характерна наявність наступних видів границь: 1) між окремими частинками, що формують одиничний шар покриття; 2) між окремими одиничними шарами покриття; 3) між покриттям і основним матеріалом виробу; 4) між окремими шарами покриття, що наноситься за кілька проходів. Умови формування цих границь істотно відрізняються. Формування границь між окремими частинками характеризується короткочасним впливом високотемпературного робочого середовища. Формування границь між поодинокими шарами багато в чому залежить від стану і параметрів навколишнього середовища (включаючи запиленість), швидкості переміщення оброблюваної поверхні, температури виробу та інших факторів, що впливають на адсорбцію газів і осадження пилоподібних частинок на оброблюваної поверхні, її окислення під впливом зовнішнього середовища. Окислення протікає інтенсивно при вели-

кій товщині шару, що наноситься (а тим самим повільному охолодженню) і при відсутності в зоні формування покриття захисного середовища. Формування границі між покриттям і основним матеріалом виробу крім зазначених вище факторів залежить від способу спеціальної підготовки поверхні, тривалості часу між підготовкою поверхні та нанесенням покриття й умовами міжопераційного зберігання і транспортування. Ці ж фактори впливають і на формування границі між окремими шарами покриття, що наноситься за кілька проходів (переходів, операцій).

Адгезійна і когезійна міцність ГТП залежить від багатьох факторів, які визначають взаємодію частинок з основою при зіткненні (табл. 1). Ці фактори визначають значення параметрів в рівняннях, що описують кінетику утворення міжатомних зв'язків між матеріалами частинок і поверхневим шаром деталі.

Модель утворення фізико-хімічного контакту між напилюваним матеріалом і основою представлена в роботах М.Х. Шоршорова, В.В. Кудінова [14, 15], Ю.О. Харламова [13, 15, 16], Копилова В.І. [17] та ін. Взаємодія частинок, що напилюються, з основою при зіткненні супроводжується виникненням в зоні їх контакту високого тиску, інтенсивного теплообміну і пластичної деформації [8, 18, 19]. Це забезпечує самоочищення [20, 21] і утворення між ними фізичного контакту, активацію їх поверхневих атомів і хімічну взаємодію, необхідне для розвитку процесів схоплювання.

Утворення зчеплення частинок з основою відбувається не по всій площі фізичного контакту, а в осередках схоплювання, що представляють ділянки на поверхні контакту, що утворили міцну металеву або ковалентний зв'язки між їх матеріалами. Дискретна (осередкова) взаємодія контактуючих матеріалів пов'язана з локалізацією хімічної взаємодії в активних центрах, зумовленої виходом свіжих дефектів кристалічної решітки.

Утворення зв'язку визначається повнотою протікання хімічної взаємодії між матеріалами. У момент схоплювання з частинками відбувається локальне підвищення активності поверхневого шару твердої основи під дією ударного тиску частинок і зниження активаційного бар'єру [22]. Зовнішнім проявом ступеня розвитку даних процесів є заповнення поверхні контакту осередками схоплювання, що утворюють фактичну площу контакту. Як показано в роботі [14], міцний зв'язок частинок з підкладкою настає тільки при заповненні контактної поверхні осередками схоплювання на 30 – 70 %.

Подальшим етапом взаємодії вважають об'ємне розвиток процесу – взаємну дифузію матеріалів через границю з уже усталеними хімічними зв'язками. Взаємна дифузія головним чином відбувається по дислокаціям, малокутовим границям зерен і іншим дефектам структури. Дифузію істотно інтенсифікує пластична деформація, яка відбувається в зоні контакту при зіткненні частинок з основою, а також висока температура в контакті [8, 16], в тому числі з

урахуванням підвищення при зростанні швидкості зіткнення [23]. Крім дифузії, розвиток об'ємної взаємодії може бути пов'язано з підплавленням тонкого поверхневого шару основи високо нагрітими

Таблиця 1

Основні фактори, що визначають взаємодію матеріалів частинок і основи
(Характер впливу: 0 – не впливає; 1 – незначний вплив; 2 – впливає; 3 – істотний вплив; * – вимагає додаткового вивчення)

	Фактори	Характер впливу
1	Мікрогеометрія поверхні основи	
1.1	Шорсткість	
1.1.1	середня висота нерівностей R_z	3
1.1.2	середній крок між нерівностями S_m	3
1.1.3	відстань від лінії виступів до середньої лінії профілю R_p	1*
1.1.4	напрямок нерівностей	
1.1.5	середнє арифметичне відхилення профілю R_a	0
1.1.6	найбільша висота нерівностей профілю R_{max}	2*
1.1.7	відносна опорна довжина профілю t_p	2*
1.1.8	відносна опорна площа на рівні середньої лінії tR_p	2*
1.1.9	радіус мікронерівностей ρ	2*
1.2	хвилястість	
2	Форма (кривизна) поверхні	3
3	Будова і параметри поверхневого шару основи	0
3.1	склад, структура та властивості основного матеріалу	0
3.2	товщина, структура і властивості оксидних плівок	2
3.3	товщина і властивості адсорбованого шару вологи і забруднень	3
3.4	товщина і властивості приповерхневого шару з сильно деформованої кристалічної решіткою	3
3.5	товщина і властивості підповерхневого наклепаного шару	3
3.6	поверхневі залишкові напруги	
3.7	температура	2
3.8	градієнт температури в основі	2
3.9	товщина, будова і властивості попередньо нанесених шарів і частинок	3
4	Морфологія частинок порошку	3
5	Склад, структура і стан частинок, що напилюються	3
5.1	склад і структура	
5.2	товщина і властивості оксидних плівок	3
5.3	товщина і властивості адсорбованого шару вологи, газів і забруднень	3
5.4	температура і її градієнт	3
5.5	протікання реакції взаємодії між компонентами композиційної порошку	3
5.6	швидкість і напрямок зіткнення	3
5.7	концентрація частинок в потоці	3

осаджуваними частинками, масопереносом, формуванням загальної рідкої ванни з її подальшою кристалізацією. Так само об'ємна взаємодія можлива при механічному перемішуванні матеріалу напилююваних частинок і основи за рахунок ерозії. Такі процеси характерні для високошвидкісних методів напилення недостатньо нагрітими частками.

Все це призводить до прояву на границі поділу «покриття – основа» адгезії – зчеплення покриття з основою. Повнота протікання фізико-хімічних процесів визначається, перш за все, енергетичним станом основи та частинок, особливостями їх будови, природою їх матеріалів і впливом робочого середовища і технологічними факторами [24 – 26].

Площі контакту напилююваних частинок з основою. Процеси, які відбуваються в контактні твердих тіл, мають великий як науковий, так і практичний інтерес. Різного роду контактні сполучення (конструктивні бази деталей, триботехнічні, електричні, теплові та т.п.) використовуються у всіх сучасних технічних пристроях і відіграють визначальну роль в забезпеченні їх надійності та ефективності. У машинобудуванні широке поширення набуло моделювання контакту твердих тіл, яке має дискретний характер, обумовлене відхиленням технічних поверхонь від ідеальної геометричної форми в широкому діапазоні розмірів від макро- до наномасштабних. Механічні аспекти взаємодії таких неідеальних поверхонь становлять предмет контактної механіки [29 – 31]. Наявність відхилень від ідеальної форми різного масштабу призвело до створення так званих багаторівневих моделей дискретного контакту. Однією з них є модель дискретного контакту М.Б. Дьомкіна та І.В. Крагельського з концепцією трьох площ контакту - номінальної, контурної та фактичної. Перша визначається геометричними розмірами контактуючих деталей; друга – деформацією контактуючих хвиль і третя – деформацією контактуючих нерівностей шорсткості. Останній масштабний рівень відхилень від ідеальної форми – рівень шорсткості, в абсолютних одиницях відповідає розмірам нерівностей від часток міліметра до сотих часток мікрометра (тобто до десятків нанометрів) для поверхонь найвищих класів шорсткості.

Взаємодія одиничних частинок з поверхнею основи є елементарним закінченим актом формування ГТП. Причому найважливішу роль у формуванні покриття грають явища, що протікають на границі контакту частинок з основою, і перш за все явища схоплювання взаємодіючих матеріалів. Взаємний вплив напилюваних частинок на формування покриттів проявляється при досить високій концентрації частинок в напилювальному потоці [27, 28]. Однак і в цих випадках контактні явища в зоні зіткнення часток з основою істотно не змінюються і частіше за своєю природою є вторинними. Цим визна-

чається важливість вивчення контакту, що формується між частинками та основою і його геометричних характеристик. В наявних теоріях в основному розглядається взаємодія напилюваних частинок з плоскими напівнескінченими тілами та лише окремі роботи присвячені вивченню взаємодії частинок з виступами мікрорельєфу поверхні основи. Однак в цих роботах не розглядаються питання утворення фізичного контакту напилюваних частинок з поверхнею основи і його опис.

При газотермічному напиленні контакт покриттів, що утворюються, також є дискретним внаслідок послідовного осадження частинок на поверхню основи та складається з площадок фактичної взаємодії з основою осаджених частинок. Це обумовлює необхідність більш детального аналізу контакту одиничних частинок з поверхнею основи. Однак якщо при контактуванні шорсткуватих поверхонь спочатку стикаються більш високі виступи поверхні, а потім, у міру зближення поверхонь, в контакт вступає все більше число менш високих виступів. При ГТП всі напилювані частки вступають в контакт з поверхнею основи, причому з будь-якими елементами їх мікрорельєфу – виступами, западинами і їх бічними поверхнями. Середні розміри (діаметри) напилюваних частинок знаходяться в діапазоні 5 ... 200 мкм, а параметри мікрорельєфу поверхні основи забезпечуються технологією їх підготовки (табл. 2). При необхідності використовують методи підготовки поверхні з отриманням більших великих елементів мікрорельєфу (нарізування канавок, вихрового різьблення та ін.). Таким чином, формування зони контакту ГТП є результатом багаторазового повторення елементарних актів взаємодії одиничних частинок з поверхнею основи. Причому співвідношення розмірів частинок і елементів мікрорельєфу поверхні основи дозволяє розглядати моделі взаємодії часток як з плоскими поверхнями, так і елементами мікрорельєфу (виступами, западинами та ін.).

Початкові моделі механіки та фізики контактної взаємодії не враховували наявність наношорсткості, оскільки було відсутнє метрологічне забезпечення і технічні засоби вимірювання параметрів топографії поверхні та фізико-механічних властивостей матеріалів у відповідних масштабах. З появою нових методів та інструментів дослідження поверхні (атомний силовий мікроскоп і ін.) наномасштабний рівень став доступний для геометричних і фізико-механічних вимірювань.

Величина фізичної площі контакту, на якій відбувається безпосереднє зіткнення деталей і через яку можливий перенос носіїв енергії або заряду, більш ніж на порядок менше площі контакту гладких деталей внаслідок присутності наношорсткості на їх поверхнях.

Таблиця 2

Характерні параметри мікрорельєфу напилюваних поверхонь [32 – 36]

Спосіб механічної обробки	Характерні параметри шорсткості поверхні							
	Варіант 1		Варіант 2		Варіант 3		Варіант 4	
	ρ	h	ρ	h	ρ	h	ρ	h
Кругле шліфування	8	9,4	12	4,7	20	2,4	30	1,2
Плоске шліфування	35	37	100	18	370	4,7	550	2,4
Полірування	230	4,7	450	2,4	670	1,2	–	–
Точіння	15	37	20	18	35	9,4	55	4,7
Торцеве фрезерування	420	37	900	18	1300	8	–	–
Струменевобразивна обробка	400...750	40	–	22...160	–	30	–	–
Голко- фрезерування	$S_m = 420$	70	$S_m = 250$	30	$S_m = 120...240$	12...17	–	–

У відомих моделях розглядається взаємодія частинок з гладкими плоскими поверхнями або елементами мікрорельєфу. У більшості випадків ГТНП розміри частинок і мікрорельєфу поверхні основи близькі між собою. Площу контакту одиночної частинки можна розглядати на чотирьох рівнях (рис. 2): 1) номінальна площа контакту, що визначається розмірами сплета (одиночної напиленої частки); 2) контурна площа контакту, що визначається розмірами ділянки фізичного зближення атомів матеріалів частинки та основи; 3) фактична площа контакту, що визначається контактуванням частки з місцевими виступами елементів мікрорельєфу поверхні основи; 4) фізична площа контакту частинки з нерівностями поверхні основи наномасштабного рівня.

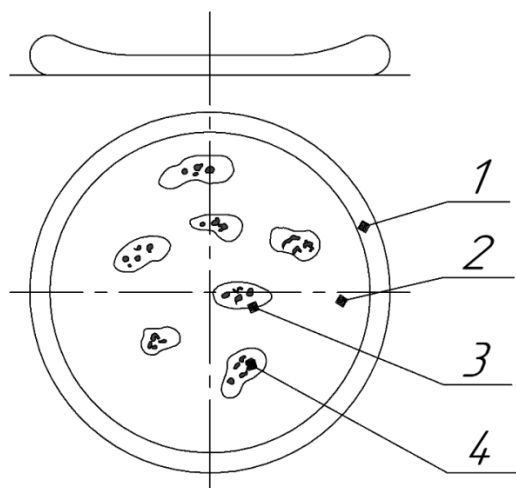


Рис. 2. Схема контакту дископодібного сплета з виступом мікрорельєфу поверхні твердої основи при наявності на ньому місцевих виступів і нанощорсткості:
 1 – номінальна площа контакту; 2 – контурна площа контакту; 3 – площадка фактичного контакту з місцевими виступами елемента мікрорельєфу; 4 – площадка фізичного контакту частинки з нерівностями поверхні

Основний внесок у формування субшорсткості вноситься не технологією обробки поверхні деталі, а її матеріалом – зернистістю. Для сталі 45 відносна різниця значень параметра R_zc для кожного виду обробки не перевищує 5 % (тонке $R_zc=31,72$ нм; чистове $R_zc=32,1$ нм; чорнове $R_zc=32,9$ нм). Близькість значень висотних параметрів субшорсткості R_zc свідчить про незначний вплив виду обробки і, відповідно, фактичної шорсткості на висоту профілю субшорсткості. Значення кроку субшорсткості також близькі і мало залежить від якості обробки (тонке $S_{mc} = 35,47$ нм; чистове $S_{mc} = 34,0$ нм; чорнове $S_{mc} = 31,45$ нм) [37].

У загальному випадку в зоні контакту напилюваних частинок з основою в процесі зіткнення можна виділити три характерних ділянки [5]: 1) центральний круговий, що піддається дії ударного тиску $\rho_p C_p V_p (1 + \rho_p C_p / \rho_s C_s)^{-1}$; 2) середній круговий з діаметром, рівним діаметру напилюваної частки d_p , що піддається дії напірного тиску $\rho_p V_p^2$; 3) периферійний кільцевий, що активується шаром, що розтікається, матеріалу частинки. Тут ρ_p, ρ_s – щільності матеріалів частинки та основи; V_p – швидкість частинки в момент зіткнення з основою; C_p, C_s – швидкість звуку в матеріалах частинки та основи.

Фізичну площу контакту сферичної частинки з основою в зоні дії напірного тиску можна розрахувати на підставі моделі дискретного контакту [38], приймаючи контурну площу контакту рівною площі середньої кругової зони, а фактичний контактний тиск рівним напірному тиску в процесі зіткнення:

$$A_p = \frac{\pi d_p^2}{4} \left(\frac{9\pi^2 (\rho_p V_p^2)^2}{16 E^{*2}} \frac{r}{R_p} \right)^{\frac{v}{2v+1}},$$

де $E^* = \left(\frac{(1-\mu_p^2)}{E_p} + \frac{(1-\mu_s^2)}{E_s} \right)^{-1}$ – еквівалентний модуль

пружності матеріалів контактуючих тіл, E_p , E_s , μ_p , μ_s – модулі пружності та коефіцієнти Пуассона (*S.D. Poisson*) матеріалів частинки та основи; ρ_p , V_p – щільність матеріалу і швидкість часток в момент удару; R_p – максимальна висота виступів шорсткості над середньою лінією; r – середній радіус вершин виступів; ν – параметр, що характеризує функцію розподілу висот нерівностей. Якщо всі нерівності мають однакову висоту (тобто розподіл нерівностей по висоті відсутній), $\nu = 1$; для рівномірного розподілу висот нерівностей $\nu = 2$; для нормального розподілу висот $\nu = 3$.

Величина фізичної площі контакту, на якій відбувається безпосереднє зіткнення деталей і через яку можливий перенос носіїв енергії або заряду, більш ніж на порядок менше площі контакту гладких деталей внаслідок присутності наношорсткості на їх поверхнях [39].

В процесі зіткнення, в зоні дії пластичних деформацій, під дією ударного і напірного тисків плівки окислів руйнуються і відбувається безпосередній контакт матеріалів частинки та основи. Удар частки буде викликати пружні та пластичні деформації поверхневого шару основи та перш за все виступів субшорсткості. Це сприяє утворенню між матеріалами частки і основи дискретних ювенільних площадок контакту і міжатомної взаємодії між ними. Ці площадки і є осередками схоплювання, на яких утворюються найбільш сильні адгезійні зв'язки.

Висновки

Формування газотермічних покриттів з високою адгезійною і когезивною міцністю багато в чому залежить від процесів, що протікають в зоні контакту напилюваних частинок з поверхнею основи.

Наявність на поверхні основи поряд з мікросшорсткістю нерівностей наномасштабного рівня (наношорсткості) призводить до необхідності розгляду «площі контакту частинка – основа» на чотирьох рівнях: 1) номінальна площа контакту, що визначається розмірами сплета (одиночної напилюваної частки); 2) контурна площа контакту, що визначається розмірами ділянки фізичного зближення атомів матеріалів частинки та основи; 3) фактична площа контакту, що визначається контактуванням частки з місцевими виступами елементів мікрорельєфу поверхні основи; 4) фізична площа контакту частинки з нерівностями поверхні основи наномасштабного рівня.

Фізична площа контакту частинка – основа становить малу частину номінальної площі, що необхідно враховувати, наприклад, в розрахунках процесів контактного теплообміну, утворення міжатом-

них зв'язків і прогнозування міцності зчеплення покриттів.

Литература

1. ASM Handbook, Volume 5A: Thermal Spray Technology. Ed. by R.C. Tucker. ASM International, 2013. 412 p.
2. Ильющенко А.Ф., Шевцов А.И., Оковитый В.А., Громыко Г.Ф. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование. Минск: Беларус. навука, 2011. 357 с.
3. Формирование газотермических покрытий при производстве деталей. С.А. Клименко, Л.Г. Полонский, М.Ю. Харламов, Ю.А. Харламов, П.А. Витязь, В.С. Ивашко, М.Л. Хейфец, С.А. Чижик; под общ. ред. Ю.А. Харламова и М.Л. Хейфеца; Нац. Акад. наук Украины, Отд. Физ.-техн. Наук, Нац. акад. наук Украины, Ин-т сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля. Минск: Беларуская навука, 2020. 416 с.
4. T.W. Clyne and G.C. Gill: "Residual Stresses in Thermal Spray Coatings and Their Effect on Interfacial Adhesion: A Review of Recent Work," J. Therm. Spray Technol., 1996, 5, pp. 401 – 416.
5. Харламов Ю.А. Удар частиц при детонационно-газовом напылении. Северодонецк, изд-во СНУ ім. В. Даля, 2018. 144 с.
6. Харламов Ю.А. Классификация видов взаимодействия частиц с подложкой при нанесении покрытий. Порошковая металлургия. 1988, № 1. С. 18 – 22.
7. Харламов Ю.А. Влияние скорости соударения на термический цикл в контакте между расплавленной частицей и поверхностью твердого тела. Физика и химия обработки материалов. 1987, № 6. С. 82 – 87.
8. Харламов Ю.А. Термическое взаимодействие твердых частиц с деталью с учетом пластической деформации при газотермическом нанесении покрытий // Физика и химия обработки материалов. 1988, № 4. С. 73 – 78.
9. Харламов Ю.А. Влияние скорости капель в момент удара о твердую поверхность на их кристаллизацию. Порошковая металлургия. 1991. № 8. С.23 – 30.
10. Харламов Ю.А. Напряжения на поверхности детали при соударении с расплавленной частицей. Физика и химия обработки материалов. 1990. № 6. С.80 – 85.
11. Харламов Ю.А. Контактный теплообмен при растекании расплавленных частиц на твердой поверхности. Физика и химия обработки материалов. 1990. № 6. С.86– 89.
12. Шоршоров М.Х. Проблема совместимости при разработке композиционных материалов с металлической матрицей, упрочненных высокомодульными волокнами.-Волокнистые и дисперсноупрочненные композиционные материалы. М. Наука, 1976. С. 10 – 15.
13. Kharlamov Y.A. Bonding of Detonation Sprayed Coatings. Thin Solid Films. 1978. Vol.54. No.3. p. 271 – 278.
14. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. М. Металлургия, 1992. 432 с.
15. Шоршоров М.Х., Харламов Ю.А. Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий. М. Наука, 1978.
16. Харламов Ю.О. Механізми схоплювання частинок з основою при газотермічному напиленні. Вісник СНУ ім. В. Даля, № 1 (249), 2019. С. 69 – 76.
17. Максимович Г.Г., Шатинский В.Ф., Копылов В.И. Физико-химические процессы при плазменном напылении и разрушении материалов с покрытием. Киев. Наук. думка, 1983. 264 с.

18. Харламов Ю.А. Экспериментальное исследование пластической деформации при детонационном напылении. Порошковая металлургия. 1988, № 10. С. 70 – 77.
19. Харламов Ю.А. Механизм пластической деформации при формировании газо-термических покрытий. Порошковая металлургия. 1988, № 12. С. 31 – 37.
20. Харламов Ю.А. Очистка подложек от поверхностных пленок в процессе напыления порошков. Порошковая металлургия. 1983, № 11. С. 41 – 47.
21. Харламов Ю.А. Самоочищение поверхности подложек при газотермическом напылении. Теория и практика газотермического нанесения покрытий. Т. 1. Дмитров, 1983. С.41 – 47.
22. Харламов Ю.А. Кинетика схватывания частиц порошка с поверхностью детали при газотермическом нанесении покрытий. Порошковая металлургия. 1989. № 3. С.50 – 54.
23. Харламов Ю.А. Термическое взаимодействие частиц с подложкой с учетом скорости их соударения при газотермическом напылении. Известия вузов. Машиностроение, 1982. № 1. С.152 – 156.
24. Харламов Ю.А. Влияние физического состояния подложки и параметров потока напыляемых частиц на формирование покрытий. Теория и практика газотермического нанесения покрытий. Тез. докл. VII Сессии. Дмитров, 1978. С. 79 – 82.
25. Харламов Ю.А., Хасан М.С., Андерсон Р.Н. Взаимодействие напыляемых частиц порошка алюминия с подложкой, имеющей тонкое покрытие. Порошковая металлургия, 1980, № 6. С.96 – 102.
26. Влияние скорости перемещения напыляемой поверхности на качество детонационно-газовых покрытий. Ю.А. Харламов, Лившиц М.И., М.Х. Шоршоров, Э.Н. Капустян Порошковая металлургия, 1981. № 2. С. 34 – 37.
27. Харламов Ю.А., Шоршоров М.Х. Условия взаимного влияния напыляемых частиц на формирование покрытий. Физика и химия обработки материалов, 1977, № 3. С. 68 – 74.
28. Харламов Ю.А. Влияние напыляемых частиц на формирование детонационных покрытий. Диффузионное насыщение и покрытия на металлах. Киев: Наукова думка, 1977. С. 77 – 80.
29. Демкин Н.Б. Контактное шероховатых поверхностей. М. Наука, 1970. 227 с.
30. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нано-трибологии до динамики землетрясений. М. ФИЗМАТЛИТ, 2013. 352 с.
31. Джонсон К.Л. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989. 510 с.
32. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М. Машиностроение, 2000. 320 с.
33. Харламов Ю.А., Борисов Ю.С. Влияние микрорельефа поверхности на прочность сцепления с газотермическими покрытиями. Автоматическая сварка. 2001. № 6. С. 19 – 26.
34. Нураков С., Белоцерковский М.А., Калиев А.Б. Исследование процесса дробеструйной подготовки поверхности перед напылением стальных покрытий. “Scientific proceeding XXV international scientific-technical conference trans & Motauto’17”. С. 73 – 76.
35. Ольг Ю., Максаров В.В., Красный В.А. Обеспечение адгезионной прочности газотермических покрытий поршневых колец двигателей карьерного транспорта. Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 77 – 83.
36. Лузан С.А. Оценка микротопографии при щеточной подготовке напыляемых поверхностей деталей. Вестник ХНАДУ, вып. 67, 2014. С. 32 – 36.
37. Шалыгин М.Г. Анализ взаимосвязей зерен материала и субшероховатости поверхности хромистой стали. Строительные и дорожные машины. 2017. № 1. С. 43 – 46.
38. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Влияние нанотопографии поверхностей на характеристики дискретного контакта твердых тел. Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. Тверь. Твер. гос. ун-т, 2016. С. 139 – 144.
39. Измайлов В.В., Чаплыгин С.А. Числовое и аналитическое моделирование дискретного контакта деталей машин. Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» 2014. № 6 (25). 10TVN614. С. 1 – 13.

References

1. ASM Handbook, Volume 5A: Thermal Spray Technology. Ed. by R.C. Tucker. ASM International, 2013. 412 p.
2. Il'jushhenko A.F., Shevcov A.I., Okovityj V.A., Gromyko G.F. Processy formirovaniya gazotermicheskikh pokrytij i ih modelirovanie. Minsk: Belarus. navuka, 2011. 357 s.
3. Formirovanie gazotermicheskikh pokrytij pri proizvodstve detalej. S.A. Klimenko, L.G. Polonskij, M.Ju. Harlamov, Ju.A. Harlamov, P.A. Vitjaz', V.S. Ivashko, M.L. Hejfec, S.A. Chizhik; pod obshh. red. Ju.A. Harlamova i M.L. Hejfec; Nac. Akad. nauk Belarusi, Otd. Fiz.-tehn. Nauk, Nac. akad. nauk Ukrainy, In-t sverhtverdyh materialov im. V.N. Bakulja. Minsk: Belaruskaja navuka, 2020. 416 s.
4. T.W. Clyne and G.C. Gill: “Residual Stresses in Thermal Spray Coatings and Their Effect on Interfacial Adhesion: A Review of Recent Work,” J. Therm. Spray Technol., 1996, 5, pp. 401 – 416.
5. Harlamov Ju.A. Udar chastic pri detonacionno-gazovom napylenii. Severodonec'k, izd-vo SNU im. V. Dalja, 2018. 144 s.
6. Harlamov Ju.A. Klassifikacija vidov vzaimodejstvija chastic s podlozhkoj pri nanesenii pokrytij. Poroshkovaja metallurgija. 1988, № 1. S. 18 – 22.
7. Harlamov Ju.A. Vlijanie skorosti soudarenija na termicheskij cikl v kontakte mezhdru rasplavlennoj chastecej i poverhnost'ju tverdogo tela. Fizika i himija obrabotki materialov. 1987, № 6. S. 82 – 87.
8. Harlamov Ju.A. Termicheskoe vzaimodejstvie tverdyh chastic s detal'ju s uchetom plasticheskoj deformacii pri gazotermicheskom nanesenii pokrytij // Fizika i himija obrabotki materialov. 1988, № 4. S. 73 – 78.
9. Harlamov Ju.A. Vlijanie skorosti kapel' v moment udara o tverduju poverhnost' na ih kristallizaciju. Poroshkovaja metallurgija. 1991. № 8. S.23 – 30.
10. Harlamov Ju.A. Naprjazhenija na poverhnosti detali pri soudarenii s rasplavlennoj chastecej. Fizika i himija obrabotki materialov. 1990. № 6. S.80 – 85.
11. Harlamov Ju.A. Kontaktnyj teploobmen pri rastekanii rasplavlenykh chastic na tverdoj poverhnosti. Fizika i himija obrabotki materialov. 1990. № 6. S.86– 89.
12. Shorshorov M.H. Problema sovместимости pri razrabotke kompozicionnyh materialov s metallicheskoj matriciej, uprochnennyh vysokomodul'nymi voloknami.-Voloknistye i dispersnouprochnennye kompozicionnye materialy. M. Nauka, 1976. S. 10 – 15.
13. Kharlamov Y.A. Bonding of Detonation Sprayed Coatings. Thin Solid Films. 1978. Vol.54. No.3. p. 271 – 278.

14. Kudinov V.V., Bobrov G.V. Nanesenie pokrytij napyleniem. Teorija, tehnologija i oborudovanie. M. Metallurgija, 1992. 432 s.
15. Shorshorov M.H., Harlamov Ju.A. Fiziko-himicheskie osnovy detonacionno-gazovogo napylenija pokrytij. M. Nauka, 1978.
16. Harlamov Ju.O. Mehanizmi shopljuvannja chastinok z osnovoju pri gazotermichnomu napilenni. Visnik SNU im. V. Dalja, No 1 (249), 2019. S. 69 – 76.
17. Maksimovich G.G., Shatinskij V.F., Kopylov V.I. Fiziko-himicheskie processy pri plazmennom napylenii i razrushenii materialov s pokrytiem. Kiev. Nauk. dumka, 1983. 264 s.
18. Harlamov Ju.A. Jeksperimental'noe issledovanie plasticheskoy deformacii pri detonacionnom napylenii. Poroshkovaja metallurgija. 1988, № 10. S. 70 – 77.
19. Harlamov Ju.A. Mehanizm plasticheskoy deformacii pri formirovanii gazo-termicheskikh pokrytij. Poroshkovaja metallurgija. 1988, № 12. S. 31 – 37.
20. Harlamov Ju.A. Ochistka podlozhek ot poverhnostnyh plenok v processe napylenija poroshkov. Poroshkovaja metallurgija. 1983. № 11. S. 41 – 47.
21. Harlamov Ju.A. Samoochishhenie poverhnosti podlozhek pri gazotermicheskom napylenii. Teorija i praktika gazotermicheskogo nanesenija pokrytij. T. 1. Dmitrov, 1983. S.41 – 47.
22. Harlamov Ju.A. Kinetika shvatyvanija chastic poroshka s poverhnost'ju detali pri gazotermicheskom nanesenii pokrytij. Poroshkovaja metallurgija. 1989. № 3. S.50 – 54.
23. Harlamov Ju.A. Termicheskoe vzaimodejstvie chastic s podlozhkoj s uchetom skorosti ih soudarenija pri gazotermicheskom napylenii. Izvestija vuzov. Mashinostroenie, 1982. № 1. S.152 – 156.
24. Harlamov Ju.A. Vlijanie fizicheskogo sostojanija podlozhki i parametrov potoka napyljaemykh chastic na formirovanie pokrytij. Teorija i praktika gazotermicheskogo nanesenija pokrytij. Tez. dokl. VII Soveshhanija. Dmitrov, 1978. S. 79 – 82.
25. Harlamov Ju.A., Hasan M.S., Anderson R.N. Vzaimodejstvie napyljaemykh chastic poroshka aljuminija s podlozhkoj, imejushhej tonкое pokrytie. Poroshkovaja metallurgija, 1980. № 6. S.96 – 102.
26. Vlijanie skorosti peremeshhenija napyljaemoj poverhnosti na kachestvo detonacionno-gazovykh pokrytij. Ju.A. Harlamov, Livshic M.I., M.H. Shorshorov, Je.N. Kapustjan Poroshkovaja metallurgija, 1981. № 2. S. 34 – 37.
27. Harlamov Ju.A., Shorshorov M.H. Uslovija vzaimnogo vlijanija napyljaemykh chastic na formirovanie pokrytij. Fizika i himija obrabotki materialov, 1977, № 3. S. 68 – 74.
28. Harlamov Ju.A. Vlijanie napyljaemykh chastic na formirovanie detonacionnykh pokrytij. Diffuzionnoe nasyshhenie i pokrytija na metallah. Kiev: Naukova dumka, 1977. S. 77 – 80.
29. Demkin N.B. Kontaktirovanie sherohovatykh poverhnostej. M. Nauka, 1970. 227 s.
30. Popov V.L. Mehanika kontaktного vzaimodejstvija i fizika trenija. Ot nano-tribologii do dinamiki zemletrjasenij. M. FIZMATLIT, 2013. 352 s.
31. Dzhonson K.L. Mehanika kontaktного vzaimodejstvija. M.: Mir, 1989. 510 s.
32. Suslov A.G. Kachestvo poverhnostnogo sloja detalej mashin. M. Mashinostroenie, 2000. 320 s.
33. Harlamov Ju.A., Borisov Ju.S. Vlijanie mikrorel'efa poverhnosti na prochnost' sčepenija s gazotermicheskimi pokrytijami. Avtomaticheskaja svarka. 2001. № 6. S. 19 – 26.
34. Nurakov S., Belocerkovskij M.A., Kaliev A.B. Issledovanie processa drobestrujnoj podgotovki poverhnosti pered napyleniem stal'nykh pokrytij. "Scientific proceeding XXV international scientific-technical conference trans & Motauto'17". S. 73 – 76.
35. Ol't Ju., Maksarov V.V., Krasnyj V.A. Obespechenie adgezionnoj prochnosti gazotermicheskikh pokrytij porshnevnykh kolec dvigatelej kar'ernogo transporta. Zapiski Gornogo instituta. 2018. T. 229. S. 77 – 83.
36. Luzan S.A. Ocenka mikrotopografii pri shhetochnoj podgotovke napyljaemykh poverhnostej detalej. Vestnik HNADU, vyp. 67, 2014. S. 32 – 36.
37. Shalygin M.G. Analiz vzaimosvjazej zeren materiala i subsherohovatosti poverhnosti hromistoj stali. Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. 2017. № 1. S. 43 – 46.
38. Izmajlov V.V., Novoselova M.V. Vlijanie nanotopografii poverhnostej na harakteristiki diskretnogo kontakta tverdykh tel. Fiziko-himicheskie aspekty izuchenija klasterov, nanostruktur i nanomaterialov: mezhvuz. sb. nauch. tr. Tver'. Tver. gos. un-t, 2016. S. 139 – 144.
39. Izmajlov V.V., Chaplygin S.A. Chislovoe i analiticheskoe modelirovanie diskretnogo kontakta detalej mashin. Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE» 2014. № 6 (25). 10TVN614. S. 1 – 13.

**Харламов Ю.А., Романченко А.В., Мицык А.В.
Контактное взаимодействие частиц с поверхностью
основы при газотермическом напылении**

Показана роль контактного взаимодействия напыляемых частиц с основой в формировании прочных газотермических покрытий. В качестве основных структурообразующих элементом в покрытиях приняты сплэты – одиночные напыленные частицы. Проанализированы основные факторы, определяющие структуру и свойства газотермических покрытий в процессе напыления, причем важнейшую роль играют образование контакта частица-основа и процессы, протекающие на нем. Проанализированы основные факторы, определяющие взаимодействие материалов частицы и основы. Рассмотрены основные работы, посвященные проблеме схватывания частиц с основой при напылении. Предложено при анализе образования физического контакта рассматривать образующуюся площадь контакта с учетом размеров напыляемых частиц и наличия на поверхности основы микро- и наношероховатости четырех уровнях: номинальную, контурную, фактическую и физическую. Физическая площадь контакта на несколько порядков меньше контурной площади и на ее площадках формируются наиболее прочные адгезионные связи. Предложено уравнение для оценки физической площади контакта в зоне действия напорного давления.

Ключевые слова: газотермическое напыление покрытий, детонационно-газовое напыление покрытий, алюминий, температура плавления, плотность, параметр трудности плавления, коэффициент аккумуляции тепла, частица порошка.

**Kharlamov Y.O., Romanchenko O.V., Mitsyk A.V.
On the possibility of using of metal particles oxidation in
flight during thermal spraying**

The features of obtaining of composite coatings, including ceramic-alumina, by thermal spraying methods, are considered. The technological characteristics of modern thermal spraying methods are compared, and positive influence of

high velocity sprayed particles on the formation of high-strength coatings is shown. Of particular interest for deposition of protective and functional coatings is aluminum, the most abundant metal on Earth. The paper is devoted to the analysis of the possibilities of deposition of metal oxide coatings by the methods of thermal spraying with powders of pure metals in the combustion mode and the experimental verification of the deposition of alumina-ceramic coatings by the method of detonation-gas spraying with aluminum powders. The possibility of using metal oxidation during thermal spraying to obtain metal-oxide and oxide coatings is shown. The values of the parameters that determine the tendency to form coatings, namely, the melting temperature, density, the melting difficulty parameter and the heat storage coefficient for some metals and their oxides, are compared. Special experiments were carried out for detonation-gas spraying of coatings by aluminum powders. The possibility of deposition of composite coatings aluminum-aluminum oxide is shown. It was established that the properties of the resulting coatings are determined by the relative content of aluminum oxides in the coatings, depending on the degree of oxidation of the aluminum particles, their initial size and the oxygen content in the detonating gas mixture. Recommendations for the development of specialized equipment have been proposed, and promising areas for studying the combustion of metal and alloy particles during detonation-gas and gas-flame spraying methods have been considered. To develop the detonation-gas installations for spraying by metal powders in the combustion mode, there is the need to solve a complex of problems: 1. Development of systems for feeding of powders of active metals to the detonation combustion chamber, and more specifically, in the initial section of the reaction zone. The function of the system is to prepare the required dose of powder and transport it for dissipation in the combustion chamber. Of particular difficulty is the dosage of fine powders such as aluminum powder. In this

case, the transporting gas should not significantly reduce the degree of activity of the surrounding atmosphere or lead to the absence of oxygen. The possibility of supplying oxygen or another oxidizing agent to the zone of the resulting gas-powder cloud is not ruled out. The system must also be protected from the effects of gas detonation products. 2. The detonation combustion chamber should ensure the mixing of the detonating gas mixture with the initial powder, the triggering of the detonation regime of combustion of the gas mixture and the gas-powder mixture with the combustion of powder particles and ensure the required coefficient of completeness of their combustion.

Key words: thermal spray technology; detonation-gas spraying of coatings; aluminum; melting temperature; density; melting difficulty parameter; heat accumulation coefficient; powder particle.

Харламов Юрій Олександрович – д.т.н., проф., професор кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк)
yuriy.kharlamov@gmail.com

Романченко Олексій Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк)
alexvromanchenko@gmail.com

Міцик Андрій Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) an.mitsyk@gmail.com

Стаття подана 03.02.2021 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-174-177>

УДК 621.384.8

ЧАСОПРОЛІТНА МАС-СПЕКТРОМЕТРИЧНА УСТАНОВКА

Черніков М.Г., Чернікова І.Д., Чернікова О.М., Гордєєв В.В.

TIME OF FLIGHT MASS SPECTROMETRIC INSTALLATION

Chernikov M.G., Chernikova I.D., Chernikova O.M., Gordieiev V.V.

Потреба техніки і технологій привели до різкого прискорення дослідно-конструкторських і науково-дослідних робіт для вивчення в надвисокому вакуумному середовищі як поверхневих, так і об'ємних властивостей твердих тіл. Як відомо, на поверхневі властивості твердих тіл в значній мірі впливають адсорбційні процеси, обумовлені навколишнім середовищем, тобто елементним складом газу, що знаходиться у вакуумній системі. Атоми і молекули газу відрізняються своєю масою, отже їх можна ідентифікувати цієї фізичної величиною. Тому мас-спектрометрія, як метод аналізу складу складних газових сумішей та їх ідентифікації за масами, є одним з найбільш ефективних для визначення молекулярної маси газу, його складу і структури. У даній роботі запропонована часопролітна мас-спектрометрична установка з підвищеною швидкодією, точністю і надійністю вимірювання мас газу у вакуумній системі, а це дає можливість проводити біль якійсний аналіз адсорбційних процесів на поверхні твердого тіла.

Ключові слова: мас-спектр, вакуум, генератор імпульсів, блок порівняння, інтегратор, індикатор.

Вступ. Атоми і молекули газу відрізняються своєю масою, отже їх можна ідентифікувати цієї фізичної величиною, тому мас-спектрометрію, як фізичний метод аналізу складу складних сумішей речовин можливо використовувати для ідентифікації окремих речовин в них за їх мас-спектрами. Мас-спектр виходить в результаті іонізації речовин, поділу іонів по величинам їх масових чисел (відношення маси іона до його заряду) і вимірювання інтенсивності іонних струмів для всіх іонів. Мас-спектр дозволяє зробити висновки про молекулярну масу зразка, його склад і структуру.

Метою розглянутої роботи є підвищення швидкодії, точності і надійності вимірювань мас-спектру речовин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій: В області мас-спектрометрії дослідження і розробки розпочато напочатку 50-60-х років минулого століття. По суті, було створено вітчизняне мас-

спектрометричне приладобудування, розроблено кілька десятків типів мас-спектрометрів для вирішення найважливіших наукових і прикладних задач [1]. В даний час успішно тривають ці роботи, створюючи нові мас-спектрометричні прилади, розвиваючи нові методи мас-спектрометричного аналізу і методики досліджень.

Унікальні особливості мас-спектрометричного методу, який володіє ознаками одночасно високоінформативного, високочутливого і аналітичного, тобто універсального методу, дозволяють з успіхом використовувати його для елементного і молекулярного аналізу речовин, в дослідженнях властивостей поверхні [2] і нанотехнології, в сучасній біотехнології, екології та медицині.

Для аналізу молекулярного складу і мікродомішок в газах і парах легколетких рідин застосовуються хромато-мас-спектрометри і часопролітні мас-спектрометри, статичні магнітні або квадрупольні, з електронною іонізацією або хемоіонізацією, а також квадрупольні мас-спектрометри, що вбудовуються в дослідні комплекси.

Для ізотопного і елементного аналізу твердих зразків застосовуються магнітні статичні мас-спектрометри з поверхневою термоіонізацією зразків або з іонізацією в різних розрядах в вакуумі. В цьому напрямку виконано ряд унікальних досліджень і розробок [3]. Це, перш за все, розробка нового надвисокочутливого методу аналізу слідів актинидів (фемто- і аттомолі) в об'єктах довкілля. Метод успішно використовується для проведення аналізів в ультрамалих пробах навколишнього середовища. Важливим досягненням останніх років стало розробка приладового ряду спеціалізованих мас-спектрометрів для потреб ядерно-паливного комплексу.

Для потреб у сучасній біотехнології, екології і медицині активно розвивається біоорганічна мас-спектрометрія. З розвитком методів м'якої іонізації

МС, таких як електроспрей (ESI) і MALDI, мас-спектрометричними методами стало можливим аналізувати широкий клас лабільних сполук – пептидів, білків і нуклеотидів. Останнім часом виконані ключові піонерські дослідження в цій області. Реалізовано хроматорідинний-мас-спектрометричний комплекс ХР-МСК і на широкому класі сполук продемонстровані аналітичні можливості методу [4]. Сьогодні ХР-МСК широко застосовується в фармацевтиці, біохімічних і клінічних дослідженнях, що об'єднуються єдиним терміном «наука про життя». ХР-МСК стала основним робочим інструментом контролю синтезу і чистоти лікарських препаратів, для аналізу метаболізму ліків, при медичній перевірці ліків, вирішення завдань протеоміки та метаболоміки, пошуку маркерів хвороб і т.д.

Виклад основного матеріалу дослідження:

Часопролітна мас-спектрометрія заснована на тому факті, що іони з однаковими енергіями, але різними масами подорожують з різними швидкостями. По суті, іони, що виникли в результаті короткого акту іонізації, прискорюються електромагнітним полем до однакової енергії і пролітають шлях до детектора. Більш легкі іони прилітають раніше, ніж більш важкі і записується масовий спектр. Вимірювання часу прольоту для кожного іона дозволяє визначити його масу. Даний цикл повторюється з періодичністю, яка залежить від часу прольоту найважливішого з зчитувальних атомів.

Запропонований в статті мас-спектрометричний комплекс [5] відноситься до області вимірювання параметрів спектра мас за часом прольоту і може бути використаний для аналізу робочих сумішей газів в вакуумних системах [6].

Часопролітний мас-спектрометр (рис.1) дозволяє підвищити швидкість і надійність вимірювань при значному скороченні блоків функціональної схеми.

Часопролітна мас-спектрометрична установка містить: генератор 1, який задає прямокутні імпульси і керує роботою блоку живлення 2, джерело іонів 3, що визначає момент формування пачок іонів, простір дрейфу іонів 4, вторинний електронний помножувач 5, реєструючий розподіл іонів по масам, імпульсний широкосмуговий підсилювач 6, блок затримки стробіруючого сигналу 7, що дозволяє встановлювати строб-імпульс на необхідній ділянці спектра, клапан 8, на вхід якого подається спектр мас, а на синхровхід – стробіруючий сигнал. В якості клапана можна використовувати синхронний фільтр, синхронну лінійну схему пропускання, і так інше. Вихід клапана з'єднується з інтегратором 9 і індикатором 10 (осцилограф, вольтметр, самописець), робота яких також управляється стробіруючим імпульсом. Між задаючим генератором 1 і блоком затримки сигналу 7 включена схема формування стробіруючого сигналу, що включає генератор

прямокутних імпульсів 11, який працює в режимі очікування, розширювача імпульсів 12 і 13, а також схему порівняння 14. В даний час аналогічні методи керування застосовуються й для управління інших технологічних процесів [7,8,9]

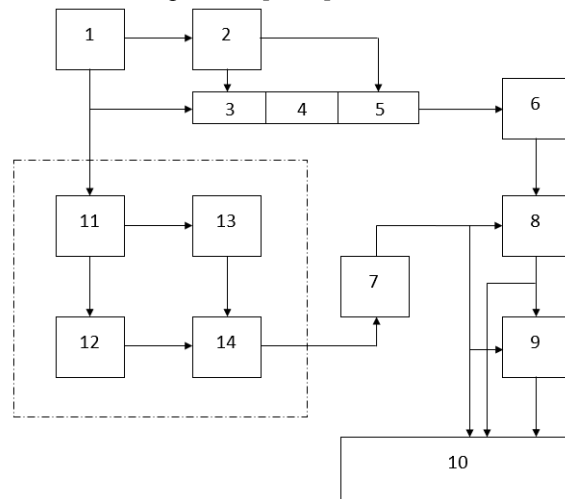


Рис. 1. Функціональна схема часопролітної мас-спектрометричної установки

Установка працює наступним чином.

Генератор 1, що задає імпульси, в початковий момент часу виробляє прямокутні імпульси, що управляють харчуванням електронної гармати в блоці живлення 2. Потік електронів, потрапляючи в іонізуючу камеру джерела іонів 3, іонізує робочу суміш. Через $t_k = 15\text{мкс}$ з другого виходу генератора 1, що задає на виштовхуючий потенціал на електрод джерела іонів 3, надходять імпульси малої тривалості і великої амплітуди. У іонізаційній камері формуються пачки іонів, що складаються з іонів різних мас, які потім виштовхуються в простір дрейфу 4, де через час t реєструються вторинним електронним помножувачем:

$$\sqrt{\frac{mS^2}{2qU_e}} \tag{1}$$

де S – довжина дрейфового простору; q – заряд іонів; U_e – прискорююча (виштовхуюча) напруга; m – маса іонів.

У момент часу t_1 формування пачок іонів частина напруги генератора 1 запускає генератор 11, що виробляє синхронізований з моментом часу запуску t_1 сигнал V_{11C} (рис. 2а) і затриманий щодо моменту запуску на час t_0 сигнал V_{11O} (рис. 2б). Величина часу t_0 визначається довжиною дрейфового простору і розраховується за формулою (1) для відносних мас іонів

$$m/m_0 = 1$$

де m_0 – атомна одиниця маси, тобто для початкової маси спектра.

Фактично t_0 є часом прольоту одиничної маси іону

$$m/m_0 = 1$$

і визначає початок розверстки мас-спектра (рис.2, момент часу t_2). З виходів генератора 11 зсунуті в часі один щодо іншого прямокутні імпульси V_{11C} і V_{11O} подаються на розширювачі 12 і 13 відповідно. Тривалість сигналу V_{13} (рис. 2г) встановлюється рівною

$$t_i \geq t_4 - t_2$$

і визначається значенням максимальної реєстрацією маси іонів, а також параметрами мас-спектрометра.

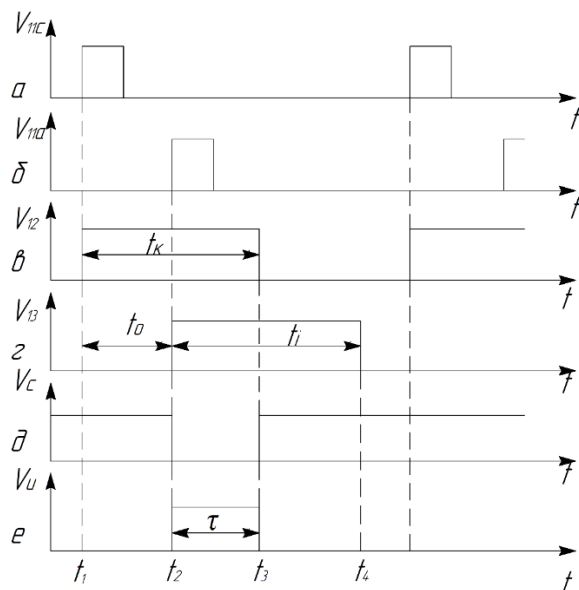


Рис. 2. Епюри напружень в різних точках схеми формування стробіруючого імпульсу

Тривалість сигналу в розширювачі 12 регулюється і встановлюється в залежності від режиму роботи установки (рис. 2в)

$$t_k = t_3 - t_1.$$

Задній фронт імпульсу V_{12} визначає тривалість імпульсу (рис. 2е)

$$\tau = t_3 - t_2.$$

Установка може працювати в декількох режимах:

- реєстрація за все мас-спектра;
- реєстрація швидкої зміни величини піка даної маси;
- реєстрація зміни в часі амплітуди групи піків.

З виходу схеми порівняння 14 сформований стробіруючий імпульс подається на блок затримки 7, де задається час затримки строб-сигналу, а потім на вхід клапанного пристрою 8, в якому із загального мас-спектра виділяється досліджувану ділянку або конкретні компоненти мас-спектра. У разі одночасної реєстрації мас-спектрометричної установки зміни в часі групи n піків блок затримки виконує у вигляді n однакових каналів з відповідної комутацією. Далі отриманий мас-спектр

реєструється індикатором 10. Інтегратор використовується для вимірювання амплітуди піків.

Використання описаної часопролітної мас-спектрометричної установки дозволяє підвищити швидкодію і надійність вимірювань при значному скороченні блоків функціональної схеми. При цьому зменшується помилка визначення положення піку в мас-спектрі, а, отже, точність вимірювання. Крім того, можливість роботи установки в декількох режимах дозволяє застосовувати її як засіб для мас-спектрометричного аналізу газових компонентів речовини, так і визначати компоненти адсорбованих і десорбувати атомів з поверхні твердого тіла, що дозволяє знизити витрати на розробку додаткових коштів на мас-спектрометричний аналіз.

Висновки: Часопролітна мас-спектрометрична установка, яка розглянута в цій роботі, відрізняється від аналогічних своєю підвищеною швидкодією, точністю і надійністю вимірювання мас атомів і молекул суміші газів у вакуумній системі.

Література

1. Черепин В.Т., Васильев М.А. Методы и приборы для анализа поверхности материалов. Киев, 1982. 400 с.
2. Черепин В.Т. Ионный микрозондовый анализ. Киев, 1992. 344 с.
3. Ivasishin O.M., Cherepin V.T., Kolesnik V.N., Gumenyak N.M. An automated dilatometric system: Instruments and Experimental-Techniques 53 (3), 2010. С 457-460.
4. Шаповалова Е.Н., Пирогов А.В. Хроматографические методы анализа. Москва, изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2007. 120 с.
5. А.с. SU 1527677 А1 СССР, МКИ4 Н 01 J 49/40 Времяпролетная масс-спектрокопическая установка / Черников Н.Г., Щербаков Ю.И. №4184721/24-21; заявл. 26.01.87; опубл. 07.12.89. Бюл. № 45.
6. Черніков М.Г., Чернікова І.Д. Високовакуумний нанометричний комплексний спектрометр.: Вісник Східноукр. нац. університету ім. В. Даля, 2020. № 4 (260), С. 144 –148. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-144-148>
7. Соколов В.І., Кріль О.С., Спіфанова О.В. Гідравліка. Северодонецьк: СХУ ім. В. Даля, 2017. 160 с. Транслитерация Sokolov V., Krol O., Yepifanova O. Hydraulics. Severodonetsk: V. Dahl EUNU, 2017. 160
8. Sokolov, V., Krol, O., Baturin, Y.: Dynamics Research and Automatic Control of Technological Equipment with Electrohydraulic Drive. 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE (2019). DOI: <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867652>
9. Sokolov, V.: Transfer functions for shearing stress in nonstationary fluid friction. In: Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 707-715. Springer, Cham (2020). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22041-9_76.

References

1. Cherepin V.T., Vasiliev M.A. Methods and instruments for the analysis of the surface of materials. Kiev, 1982. 400 p.
2. Cherepin V.T. Ionic microprobe analysis. Kiev, 1992.344p.

3. Ivasishin O.M., Cherepin V.T., Kolesnik V.N., Gumenyak N.M. An automated dilatometric system: Instruments and Experimental-Techniques 53 (3), 2010. С 457-460.
4. Shapovalova E.N., Pirogov A.V. Chromatographic methods of analysis. Moscow, publishing house of Moscow State University. M.V. Lomonosov, 2007. 120 p.
5. A.S. SU 1527677 A1 USSR, MKI4 H 01 J 49/40 Time-of-flight mass spectroscopic setup / Chernikov N.G., Shcherbakov Yu.I. No. 4184721 / 24-21; declared 01/26/87; publ. 07.12.89. Bul. No. 45.
6. Chernikov M.G., Chernikova I.D. Visokovacuurniy nanometric complex spectrometer. : Visnik Skhidnoukr. nat. university im. V. Dahl, 2020.No. 4 (260), S. 144-148. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-144-148>
7. Sokolov V.I., Krol O.S., Apifanova O.V. Gidravlika. Severodonetsk: SNU ім. V. Dahl, 2017. 160 p. Transliteration Sokolov V., Krol O., Yepifanova O. Hydraulics. Severodonetsk: V. Dahl EUNU, 2017. 160 p.
8. Sokolov, V., Krol, O., Baturin, Y. : Dynamics Research and Automatic Control of Technological Equipment with Electrohydraulic Drive. 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE (2019). DOI: <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867652>.
9. Sokolov, V. : Transfer functions for shearing stress in nonstationary fluid friction. In: Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 707-715. Springer, Cham (2020). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22041-9_76.

Черников Н.Г., Черникова И.Д., Черникова Е.Н., Гордеев В.В. Времяпролетная масс-спектрометрическая установка

Потребность техники и технологий привели к резкому ускорению опытно-конструкторских и научно-исследовательских работ для изучения в сверхвысокой вакуумной среде как поверхностных, так и объемных свойств твердых тел. Как известно, на поверхностные свойства твердых тел в значительной степени влияют адсорбционные процессы, обусловленные окружающей средой, то есть элементарным составом газа, находящегося в вакуумной системе. Атомы и молекулы газа отличаются своей массой, следовательно их можно идентифицировать этой физической величиной. Поэтому масс-спектрометрия, как метод анализа состава сложных смесей и их идентификации по массам, является одним из наиболее эффективным для определения молекулярной массы газа, его состава и структуры. В данной работе предложена времяпролетная масс-спектрометрическая установка с повышенным быстродействием, точностью и надежностью измерения масс газа в вакуумной системе, а это дает возможность проводить более качественный анализ адсорбционных процессов на поверхности твердого тела.

Ключевые слова: масс-спектр, вакуум, генератор импульсов, блок сравнения, интегратор, индикатор

Chernikov M.G., Chernikova I.D., Chernikova O.M., Gordieiev V.V. Time of flight mass spectrometric installation

The need for technology and technology has led to a sharp acceleration of experimental design and research work to study in an ultrahigh vacuum environment, both surface

and bulk properties of solids. The accumulation of basic knowledge about surfaces, especially semiconductor materials, makes it possible to develop modern semiconductor devices in electronics and microelectronics. In this work, a time-of-flight mass spectrometric setup is proposed, the use of which makes it possible to obtain objective information about such processes as adsorption and desorption on the surface of semiconductors. Mass spectrometry is a physical method for analyzing the composition of complex mixtures of substances and identifying individual substances in them by their mass spectra. The mass spectrum is obtained as a result of ionization of substances, separation of ions according to their mass numbers (the ratio of the mass of an ion to its charge) and measurement of the intensity of ion currents for all ions. The mass spectrum allows conclusions to be drawn about the molecular weight of the sample, its composition and structure. The study of adsorption processes makes it possible to qualitatively change the conditions on the surface of semiconductors, which in turn change the energy spectrum of electrons in the near-surface region and leads to the production of both efficient photocathodes with negative electron affinity and an MIS structure with specified parameters. The novelty of this setup lies in the fact that, along with the existing standard units, blocks and devices (a rectangular pulse generator that controls the power supply of an electron gun, an ion source, an electron multiplier for registering ions by masses, a pulse broadband amplifier, a gate signal delay unit, valve, integrator and indicator) are used in order to increase the speed, accuracy and reliability of measurements. Recommended additionally a waiting square-wave generator, two pulse expanders and a comparison unit, while the input of the waiting square-wave generator is connected to the output of the master pulse generator, and its two outputs are connected to the inputs of pulse expanders, the outputs of which are connected to the inputs of the comparator connected with their output to the stroboscopic signal delay unit, they can qualitatively improve the operation of the installation.

Key words: mass spectrum, vacuum, pulse generator, comparison unit, integrator, indicator.

Черников Микола Григорійович – к.фіз.-мат.н., доц., доцент, кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк), chernikov_n_g@ukr.net

Черникова Ірина Дем'янівна – ст. викл. кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк), chernikova_i_d@ukr.net

Черникова Олена Миколаївна – бакалавр, студент групи ПМЕ-20д, факультет інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) chernikovahm@gmail.com

Гордеев Владислав Валентинович – магістр, студент групи ГМ-20дм, факультет Інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) gornyac007@gmail.com

Стаття подана 08.02.2021 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-178-181>

УДК 681.585.58+681.7.069.3

КВАНТОВИЙ ВИХІД ФОТОЕМІСІЇ І МЕТОДИ ЙОГО ВИМІРЮВАННЯ

Чернікова І.Д., Черніков М.Г., Чернікова О.М., Недобіга В.О.

PHOTOEMISSION QUANTUM OUTPUT AND METHODS OF ITS MEASUREMENT

Chernikova I.D., Chernikov M.G., Chernikova O.M., Nedobega V.O.

Останнім часом досягнуто значного прогресу в розробці інтенсивних джерел випромінювання і нових оптичних елементів для вакуумної ультрафіолетової частини спектру (ВУФ). Цей прогрес послужив основою для розвитку багатьох перспективних практичних додатків: рентгенолітографія, рентгенівської голографії, мікроскопії та ін. Для розвитку цих напрямків, зокрема для оптимізації параметрів джерел і вибору оптичних елементів, необхідні якісні кількісні (абсолютні) вимірювання характеристик випромінювання. Однак проведення таких вимірювань в ВУФ діапазоні спектра є досить складним завданням. Справа в тому, що в цьому діапазоні спектра всі речовини володіють великим і сильно мінливим, залежно від довжини хвилі, поглинанням. Тому всі детектори випромінювання вимагають незалежного калібрування по еталонному джерелу у всьому діапазоні довжин хвиль, так як їх чутливість залежить від властивостей і чистоти поверхні, яка поглинає. У представленій роботі показана методика фотометрії монохроматичного випромінювання в ультрафіолетовій області спектра, використовуючи два прилади: калібрований термостолбик і фотоелектронний помножувач, вікно якого покрито тонким шаром саліцилової-кислого натрію.

Ключові слова: фотоелектронний помножувач, фотокатод, фотон, монохроматичне випромінювання, квант світла, термостолбик

Вступ. Всі детектори випромінювання вимагають незалежного калібрування по еталонному джерелу у всьому діапазоні довжин хвиль, так як їх чутливість залежить від властивостей і чистоти поверхні, яка поглинає це випромінювання.

Специфіка оптичних і фотоелектричних вимірювань накладає певні вимоги до джерел світла.

По-перше, вони повинні мати однакову яскравість по всій площі поверхні випромінювання світлового потоку.

По-друге, потік променевої енергії повинен бути стабільним в часі, і мав би настільки малими флуктуаціями, щоб в рамках помилок експерименту не впливав на результати самого експерименту.

По-третє, інтенсивність потоку світла, який протікає через площу поверхні вхідної щілини монохроматора повинна бути величиною постійною.

Крім цього, необхідно знати інтенсивність повного спектра монохроматичного випромінювання джерела світла.

Метою роботи є визначення інтенсивності монохроматичного випромінювання для вимірювання спектрального розподілу квантового виходу фотоемісії з поверхні твердих тіл.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основним недоліком як оптичної, так і фотоелектронної спектроскопії є джерела світла, в яких потік променевої енергії, як завжди, проявляє нестабільність при проведенні експериментів. В роботі [1] наведено описи і конструкцію високовольтної водневої лампи, як джерела ультрафіолетового випромінювання в діапазоні енергії до 11 еВ, яка використовується в фотоелектронній і оптичній спектроскопіях. Показана висока якість і надійність цієї водневої лампи, як джерела світлового випромінювання, при використанні її в фотоелектронній спектроскопії.

Вимірювання загальної кількості радіації, що потрапила на досліджувану систему (фотоемітер), називається актинометрією. При вивченні фотоемісії необхідно знати повну кількість монохроматичної світлової енергії, що потрапила на фотоемітер. Одним з типів актинометрії є термостолбик, що представляє собою групу термопар, у яких певні кінці притиснуті до чорної поверхні (поверхня покрита платиновою чорню). Термостолбик – система термопар, з'єднаних послідовно і служить для посилення термоелектричного ефекту. При вимірюванні монохроматичного випромінювання термостолбик поміщають за вихідною щілиною монохроматора і вимірюється інтенсивність монохроматичного випромінювання, яке виходить з монохроматора.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для вивчення фотоемісії з поверхні твердого тіла

необхідно експериментально дослідити два види характеристик: 1) спектральний розподіл квантового виходу фотоemisії $Y(h\nu)$; 2) енергетичний розподіл фотоелектронів $N(E)$.

Оскільки квантовий вихід фотоemisії при даній енергії фотона

$$h\nu = hc / \lambda \quad (1)$$

де h – постійна Планка; c – швидкість світла; ν – частота світлової хвилі; λ – довжина хвилі, визначається відношенням повного числа фотоелектронів N_e до повного числа збуджуючих їх фотонів N_ϕ з цією енергією $h\nu$,

$$Y(h\nu) = N_e / N_\phi \quad (2)$$

для вивчення спектрального розподілу квантового виходу необхідно вимірювати повний фототок з емітера

$$I_s = N_e \cdot e \quad (3)$$

де e – заряд електрона; N_e – число емітованих електронів з досліджуваного зразка

Інтенсивність випромінювання, що падає на катод з монохроматора, тобто число падаючих фотонів N_ϕ , яке випливає з формули (2), необхідно знати для визначення спектральних характеристик квантового виходу з фотоemisітера. Інтенсивність монохроматичного випромінювання визначалася за допомогою термoelementa із заданою чутливістю.

Вимірювання інтенсивності монохроматичного світла термостолбіком можливо проводити у видимій області спектра, де досить інтенсивне випромінювання. Застосування термостолбіка в ультрафіолетовій області монохроматичного спектру було ускладнено через наявність малих інтенсивностей окремих спектральних ліній.

В даній час для вимірювання інтенсивності ультрафіолетового світла користуються високочутливими приймачами випромінювання, переводячи ультрафіолетове випромінювання в видиме за допомогою різних люмінесцируючих речовин, люмінесценція з яких підкоряється закону С.І. Вавилова, наприклад, саліцилово-кислий натрій $\text{NaC}_7\text{H}_5\text{O}_3$. Саліцилово-кислий натрій – це білий кристалічний порошок неприємного солодкуватого смаку, без запаху. Розчинний у воді, спирті, гліцерині.

Головна перевага цього методу полягає в тому, що він не вимагає джерела світла з відомим розподілом енергії по спектру, як еталону для градування в ультрафіолетовій області спектра. У таких речовин, як саліцилово-кислий натрій $\text{NaC}_7\text{H}_5\text{O}_3$, люмінесценція з якого при опроміненні його ультрафіолетовим світлом підкоряється закону С.І. Вавилова, світловий вихід люмінесценції $Y_{\text{фл}}$ пропорційний довжині хвилі збудливого ультрафіолетового випромінювання

$$Y_{\text{фл}} = \frac{I}{I_0} = a \cdot \lambda \quad (4)$$

де a – const; I – інтенсивність люмінесценції при поглинанні енергії подає ультрафіолетового потоку світла I_0 .

Так як енергія падаючого монохроматичного ультрафіолетового потоку світла I_0 дорівнює добутку енергії кванта світла $h\nu$ на число квантів N_ϕ , тобто число фотонів, то

$$I = a \cdot \lambda I_0 = N_\phi h\nu a \cdot \lambda = achN_\phi \quad (5)$$

де c – швидкість світла

Звідси видно, що вимірюючи інтенсивність люмінесценції, можна отримати число фотонів N_ϕ ультрафіолетового випромінювання, що збуджують цю люмінесценцію.

Інтенсивність люмінесценції важко або, як в нашому випадку, не можливо виміряти за допомогою термостолбіка, з огляду на те, що ця інтенсивність дуже мала. Однак спектри люмінесценції багатьох люмінофорів, в тому числі і саліцилово-кислого натрію, не залежать від енергії фотонів збуджуючого ультрафіолетового світла. Це дає можливість для вимірювання відносної інтенсивності люмінесценції використовувати відповідний фотопомножувач або фотоелемент. Вимогою до останніх буде висока чутливість в області спектра випромінювання люмінофору і лінійна залежність величини фотоструму фотопомножувача (фотоелемента) від числа фотонів, що падають на фотокатод. Таким чином, за допомогою люмінофора і фотопомножувача можна вимірювати відносну інтенсивність люмінесценції і, отже, відносне число квантів збуджуючого ультрафіолетового випромінювання.

Абсолютне значення інтенсивності монохроматичного ультрафіолетового випромінювання можна визначити з порівняння струму фотопомножувача, який використовувався для вимірювання відносної інтенсивності з використанням люмінофора, з ЕРС градуйованого термостолбіка для якої-небудь ділянки спектра монохроматора, зручного для вимірів інтенсивності випромінювання обома приладами.

У даній роботі в якості люмінофора використовувався саліцилово-кислий натрій, який досліджувався раніше в роботі [2]. У цій роботі показано, що квантовий вихід $\text{NaC}_7\text{H}_5\text{O}_3$ в широкому інтервалі довжин хвиль від 3400Å до 500Å постійний. Саліцилово-кислий натрій $\text{NaC}_7\text{H}_5\text{O}_3$ розчинявся в спирті і розчин наносився на вікно фотомножувача. Товщина шару люмінофора становила приблизно 30 мк [2], що є оптимальною товщиною.

Для вимірювання малих світлових потоків використовують фотопомножувач. (ФЕП). Як фотоелементи, так і фотопомножувачі є основними

приймачами випромінювання при роботі з монохроматорами. Випромінювання, що виділяється з вихідної щілини монохроматора, направляється на вхідне вікно фотопомножувача, покритого в нашому випадку шаром люмінофору.

Спектр люмінесценції саліцилово-кислого натрію має максимальну інтенсивність в області довжини хвилі 4500Å . Тому в якості приймача люмінесцентного випромінювання використовувався фотопомножувач ФЕП-19М, у якого фотокатод має найбільший квантовий вихід емісії в області довжин хвиль 4200Å . Таким чином, припускаючи, що ультрафіолетове світло повністю поглинається шаром люмінофора (причому перетворений світло поглинається незначно) можна вважати, що струм ФЕП-19М пропорційний числу падаючих квантів ультрафіолетового випромінювання

Для проведення абсолютних вимірювань в ВУФ області спектра (10 – 100 нм) був використаний аналогічний простий люмінесцентний детектор [3], абсолютна калібрування якого здійснювалася, на відміну від нашого випадку, УФ ексимерним лазером. Детектор був ФЕП, перед яким розташовується екран-пластина з шаром люмінофора, спостереження проводилися в прохідному світлі. В якості люмінофора використовували саліцилово-кислий натрій $\text{NaC}_7\text{H}_5\text{O}_3$.

Монохроматичне випромінювання з монохроматора, пройшовши через лінзу, потрапляло на вікно ФЕП-19М, з нанесеним на нього люмінофором товщиною $\square 30$ мк. Показання ФЕУ-19М давали відносне число квантів ультрафіолетових спектральних ліній. Для того, щоб отримати абсолютне число квантів світла, свідчення ФЕУ-19М при $\lambda = 2650\text{Å}$ порівнювався з ЕРС термостолбика при тій же довжині хвилі $\lambda = 2650\text{Å}$ (чутливість термостолбика в цій області спектра достатня для вимірювання інтенсивності спектральної лінії цієї довжини хвилі). За абсолютною інтенсивності при $\lambda = 2650\text{Å}$ визначали число квантів для цієї лінії і звідси – число квантів для інших ліній. Числа фотонів N_ϕ для різних ліній спектра водневої лампи [1], отримані таким чином, використовувалися нами при вивченні спектрального розподілу квантового виходу в роботах [4, 5, 6].

Висновки. У представленій роботі показана методика визначення інтенсивності монохроматичного випромінювання для вимірювання спектрального розподілу квантового виходу фотоemisії з поверхні твердих тіл в ультрафіолетовій області спектра, використовуючи два прилади: калібрований термостолбик і фотоелектронний помножувач, вікно якого покрито тонким шаром саліцилово-кислого натрію.

Література

1. Черніков М.Г., Чернікова О.М., Гордєєв В.В. Воднева лампа як джерело ультрафіолетового випромінювання в фотоспектроскопії. IV Международная научно-практическая конференция «PRIORITY DIRECTINS OF SCIENCE AND TECHNOLOGY DEVELOPMENT» 20 – 22 декабря 2020 года, Киев, Украина
2. Ананьева Л.И., Шишловский А.А. Спектр люминесценции саліцилово-кислого натрия ДАН, СССР, 17, 1937. С. 183–186.
3. Шевелько А.П. Абсолютные измерения в ВУФ области спектра с помощью люминесцентного детектора. Квантовая электроника, 23. №8, 1996. С 748-750.
4. Кулышев А.М., Черникова И.Д., Черников Н.Г. Влияние состояния поверхности полупроводников на работу фотодетекторов. Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля, 2016. №2 (226), С. 112 – 123.
5. Черников Н.Г., Черникова И.Д. Исследование адсорбции германия на поверхность арсенида галлия фотоэмиссионным методом Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля, 2017. № 6 (237), С. 133–138
6. Черніков М.Г., Чернікова І.Д., Алієв В.Є. Дослідження адсорбції барію на поверхню арсеніду галію фотоemisійним методом. Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля, 2019. № 1 (249), С. 114–124. ISSN 1998-7927

References

1. Chernikov M.G., Chernikova O.M., Gordeev V.V. Vodneva lamp yak dzherelo ultraviolet viprominuvannya in photospectroscopy. IV International Scientific and Practical Conference "PRIORITY DIRECTINS OF SCIENCE AND TECHNOLOGY DEVELOPMENT" December 20 - 22, 2020, Kiev, Ukraine
2. Ananyeva L.I., Shishlovsky A.A. Luminescence spectrum of salicylic acid sodium DAN, USSR, 17, 1937. pp. 183–186.
3. Shevelko A.P. Absolute measurements in the VUV region of the spectrum using a luminescent detector. Quantum electronics, 23. No. 8, 1996. P 748-750.
4. Kulyshv A.M., Chernikova I.D., Chernikov N.G. Influence of the state of the semiconductor surface on the operation of photodetectors. Bulletin of the Skhidnoukrainian National University IM. V. Dahl, 2016. No. 2 (226), S. 112 - 123.
5. Chernikov N.G., Chernikova I.D. Investigation of the adsorption of germanium on the surface of gallium arsenide by the photoemission method Bulletin of the Skhidnoukrainian National University IM. Dahl, 2017. No. 6 (237), pp. 133–138
6. Chernikov M.G., Chernikova I.D., Aliev V.E. Adsorption of adsorption pressure on the surface of the arsenide galley by a photo-efficient method. Bulletin of the Skhidnoukrainian National University IM. V. Dalya, 2019. No. 1 (249), P. 114–124. ISSN 1998-7927

Черникова И.Д., Черников Н.Г., Черникова Е.Н., Недобега В.А. Квантовый выход фотоemisсии и методы его измерения

В последнее время достигнут значительный прогресс в разработке интенсивных источников излучения и новых оптических элементов для вакуумной ультрафиолетовой области спектра (ВУФ). Этот

прогресс послужил основой для развития многих перспективных практических приложений: микроскопии, рентгеновской голографии, рентгенолитографии, микроэлектроники, и др. Для развития этих направлений, в частности для оптимизации параметров источников и выбора оптических элементов, необходимы качественные количественные (абсолютные) измерения характеристик излучения. Однако проведение таких измерений в ВУФ диапазоне спектра является достаточно сложной задачей. Дело в том, что в этом диапазоне спектра все вещества обладают большим и сильно меняющимся в зависимости от длины волны поглощением. Поэтому все детекторы излучения требуют независимой калибровки по эталонному источнику во всем диапазоне длин волн, так как их чувствительность зависит от свойств и чистоты поглощающей поверхности. В представленной работе показана методика фотометрии монохроматического излучения в ультрафиолетовой области спектра, используя два прибора: калиброванный термостолбик и фотоэлектронный умножитель, окно которого покрыто тонким слоем салицилово-кислого натрия.

Ключевые слова: фотоэлектронный умножитель, фотокатод, фотон, монохроматическое излучение, квант света, термостолбик.

Chernikova I.D., Chernikov M.G., Chernikova O.M., Nedobega V.O. Photjmission quantum output and its measurement

Recently, significant progress has been made in the development of intense radiation sources and new optical elements for the vacuum ultraviolet spectrum (VUV). This progress served as the basis for the development of many promising practical applications: X-ray lithography, X-ray holography, microscopy, etc. To develop these areas, in particular, to optimize the parameters of sources and the choice of optical elements, qualitative quantitative (absolute) measurements of radiation characteristics are required. However, carrying out such measurements in the VUV spectral range is a rather difficult task. The fact is that in this range of the spectrum, all substances have a large and strongly varying absorption depending on the wavelength. Therefore, all radiation detectors require independent calibration against a reference source in the entire wavelength range, since their sensitivity depends on the properties and purity of the absorbing surface. When studying photoemission, it is necessary to know the total amount of monochromatic light energy received by the photoemitter. One of the types of actinometer is a thermo-column, which is a group of thermocouples with certain ends pressed against a black surface. When measuring monochromatic radiation, the thermal column is placed behind the exit slit of the monochromator and the intensity of the output radiation is

measured. The luminescence intensity is difficult or, as in our case, cannot be measured with a thermal column, since this intensity is very low. However, the luminescence spectra of many phosphors, including salicylic acid sodium, do not depend on the photon energy of the exciting ultraviolet light. This enables a suitable photomultiplier or photocell to measure the relative intensity of the luminescence. The requirement for the latter will be a high sensitivity in the emission region of the phosphor and a linear dependence of the photomultiplier photocurrent on the number of photons incident on the photocathode. Thus, with the help of a phosphor and a photomultiplier, it is possible to measure the relative intensity of the luminescence and, consequently, the relative number of quanta of exciting ultraviolet radiation. The absolute intensity of monochromatic ultraviolet radiation can be determined by comparing the current of the photomultiplier, which was used to measure the relative intensity using a phosphor, with the emf of a graduated thermal column for any part of the spectrum of the monochromator, convenient for measuring the radiation intensity with both devices. The presented work shows a technique for photometry of monochromatic radiation in the ultraviolet region of the spectrum using two devices: a calibrated thermal column and a photomultiplier tube, the window of which is covered with a thin layer of salicylic acid sodium.

Key words: photomultiplier tube, photocathode, photon, monochromatic radiation, quantum of light, thermal column.

Черніков Микола Григорійович – к.фіз.-мат.н., доц., доцент, кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк), chernikov_n_g@ukr.net

Чернікова Ірина Дем'янівна – ст. викл. кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк), chernikova_i_d@ukr.net

Чернікова Олена Миколаївна – бакалавр, студент групи ПМЕ-20д, факультет інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) chernikovahm@gmail.com

Недобіга Владислав Олександрович – магістр, студент групи ГМ-20дм, магістр, студент групи ГМ-20дм, факультет Інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) nedobega98@gmail.com

Стаття подана 08.02.2021 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-182-187>

УДК 66.094

ЗАСТОСУВАННЯ САМОУСМОКТУВАЛЬНИХ МІШАЛОК ПРИ СУЛЬФУВАННІ ВУГЛЕВОДНІВ

Шабрацький С.В., Шабрацький В.І.

THE USE OF SELF- SUCTION MIXERS IN THE SULFONATION OF HYDROCARBONS

Shabratsky S.V., Shabratsky V.I.

Наведені результати дослідження роботи технологічної схеми сульфування алкилбензолів газоподібним сірчанім ангідридом. На підставі аналізу роботи установки та опрацьованих літературних даних розроблені сульфуратори об'ємного типу для отримання сульфонолу НП-3. Отримані результати експериментальних досліджень, дозволяють змодельовати промислову установку для газорідних процесів, зокрема для процесу сульфування. Зроблена спроба довести, що використання апаратів з барботерами, для вводу газового реагенту для екзотермічної реакції сульфування в системі газ-рідина є ресурснозатратним та громіздким в апаратурному оформленні.

Ключові слова: сульфування, самоусмоктувальна мішалка, масообмінний апарат, система газ – рідина.

Вступ. Механічні процеси, що відбуваються в апаратах з мішалками досить різноманітні. Це стало ключовим фактором для великої кількості гідродинамічних досліджень цих апаратів. Зважаючи на складність процесів перемішування, що зумовлена труднощами фізичного аналізу механізмів процесів та явищ, що відбуваються у робочому середовищі апарату, а також відсутності надійної вимірювальної техніки, методи розрахунку промислових апаратів досить довгий час носили наближений характер. Це призводило до істотних помилок при проектуванні та експлуатації промислового обладнання, яке не завжди забезпечувало досягнення необхідних технологічних параметрів і як наслідок – потрібної якості цільового продукту.

Питанню гідродинаміки в об'ємних апаратах з ежекційними самоусмоктувальними мішалками недостатньо приділяється уваги, незважаючи на потреби хімічної та нафтопереробної промисловості в таких апаратах, проте актуальність і необхідність їх впровадження в виробництва, які супроводжуються ендотермічними хімічними реакціями між газовими реагентами і рідиною,

наприклад: окислення, озонування, сульфування та хлорування, диктується вимогами державних та міжнародних організацій з охорони навколишнього середовища. Поява новітніх вдосконалених розробок реакторів з самоусмоктувальними ежекційними мішалками безпосередньо призначених для проведення певних технологічних процесів уповільнюється у впровадженні в технологічне виробництво в наслідок відсутності теоретичного обґрунтування процесу усмоктування газового реагенту мішалками та алгоритму розрахунку таких апаратів.

Велика конструктивна різноманітність перемішувачих пристроїв, в тому числі й самоусмоктувальних мішалок, що використовуються в апаратах об'ємного типу для проведення процесів ферментації, абсорбції та хемосорбції, окислення під час культивування мікроорганізмів на вибухонебезпечних газових сумішах свідчить про сучасний попит на подібне технологічне обладнання для промисловості. Згідно відомим теоретичним даним [1, 2] ефективність використання цих мішалок залежить в основному від продуктивності їх по газовій фазі, яка в свою чергу залежить від геометричних параметрів та частоти обертання. Підвищення продуктивності за рахунок збільшення цих показників приводить до збільшення витрат на перемішування. Насосна продуктивність по газовій фазі, яка усмоктується через порожнину мішалки, властива тільки для самоусмоктувальних мішалок. Вона є основним параметром при розрахунках та конструюванні газорідних апаратів.

Для процесів пов'язаних з проведенням екзотермічних реакцій в промисловості використовуються спеціальні мішалки [3 – 9]. Вони виконують роль інтенсивних змішувачів різних хімічних реагентів та диспергують газовий реагент у вигляді бульбашок в реакційний об'єм. Використання їх в реакторах гальмується внаслідок

відсутності простого алгоритму розрахунку насосної газової продуктивності.

Особливо актуальним є використання таких апаратів для проведення газорідних швидких екзотермічних реакцій, наприклад, сульфурвання алкілбензолів газоподібним сірчанам ангідридом суміші з повітрям та інших газорідних процесів, що супроводжуються хімічною реакцією.

Дослідження методів підвищення продуктивності та ефективності апаратів з самоусмоктувальними мішалками та їх реалізація в багатьох технологічних процесах хімічної технології дають підставу вважати, що вивченню гідродинаміки і фізичної суті процесів, що протікають, приділяється ще недостатньо уваги. Вирішення проблеми технічного вдосконалення апаратів в хімічній промисловості може йти шляхом розробки апаратів великої одичної потужності або інтенсифікації процесів хімічної технології та створення принципово нового вискоелективного устаткування.

Метою даної роботи є дослідження підвищення продуктивності реакційного апарату за рахунок зміни конфігурації перемішувача пристрою.

Експериментальна частина. Проведений огляд та аналіз теоретичних та експериментальних даних з гідродинаміки газорідних апаратів показав, що на сьогоднішній день в промисловості для проведення газорідних реакцій в масообмінних процесах, широко застосовують об'ємні апарати з перемішувачами пристроями з подачею газового реагенту через барботер або апарати об'ємного типу з самоусмоктувальними мішалками. Останні реактори є більш перспективними внаслідок того, що самоусмоктувальні ежекційні мішалки, крім впровадження інтенсивної турбулізації перемішувача об'єму, здатні одночасно виконувати функцію пристрою, що приводить до руху газовий реагент і подає його безпосередньо в зону реакції, виконуючи роль рухомого барботера. Самоусмоктувальні ежекційні мішалки представляють собою порожнистий ротор, на твірній поверхні якого розташовані прорізи з привареними порожнистими лопатями. В середині ротору мішалки може розміщатися ежекційний диск, що поділяє внутрішній простір ротору на дві частини, а також вхідний канал в порожнисті лопаті з певною пропорцією. Такі конструкції самоусмоктувальних ежекційних мішалок дозволяють проводити процеси пов'язані з поглинанням газів рідиною і масообмінні процеси, що супроводжуються хімічною реакцією, наприклад: сульфурвання, хлорування, озонування та ін. В нашому випадку вони застосовуються для процесу сульфурвання.

Випробування гідродинаміки газорідних систем в апаратах з самоусмоктувальними мішалками є метою визначення насосної продуктивності по газу і рідині в залежності від

особливостей конструкції мішалок, середнього та локального газовмісту і умовної поверхні контакту фаз в перемішувачу середовищі апарату та розробка методики гідродинамічного розрахунку об'ємних апаратів з самоусмоктувальними ежекційними пристроями.

Для визначення впливу основних геометричних форм та параметрів самоусмоктувача ежекційних мішалок на їх насосну продуктивність по газовій фазі та рідині на експериментальному стенді, схема і фото якого представлена на (рис. 1) і (рис. 2), були проведені гідродинамічні випробування самоусмоктувача ежекційних мішалок з різними геометричними формами лопаті мішалки. Схема експериментального стенду (рис. 1) включає в себе апарат об'ємного типу 1 з самоусмоктувальним ежекційним пристроєм, електронний стробоскопічний тахометр 2 для контролю частоти обертання валу мішалки, газовий лічильник 3, ротаметр 4 та проміжний прозорий стакан 5, призначений для вимірювання кількості рідини, що усмоктується мішалкою, кран 6, призначений для включення роботи апарату в періодичному або безперервному режимі по рідині та регулюючий вентиль 7, який дозволяє підтримувати рівень води в проміжному стакані 5 таким, що дорівнює висоті газорідної суміші в апараті 1. Обертання валу самоусмоктувальної мішалки забезпечувалося за допомогою електродвигуна постійного току 8, який дозволяє регулювати частоту обертання в широкому діапазоні частот.

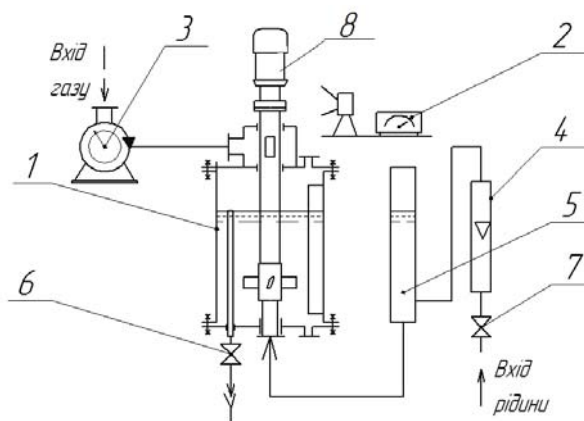


Рис. 1. Схема експериментального стенду для проведення гідродинамічних випробувань в апараті об'ємного типу з самоусмоктувачами ежекційними мішалками:

- 1 – апарат об'ємного типу з самоусмоктувачою мішалкою;
- 2 – електронний стробоскопічний тахометр;
- 3 – газовий лічильник;
- 4 – ротаметр для рідини;
- 5 – проміжний прозорий стакан;
- 6 – кран;
- 7 – регулюючий вентиль;
- 8 – електродвигун

Випробування проводили на пристроях для перемішування, що мають 4 та 6 порожнистих лопатей з однаковими геометричними параметрами (діаметр ротора, діаметр пристрою для перемішування рідин, перетин лопаті на виході).

Для контролю продуктивності самоусмоктуючої ежекційної мішалки по рідині кран 6 переводиться в положення «відкрито», яке відповідає роботі апарату в безперервному режимі, забезпечуючи відведення із об'єму апарату надлишку рідини через переливну трубку і, як наслідок, зберігати її постійний рівень в апараті. В схемі експериментальної установки передбачено проведення дослідів в режимі безпосереді з подачі рідини в нижню циліндричну частину самоусмоктувальної мішалки. Для цього конструкцією апарату було передбачено використання спеціального ущільнення, яке запобігає потраплянню води з напірного стакану 5 в об'єм, що перемішується.

При збільшенні частоти обертання мішалки, внаслідок самоусмоктуючого ефекту, рідина, що надходить з проміжного стакану 5 в порожнину нижньої частини мішалки потрапляє через щілинні отвори в порожнисті лопаті і далі в перемішуваче середовище. Зменшення висоти рівня рідини в проміжному стакані 5 компенсувалося відкриттям регулюючого вентиля 7 і контролювали за допомогою ротаметру 4. Продуктивність мішалки по газовій фазі контролювали за допомогою газового лічильника 3 і секундоміру.



Рис. 2. Фото експериментального стенду для проведення випробувань самоусмоктувальних ежекційних мішалок

Пристрій для перемішування рідин (рисунок 3) складається з порожнистого циліндричного ротора 1 з осьовим входним каналом 2, на твірній поверхні ротора є прорізи 3 з закріпленими радіальними порожнистими лопатями 4 циліндричної форми з вихідними отворами 5, на фронтальній поверхні лопаті вхідний канал має округлу форму, радіус якої

складає 0,5-1,0 діаметр лопаті. На рисунку 1 вид А-А позначений поперечний перетин пристрою для перемішування рідин та його (Б) збільшене зображення з вказівкою радіуса округлення. За допомогою циліндра 6, розташованого в верхній частині, пристрій закріплюється на валу реактора.

В період проведення лабораторних випробувань було виготовлено два типи роторів, які відрізнялися конфігурацією вхідного каналу в порожнисті лопаті: з прямими вхідними кромками та зі зміненою конфігурацією вхідної кромки, що прилягає до лобової поверхні порожнистої лопаті.

Ці мішалки, в разі необхідності, можуть працювати в режимі самоусмоктування по газовій фазі, по рідині або в режимі газ-рідина, для цього в самоусмоктуючих мішалках перекривалися газовий або рідинний канали за допомогою гумової пробки.

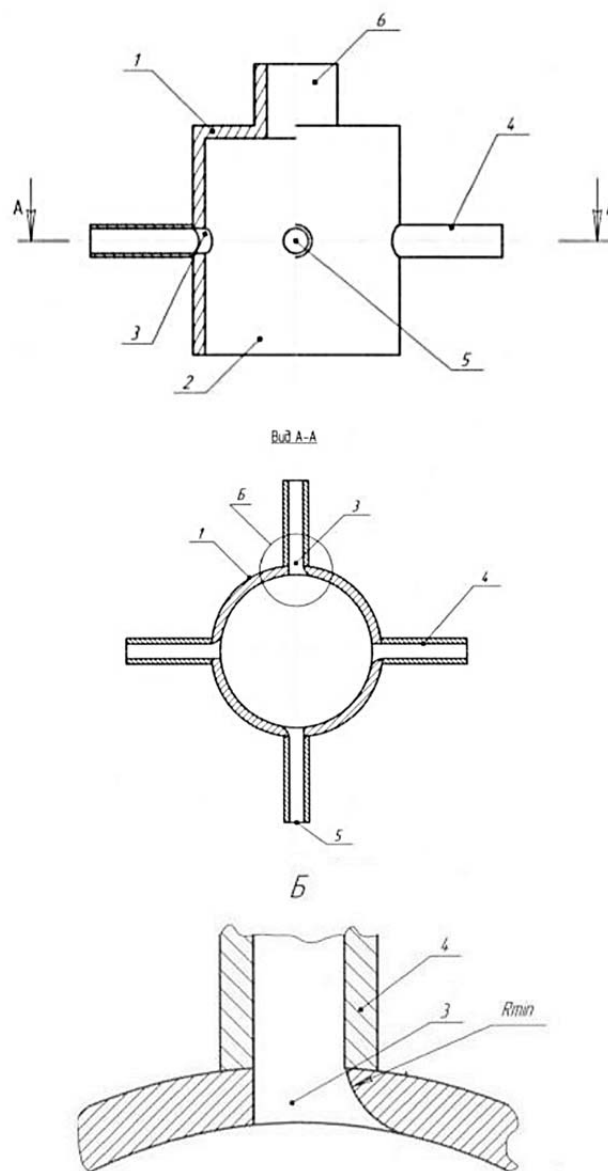


Рис. 3. Пристрій для проведення газорідинних реакцій

Опис матеріалу дослідження. Довголанцюгові алкілбензолсульфонати мають промислове значення, як поверхнево активні речовини. Алкілбензоли отримують алкуванням бензолу альфаолефінами з взаємодією хлориду алюмінію. Суміш, яка утворилась розподіляють на фракції. Одна фракція іде на отримання водорозчинних сульфонатів, інша – для отримання рідинамастилорозчинних сульфонатів. Рухома сила розділення фракцій є різниця температур, при якій утворюється кожна з фракцій.

Основною стадією, виробництва алкілбензолсульфонатів, що впливає на кінцевий продукт є сульфування вуглеводнів. В промисловості відомі різні способи отримання сульфування, в яких в якості сульфуючого агента застосовують сірчану кислоту, олеум, розчин сірчаного ангідриду в сірчастому ангідриді, сірчаній ангідрид в суміші з інертним газом або повітрям [10 – 12]. Цей спосіб отримав найбільш широкий вжиток завдяки цілому ряду переваг, серед яких слід відзначити відсутність стічних вод та відносну простоту апаратурно-технологічного оформлення процесу.

Відомо декілька способів сульфування алкілбензолів, в тому числі і газоподібним сірчанним ангідридом. Проте, тут існує недолік. Реакція сульфування є екзотермічною реакцією під час проведення якої виділяється велика кількість тепла і існує проблема відведення цього тепла з зони реакції, а також різке підвищення в'язкості цільового продукту. В апаратах з використанням барботеру для вводу газового реагенту це може призводити до адгезії на внутрішній стінці барботеру і як наслідок зниження якості цільового продукту. Дослідження промислової установки отримання сульфонолу з алкілбензолів шляхом сульфування газоподібним сірчанним ангідридом з наступною стадією нейтралізації [13], показало, що в сульфураторі не витримується необхідний температурний режим, що веде до погіршення цільового продукту. Цьому також сприяють збільшення часу перебування реакційної маси в зоні контакту фаз і як наслідок, відбуваються небажані побічні перетворення вуглеводнів з утворенням гудрону та коксу. Для ліквідації цього явища застосовують турбулізатори, наприклад, ротор з флажковими мішалками, однак їх використання в кінцевому випадку призводить до пересульфування вуглеводнів та зниженню виходу кінцевого продукту. Постійне забивання сульфуратора порушують стабільність роботи технологічної системи.

Аналіз роботи промислової установки дозволив сформулювати основні принципи побудови технологічної схеми сульфування алкілбензолів газоподібним сірчанним ангідридом:

- для отримання високого ступеня перетворення та забезпечення ізотермічності процесу потрібно передбачити конструктивне

виконання реактора, що дозволяє здійснювати перетворення за газовим реагентом, близьке до ідеального витіснення при збереженні ізотермічності процесу, що є властиво реактору ідеального змішування;

- для забезпечення стійкості процесу в змінних умовах теплового ефекту реакції та теплофізичних властивостей, передбачити циркуляцію реакційної маси в замкненому контурі з виносним теплообмінником;

- для забезпечення заданої продуктивності установки з урахуванням кінетичних характеристик реакції та динаміки теплообміну передбачити багатоступінчасту технологічну схему процесу сульфування з раціональним розподіленням потоків реагуючих мас та навантажень за ступенями.

Для вирішення поставлених задач були розроблені моделі самоусмоктувальних перемішувачів пристроїв [15], які були досліджені, безпосередньо, на заводській технологічній схемі, яка включає в себе сульфуратор ємнісного типу, проміжну ємність, теплообмінник та циркуляційний насос. Вихідна сировина – сульфокислота зі ступенем перетворення 50% подавалась з цехової установки, а контактний газ – з колектору. Установка працює в безперервному режимі, відвід готової алкілбензолсульфокислоти на нейтралізацію відбувався автоматично завдяки конструкції промислового апарату, зокрема, він оснащений переливною трубкою. За рахунок особливостей конструкції перемішувача пристрою взаємодія реагуючих компонентів відбувається в режимі наближеному до режиму ідеального витіснення. Газорідина реакційна суміш диспергується в реакційній об'єм апарату, де відбувається інтенсивне змішування. При цьому створюються умови, що виключають появу застійних зон, відбувається вирівнювання температури по всьому об'єму сульфуратора.

Висновки. Порівняльні лабораторні випробування попереднього пристрою і запропонованого пристрою для перемішування рідких середовищ проводилися на лабораторному стенді, що дозволяє визначити насосну продуктивність пристроїв для перемішування рідин в режимі усмоктання рідини. При однакових витратах потужності запропоновані пристрої для перемішування рідин мають більшу насосну продуктивність та більший натиск транзитної рідини, яка значно збільшує турбулентність перемішувача об'єму і значно збільшує ефективність процесу перемішування рідин. При використанні запропонованої корисної моделі для проведення масообмінних процесів в системі газ-рідина, наприклад, сульфування газоподібним сірчанним ангідридом алкілбензолів дозволяє усунути застійну зону в порожнині лопаті, а збільшений натиск транзитної рідини і насосної продуктивності мішалки створює комфортні температурні умови для проведення швидких

екзотермічних реакцій, усунути можливість утворення та накопичування пересульфонованих вуглеводнів. Випробування показали, що запропонований пристрій для перемішування рідин підвищує насосну продуктивність по рідині на 70 – 80 %, у випадку проведення реакції між газоподібним сірчанам ангідридом та алкілбензолами фракції 140 – 280 °С були досягнуті умови проведення реакції в м'якому температурному режимі, що дозволило позбутися застійних зон та виникнення пересульфонованих вуглеводнів.

На існуючому виробництві сульфонолу була змонтована дослідно-промислова установка.

Випробування запропонованої технологічної схеми сульфонування з реактором об'ємного типу, що оснащений запропонованим перемішувачем пристроєм, показали, що установка працює в заданому режимі, проста в експлуатації та повністю автоматизована, при цьому ступінь сульфонування досягав 90 – 95%.

Література

1. Соколов В. І., Кроль О. С., Єпіфанова О. В. Гідравліка: навчальний посібник / Северодонецьк: вид-во СНУ ім. В.Далія, 2017. 160с.
2. Штербачек З., Тауск П. Перемешивание в химической промышленности. - Л.: Госхимиздат, 1963. 416с.
3. Войнов Н. А. Современные проблемы и методы биотехнологии: Красноярск : ИПК СФУ, 2009. 418 с.
4. Устройство для смешения жидкости с газом: А. с. 1318271 СССР. Оpubл. 23.06.87, Бюл. № 23.
5. Устройство для аэрации и перемешивания жидкости: А. с. 1165442 СССР. Оpubл. 1985, Бюл. № 25.
6. Смеситель для обработки систем газ-жидкость А. с. 437522 СССР. Оpubл. 1974, Бюл. № 28.
7. Methods of Mixing Liquids and Apparatus therefor . пат 1104032 Великобритания. МПК В01F. опубл. 21.02.68
8. Устройство для насыщения жидкостей газами А. с. 253756 СССР. Оpubл. 1973, Бюл. № 31.
9. Устройство для смешения жидкостей А. с. 398265 СССР. Оpubл. 1973, Бюл. № 38.
10. Бальцежак С.В. Гидродинамика и массоотдача в жидкой фазе у границы газ-жидкость в двухфазных (газ-жидкость) и трехфазных (газ-жидкость-твердое тело) системах в барботажных аппаратах с механическим перемешиванием. дис. канд. техн. наук: 05.17.08, 1982. 205с.
11. Беркман Б.Е. Сульфирование и щелочное плавление в промышленности органического синтеза: М.: Госхимиздат, 1960. 267 с.
12. Брагинский Л.Н., Бегачев В.И., Барабаш В.М. Перемешивание в жидких средах. - Л.: Химия, 1984. 336 с.
13. Шабрацкий В.И., Мартыненко Н.А. Сульфирование углеводородов в производстве сульфонола НП-3. Химия и химическая технология. 1987. (№ 4) С. 36-38.
14. Пристрій для перемішування рідин пат 60097 Україна Оpubл. 2011 р., Бюл. № 11.

References

1. Sokolov V.I., Krol' O.S., Epifanova O.V. Gidravlika: navchal'nij posibnik / Severodonec'k: vid-vo SNU im. V.Dalja, 2017. 160s.

2. Shterbachek Z., Tausk P. Peremeshivanie v himicheskoy promyshlennosti. - L.: Goshimizdat, 1963. 416s.
3. Vojnov N. A. Sovremennyye problemy i metody biotekhnologii: Krasnojarsk : IPK SFU, 2009. 418 s.
4. Ustrojstvo dlja smeshenija zhidkosti s gazom: A. s. 1318271 USSR. Opubl. 23.06.87, Bjul. № 23.
5. Ustrojstvo dlja ajeracii i peremeshivaniya zhidkosti: A. s. 1165442 USSR. Opubl. 1985, Bjul. № 25.
6. Smesitel' dlja obrabotki sistem gaz-zhidkost' A. s. 437522 USSR. Opubl. 1974, Bjul. № 28.
7. Methods of Mixing Liquids and Apparatus therefor . пат 1104032 Velikobritanija. MPK V01F. opubl. 21.02.68
8. Ustrojstvo dlja nasyshhenija zhidkosti gazami A. s. 253756 USSR. Opubl. 1973, Bjul. № 31.
9. Ustrojstvo dlja smeshenija zhidkостей A. s. 398265 USSR. Opubl. 1973, Bjul. № 38.
10. Bal'cezhak S. V. Gidrodinamika i massootdacha v zhidkoj faze u granicy gaz-zhidkost' v dvuhfaznyh (gaz-zhidkost') i trehfaznyh (gaz-zhidkost'-tverdoe telo) sistemah v barbotazhnyh apparatah s mehanicheskim peremeshivaniem. dis. kand. tehn. nauk: 05.17.08, 1982. 205s.
11. Berkman B. E. Sul'firovanie i shhelochnoe plavlenie v promyshlennosti organicheskogo sinteza: M.: Goshimizdat, 1960. 267 s.
12. Braginskij L.N., Begachev V.I., Barabash V.M. Peremeshivanie v zhidkix sredah. - L.: Himija, 1984. 336 s.
13. Shabrackij V.I., Martynenko N.A. Sul'firovanie uglevodov v proizvodstve sul'fonola NP-3. Himija i himicheskaja tehnologija. 1987. (№ 4) S. 36-38.
14. Pristrij dlja peremishuvannja ridin пат 60097 Ukraine Opubl. 2011 г., Bjul. № 11.

Шабрацкий С.В., Шабрацкий В.И. Применение самовсасывающих мешалок при сульфировании углеводородов

Приведенные результаты исследования работы технологической схемы сульфирования алкилбензолов газообразным серным ангидридом. На основании анализа работы установки и обработанных литературных данных разработаны сульфураторы объемного типа для получения сульфонола ЧП-3. Полученные результаты экспериментальных исследований, позволяют смоделировать промышленную установку для газожидкостных процессов, в частности для процесса сульфирования. Предпринята попытка доказать, что использование аппаратов с барботерами, для ввода газового реагента для экзотермической реакции сульфирования в системе газ – жидкость является ресурсозатратным и громоздким в аппаратурном оформлении.

Ключевые слова: сульфирование, самовсасывающая мешалка, массообменный аппарат, система газ – жидкость.

Shabratsky S.V., Shabratsky V.I. The use of self-suction mixers in the sulfonation of hydrocarbons

Reaction vessels with mixing devices are often used in the chemical and petrochemical industry for gas-liquid mass transfer processes in which the mixing has a decisive influence on the process. During the rotation of the mixer in the tank, flows with different speeds and directions are generated, which cause turbulent and circulation currents the intensity of which depends on the constructive features of the mixing device, rotation speed and properties of the mixed fluid. Most

recently, in tank vessels designed for gas-liquid reactions, self-sucking mixers have been used as mixing devices, which, according to the authors, are more efficient due to the fact that the carrying out of these processes in proposed reactors does not require any extra capacity in addition to reagent gas feeding lines or an extra stage for exhaust gas purification which would make the process scheme more complicated. This is especially noticeable when using reaction vessels with self-sucking mixers for carrying out sulfonation reactions of aromatic hydrocarbons with sulfur trioxide-air mixtures or in chlorination of hydrocarbons with gaseous chlorine, the quality of which reactions affects the yield of the end product. The new self-sucking mixing devices is proposed, in addition to their main function – absorption and distribution of gas reagent – must perform a rational distribution of the energy introduced into the reaction zone in accordance with the specific processes and provide an initial contact of reagents under positive displacement conditions. Such conditions can be created by means of self-sucking mixers by placing within a hollow rotor of ejection membrane which allows both the gas and fluid reagents be sucked simultaneously. Also, the great interest is the issue of mixing power determination of mixers

designed for processes in gas-liquid systems, which can be an essential component in designing reaction vessels using effective mixing devices of self-sucking type for both liquid and gaseous phases. For this reason, the mixing power calculation of self-sucking mixers for gas-liquid processes is an important part in the design of reaction vessels.

Keywords: sulfonation, chlorination, ozonation, flow coefficient, self-priming mixer, indanthrone, anthraquinone, alkyl benzene.

Шабрацький Сергій Володимирович – к.т.н., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк), shabrachij_sv@snu.edu.ua

Шабрацький Віктор Іванович – к.т.н., доц., доцент кафедри машин та апаратів хімічних виробництв, інститут хімічних технологій (м. Рубіжне), Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля.

Стаття подана 16.02.2021 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-188-193>

УДК 621.745.55:629.1.01

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ БАРІЮ ТА ЦЕРІЮ НА ПРОЦЕС ГРАФІТИЗАЦІЇ ТА СТРУКТУРУ ФРИКЦІЙНОГО СІРОГО ЧАВУНУ

Шевченко О.В.

STUDY OF THE INFLUENCE OF BARIUM AND CERIUM ON THE GRAPHITIZATION PROCESS AND THE STRUCTURE OF FRICTION GRAY CAST IRON

Shevchenko O.V.

*В статті досліджено вплив барію та церію на процес графітизації та структуру фрикційного сірого чавуна, а саме вплив цих хімічних елементів на морфологію, розподіл та дисперсність цементиту та графіту. Для модифікування чавуна було використано два типи лігатур: лігатуру СітМіш-І (Si-Ca) та лігатуру ЦІСМ (Si-Ca-Ba-Ce). Встановлено оптимальні концентрації лігатур, які забезпечують необхідну ступінь графітизації чавуна, попереджують утворення ледебуриду та обмежують вміст вторинного цементиту на припустимому рівні. Встановлено, що модифікування чавуна лігатурою ЦІСМ, що містить барій та церій, дозволяє повністю подавити утворення міждендритного графіту, який суттєво знижує фрикційні характеристики чавуна. Доведено, що модифікування сірого фрикційного чавуна комплексною лігатурою, що містить барій та церій, дозволяє приблизно втричі зменшити довжину графітних включень порівняно із чавуном, модифікованим силіко - кальцієвою лігатурою. **Ключові слова:** сірий чавун, фрикційний матеріал, модифікування, аустеніт, лігатура, вторинний цементит, графіт, ледебурид.*

Вступ. Інтенсивний розвиток сучасних транспортних засобів не можливий без удосконалення фрикційних матеріалів, що застосовуються в гальмівних системах. Більш жорсткі умови експлуатації транспортних засобів диктують необхідність розробки нових фрикційних матеріалів та вдосконалення існуючих фрикційних сплавів. Одним із традиційних класів фрикційних матеріалів, що знаходять широке застосування в гальмівних системах автомобільного та залізничного транспорту, є сірі чавуни.

З сірих чавунів виготовляються фрикційні елементи, що працюють в умовах короткочасного локального підвищення температури в зоні тертя до 600-700°C [1]. Основні проблеми, що виникають при експлуатації фрикційних елементів, виготовлених із сірих чавунів, пов'язані із наявністю в структурі цих матеріалів міждендритного графіту. Міждендритний графіт, навіть при достатньо високій

дисперсності графітних включень, суттєво знижує експлуатаційний ресурс та надійність гальмівних елементів, виготовлених з сірих чавунів. Тому в наступний час у різних країнах проводяться активні пошуки нових систем легування та модифікування сірих чавунів, спрямовані на запобігання утворенню міждендритного графіту в виливках із сірих чавунів [1 - 5]. Певні успіхи у цьому напрямку досягнуті для сірих чавунів з ферито - перлітною та перлітною структурою металевої основи при використанні для модифікування чавунів лігатур, що містять барій та церій [6]. Закономірності графітизації сірих чавунів аустенітного класу, зокрема марганцевих чавунів, при їхньому модифікуванні барієм та церієм до теперішнього часу не досліджені. Окремо слід відзначити про те, що до теперішнього часу не досліджено вплив алюмінію на процес графітизації цих чавунів у присутності барію та церію, незважаючи на те, що алюміній досить часто використовуються в цих сплавах в якості легуючого елемента.

Отже, **метою роботи** є визначення оптимального складу комплексного модифікатора, який забезпечує необхідну структуру фрикційного чавуна та покращення його триботехнічних характеристик.

Завдання дослідження:

1. Дослідити вплив алюмінію, кальцію, барію та церію на процес графітизації аустенітних марганцевих сірих чавунів. Встановити оптимальний вміст лігатур, що містять кальцій, барій та церій: критерієм оптимальності є відсутність включень ледебуриду та міждендритного графіту без перевищення допустимого вмісту вторинного цементиту.

2. Дослідити вплив вмісту вуглецю та алюмінію на розподіл, морфологію та дисперсність цементитних та графітних включень в чавунах, модифікованих кальцієм, барієм та церієм.

Основна частина.

При виборі системи легування фрикційних сірих чавунів зазвичай вирішуються наступні проблеми: створення умов, що унеможливають утворення

ня ледебуриту; отримання оптимального вмісту вторинного цементиту (2-4 %); забезпечення необхідного ступеня графітизації при мінімальній кількості міждендритного графіту [2]. Перші два завдання вирішуються шляхом вибору оптимального співвідношення між концентрацією вуглецю та кремнію (вуглець та кремній є елементами - графітизаторами), а також введенням до складу чавуна додаткових елементів - графітизаторів: нікелю, алюмінію, міді. Вуглець, кремній, нікель, алюміній (при його вмісті не більше 5 %), мідь сприяють графітизації чавуна, але при цьому ніяк не впливають на морфологію та дисперсність графітної фази [3]. Для подрібнення графітних включень та підвищення рівномірності їхнього розподілу до складу сірих чавунів вводять кальцій, сурму, барій, церій [4]. Кальцій та сурма сприяють інтенсивному подрібненню графітних включень, ає у більшості випадків в структурі чавунів залишається міждендритний графіт [5]. Попередити утворення міждендритного графіту в сірих чавунах можна двома засобами: модифікуванням чавунів барієм та церієм; використанням спеціальних режимів охолодження або спеціальної термічної обробки з тривалим часом витримки при температурі, яка на 100 - 150°C перевищує критичну точку A_{c1} [6]. Забезпечити контрольовані режими охолодження виливок в умовах реального виробництва практично неможливо, а додаткова термічна обробка є вкрай енергоємною. Тому на сьогодні найбільш перспективним способом запобігання утворенню міждендритного графіту в виливках з сірих чавунів вважається комплексне модифікування чавунів барієм та церієм [6]. Цей спосіб є універсальним, оскільки він може бути застосований для будь-яких процесів литва [6]. Позитивний вплив барію та церію на морфологію графітних включень спостерігається при сумарній залишковій концентрації цих елементів не більше 0,18 %. При більш високій концентрації барію та церію в сірих чавунах процес графітизації уповільнюється, а вміст карбідів суттєвим чином збільшується [6].

Основна мета роботи полягала у дослідженні впливу хімічного складу модифікаторів на процес графітизації та структуру аустенітного фрикційного сірого чавуну.

Методика проведення експериментальних досліджень. Хімічний склад чавунів змінювався у наступних межах: 3,4 - 3,8 % вуглецю; 10 - 12 % марганцю; 2,0 - 3,5 % алюмінію; 1,7 - 1,9 мас. % Si.

Модифікування чавунів здійснювалось двома типами лігатур: лігатурою СітМіш-1 системи кремній-кальцій та лігатурою ЦІСМ системи кремній-кальцій-барій-церій. Пресовані брикети лігатур додавались у розплавлений чавун безпосередньо перед розливанням чавуна у ливарні форми – кокілі з теплоізоляційним покриттям по ТУ 226.32.884 - 86.

Мікроструктура чавунів досліджувалась на оптичному мікроскопі МІМ-8М. Хімічне травлення мікрошліфів здійснювалось царською водкою. Шлі-

фування та полірування мікрошліфів виконувалось на шліфувально-полірувальному верстаті СШП-12.

Оскільки чавуни, що досліджувались, мали аустенітну металеву матрицю, їхню мікроструктуру визначали за графітом та цементитом. Структуру фосфідної евтектики не досліджували, оскільки чавуни містили не більше 0,15 мас. % фосфору.

При визначенні графіту оцінці підлягали форма, розподіл, розміри, кількість включень графіту, при визначенні цементиту – кількість та розміри включень цементиту, наявність ледебуриту.

Металографічний аналіз чавунів починали із вивчення травлених ділянок мікрошліфів, на яких виявляли вторинний і евтектичний цементит. Якщо в структурі чавунів виявляли евтектичний цементит (ледебурит), зразки бракували. Кількість вторинного цементиту не повинна перевищувати 6 %; у протилежному випадку зразки також бракували.

Якщо на травленій ділянці мікрошліфів був відсутній ледебурит і кількість вторинного цементиту не перевищувала 6 %, проводили аналіз форми та розподілу включень графіту на нетравлених ділянках мікрошліфів.

Кількість вторинного цементиту та ледебуриту в структурі чавунів оцінювали за шкалою 10А ГОСТ 3443-87 як середній відсоток площі, яку займали ці включення на мікрошліфах не менше ніж у трьох полях зору.

При наявності в структурі чавунів включень цементиту у кількості менше 1,0 % (одне - два включення площею менше 2000 μm^2 у трьох різних полях зору), їх оцінювали як «сліди».

Розмір ізольованих включень вторинного цементиту та ледебуриту оцінювали за шкалою 10В ГОСТ 3443-87 через середню площу трьох найбільших включень.

Форма включень графіту в структурі чавунів оцінювалась по шкалі 1А ГОСТ 3443-87.

Оцінка довжини включень графіту здійснювалась по шкалі 1Б ГОСТ 3443-87. Визначення довжини включень графіту проводилось по середній довжині трьох найбільших включень. Максимальна довжина включень визначалась у трьох різних полях зору.

Розподіл включень графіту оцінювали по шкалі 1В ГОСТ 3443-87. При наявності в структурі чавунів включень графіту, що займали площу до 1,0 % від загальної площі мікрошліфа, їх оцінювали як «сліди».

Кількість включень графіту оцінювали за шкалою 1Г ГОСТ 3443-87 через середній відсоток площі, яку займали на мікрошліфах включення графіту у трьох різних полях зору.

Вплив модифікаторів на кількість, розподіл та розміри включень цементиту та графіту. Дослідження впливу модифікаторів на кількість, розподіл та розміри включень цементиту проводили на серії зразків, які мали наступний хімічний склад: 3,4 - 3,5 мас. % C; 10 - 11 мас. % Mn; 2,5 - 2,7 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si. Немодифікований чавун має

структуру аустеніт + вторинний цементит + ледебурит без помітних слідів графіту (рис. 1). Такий чавун непридатний для виготовлення фрикційних деталей.



Рис. 1. Мікроструктура немодифікованого чавуна: (3,4 - 3,5 мас. % С; 10 - 11 мас. % Mn; 2,5 - 2,7 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si): структура – аустеніт + вторинний цементит + ледебурит; вміст вторинного цементиту та ледебуриту 45 - 50 %; $\times 100$

При модифікуванні чавуну силіко - кальцієвою лігатурою СітМіш-1 у кількості 0,03 мас. % в мікроструктурі виливок чітко фіксуються вторинний цементит і ледебурит (рис. 2). Вміст цементиту та ледебуриту за еталонною шкалою 10А ГОСТ 3443 - 87 складає 10 - 15 % (шкала Ц10). При збільшенні вмісту лігатури до 0,05 мас. % ледебурит зникає (рис. 3), а кількість вторинного цементиту не перевищує 6 % (шкали Ц2 - Ц4 ГОСТ 3443 - 87). Комплексна лігатура ЦІСМ системи Si-Ca-Ba-Ce забезпечує інтенсивну графітизацію чавуну при меншій концентрації, ніж силіко - кальцієва лігатура СітМіш-1.

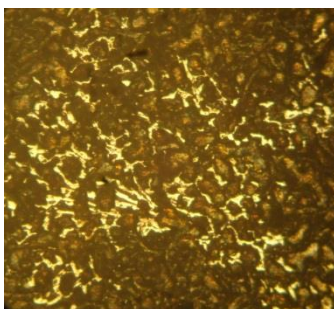


Рис. 2. Мікроструктура чавуна, модифікованого силіко - кальцієвою лігатурою СітМіш-1 в кількості 0,03 мас. % (3,4 - 3,5 мас. % С; 10 - 11 мас. % Mn; 2,5 - 2,7 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si): структура – аустеніт + графіт + вторинний цементит + ледебурит; вміст вторинного цементиту та ледебуриту 10 - 15 %; $\times 100$

При модифікуванні чавуну лігатурою ЦІСМ у кількості 0,01 мас. % об'ємний вміст вторинного цементиту і ледебуриту у виливках складає ~ 10 % (рис. 4). При збільшенні вмісту лігатури до 0,03 мас. % ледебурит не виділяється, а кількість вторинного цементиту не перевищує 4 % (рис. 5).

Більш детальні дані щодо впливу вмісту модифікаторів на кількість цементиту в чавуні наведено на рис. 6. Оптимальний вміст силіко - кальцієвого модифікатора СітМіш-1 складає 0,05 - 0,1 %, комплексного модифікатора ЦІСМ системи Si-Ca-Ba-Ce

– 0,03 - 0,05 %. При такій концентрації модифікаторів вміст вторинного цементиту в чавуні складає 2 - 4 %, ледебурит – відсутній.

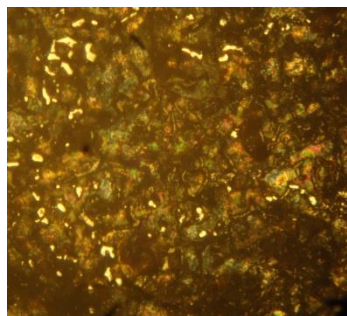


Рис. 3. Мікроструктура чавуна, модифікованого силіко - кальцієвою лігатурою СітМіш-1 в кількості 0,05 мас. % (3,4 - 3,5 мас. % С; 10 - 11 мас. % Mn; 2,5 - 2,7 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si): структура – аустеніт + графіт + вторинний цементит; вміст вторинного цементиту 2 - 6 %; $\times 100$

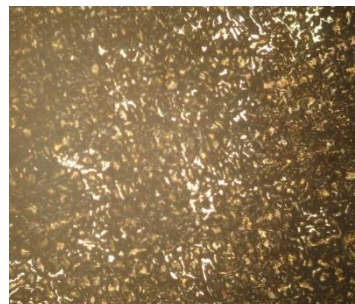


Рис. 4. Мікроструктура чавуна, модифікованого комплексною лігатурою ЦІСМ системи Si-Ca-Ba-Ce у кількості 0,01 мас. % (3,4 - 3,5 мас. % С; 10 - 11 мас. % Mn; 2,5 - 2,7 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si): структура – аустеніт + графіт + вторинний цементит + ледебурит; вміст вторинного цементиту та ледебуриту ~ 10 %; $\times 100$

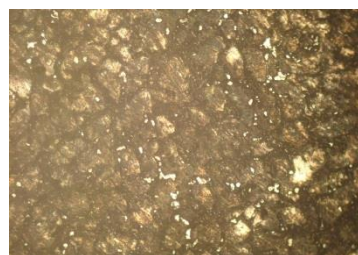


Рис. 5. Мікроструктура чавуна, модифікованого комплексною лігатурою ЦІСМ системи Si-Ca-Ba-Ce у кількості 0,03 мас. % (3,4 - 3,5 мас. % С; 10 - 11 мас. % Mn; 2,5 - 2,7 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si): структура – аустеніт + графіт + вторинний цементит; вміст вторинного цементиту 2 - 4 %; $\times 100$

Вуглець та алюміній у складі чавуну підвищують швидкість його графітизації та сприяють зменшенню вмісту цементиту (рис. 7, 8). Дослідження впливу концентрації вуглецю на вміст цементиту в чавуні проводили з використанням зразків, які містили 3,2; 3,5 та 3,8 мас. % С. Вміст марганцю, алюмінію та кремнію в зразках був однаковий: 10 - 11

мас. % Mn; 2,5 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si. В якості модифікатора використовували комплексну лігатуру ЦІСМ. Вона забезпечує більш інтенсивну графітизацію чавуну, ніж лігатура СітМіш-1 (рис. 6). При вмісті в чавуні лігатури ЦІСМ 0,03 мас. % збільшення концентрації вуглецю з 3,2 до 3,8 мас. % призводить до зменшення кількості цементиту з 6 % до 2 %. В чавуні, що містить 0,05 мас. % лігатури ЦІСМ, при збільшенні концентрації вуглецю з 3,2 до 3,8 мас. % кількість цементиту зменшується з 4 до 1 % (рис. 7).

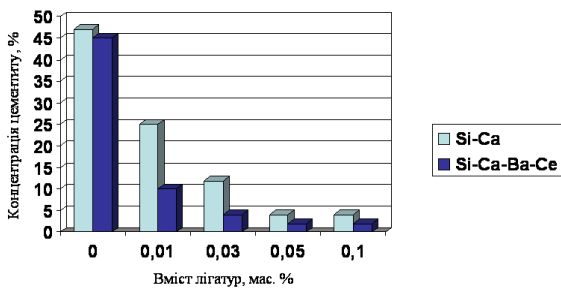


Рис. 6. Вплив вмісту модифікаторів на концентрацію цементиту в чавуні (3,4 - 3,5 % С; 10 - 11 % Mn; 2,5 - 2,7 % Al; 1,7 - 1,9 % Si)

Дослідження впливу концентрації алюмінію на вміст цементиту в чавуні проводили з використанням зразків, які містили 2,5; 3,0 та 3,5 мас. % Al. Вміст марганцю, вуглецю та кремнію в зразках був однаковий: 10 - 11 мас. % Mn; 3,5 мас. % С; 1,7 - 1,9 мас. % Si. В якості модифікатора використовували комплексну лігатуру ЦІСМ. При вмісті лігатури 0,03 мас. % збільшення концентрації алюмінію з 2,5 до 3,5 мас. % призводить до зменшення кількості цементиту з 4 % до 1 %. В чавуні, що містить 0,05 мас. % лігатури ЦІСМ, при збільшенні концентрації алюмінію з 2,5 до 3,5 мас. % кількість цементиту зменшується з 2 до 0,5 % (рис. 8).

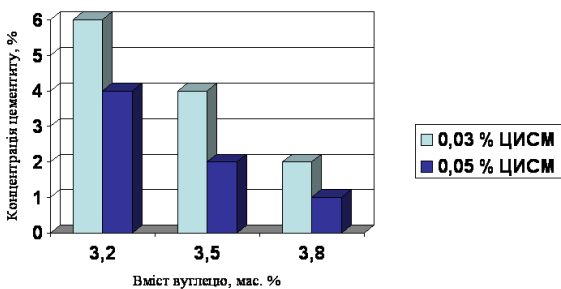


Рис. 7. Вплив вмісту вуглецю на концентрацію цементиту в чавуні, модифікованому лігатурою ЦІСМ (10 - 11 мас. % Mn; 2,5 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si)

Форма та розподіл включень графіту досліджувались на нетравлених ділянках мікрошліфів. Для досліджень використовували дві серії зразків з вмістом вуглецю 3,5 та 3,8 мас. %. Вміст марганцю, алюмінію та кремнію в зразках не змінювався і складав: 10 - 11 мас. % Mn; 2,5 мас. % Al; 1,7 - 1,9

мас. % Si. В зразках з чавуну, модифікованого силіко - кальцієвою лігатурою СітМіш-1, форма включень графіту – пластинчаста завихрена (еталонна шкала ПГф2 по ГОСТ 3443-87) (рис. 9, а, б). Довжина включень графіту відповідає еталонній шкалі ПГд90 (ГОСТ 3443-87; середня довжина графітних включень 90 мкм). Розподіл включень графіту – колонії пластинчастого та міждендритного графіту (шкали ПГр3, ПГр4 по ГОСТ 3443-87).

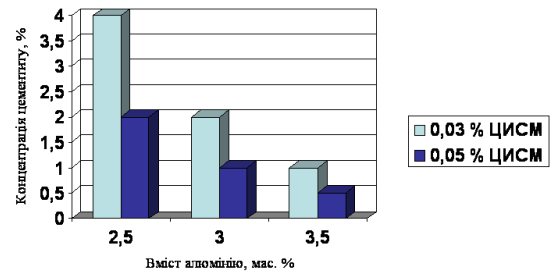
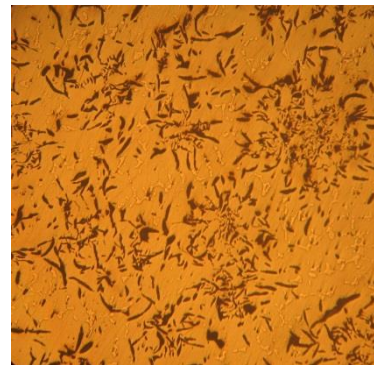


Рис. 8. Вплив вмісту алюмінію на концентрацію цементиту в чавуні, модифікованому лігатурою ЦІСМ (10 - 11 мас. % Mn; 3,5 мас. % С; 1,7 - 1,9 мас. % Si)



а



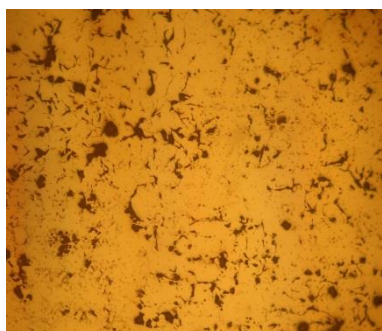
б

Рис. 9. Морфологія графіту у чавуні, модифікованому силіко - кальцієвою лігатурою СітМіш-1 в кількості 0,1 мас. % (10 - 11 мас. % Mn; 2,5 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si); × 100; а – вміст вуглецю 3,4 %; б – вміст вуглецю 3,8 мас. %

І при концентрації вуглецю 3,5 % (рис. 9, а), і при концентрації вуглецю 3,8 % (рис. 9, б) на мікрошліфах чітко ідентифікується грубодисперсна графітна евтектика. При збільшенні концентрації

вуглецю в чавуні з 3,5 до 3,8 % зростає товщина пластин графіту та кількість графіту, а також доля графітних включень, розташованих по границях зерен аустеніту (міждендритний розподіл графіту). Міждендритний розподіл графіту сприяє одночасному суттєвому зменшенню міцності та пластичності чавуну. Також знижується тріщиностійкість чавуну при термоциклованні. Термоцикловання полягає спочатку у різкому підвищенні контактної температури у трибосполученні при гальмуванні, а потім у різкому охолодженні гальмівних колодок після зупинки.

В зразках з чавуну, модифікованого лігатурою ЦІСМ, форма включень графіту – пластинчаста прямокутна (шкала ПГф1 по ГОСТ 3443-87) (рис. 10, а, б). Довжина включень графіту відповідає еталонній шкалі ПГд45 (ГОСТ 3443-87; середня довжина графітних включень 45 мкм). Розподіл включень графіту – рівномірний (шкала ПГр1 по ГОСТ 3443-87). Колонії міждендритного та пластинчастого графіту не виявлені як при концентрації вуглецю 3,5 % (рис. 9, а), так і при концентрації вуглецю 3,8 % (рис. 10, б).



а



б

Рис. 10. Морфологія графіту у чавуні, модифікованому силіко - кальцієвою лігатурою СітМіш-1 в кількості 0,1 мас. % (10 - 11 мас. % Mn; 2,5 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si); $\times 100$; а – вміст вуглецю 3,4 %; б – вміст вуглецю 3,8 мас. %

Відсутність колоній міждендритного та пластинчастого графіту в чавуні, що модифікований лігатурою ЦІСМ, можна пояснити впливом церію та барію, котрі входять до складу цієї лігатури. Церій та барій у невеликих концентраціях суттєво збільшують кількість центрів графітизації при первинній кристалізації чавуну. Внаслідок цього утворюється

дрібнодисперсна графітна евтектика з рівномірним розподілом включень графіту в аустенітній матриці. Таким чином, фрикційний чавун найбільш доцільно модифікувати комплексною лігатурою ЦІСМ, котра не тільки прискорює процес графітизації чавуна, але і подрібнює графітну фазу (перш за все графітну евтектику). Оптимальний вміст лігатури складає 0,03 - 0,05 % від маси розплавленого чавуну.

Висновки

1. Досліджено вплив модифікаторів СітМіш-1 і ЦІСМ на структуру сірих чавунів з аустенітною матрицею. Встановлено оптимальні концентрації модифікаторів, при яких досягається максимальна ступінь графітизації чавунів. Оптимальний вміст силіко-кальцієвого модифікатора СітМіш-1 складає 0,05 - 0,1 %, комплексного модифікатора ЦІСМ – 0,03 - 0,05 %. При такій концентрації модифікаторів вміст вторинного цементиту в чавуні не перевищує 2 - 4 %.

2. Встановлено, що комплексне модифікування марганцевого аустенітного чавуну церієм та барієм (модифікатор ЦІСМ) дозволяє повністю попередити утворення міждендритного графіту, чого не можливо досягнути при модифікуванні чавуна лише кальцієм (модифікатор СітМіш-1).

3. Доведено, що модифікування сірого фрикційного чавуну комплексною лігатурою, що містить барій та церій, дозволяє приблизно втричі зменшити довжину графітних включень порівняно із чавуном, модифікованим силіко-кальцієвою лігатурою.

Література

1. Ямшинський М.М., Назаренко В.С., Кравченко К.О. Аналіз гальмівних колодок та шляхи оцінки їх перспективних конструкцій // ВІСНИК СХУ ім. В. Даля, 2015. № 1 (218). С. 204 – 209.
2. Пілюшенко В. Л., Шаповалов Ю. С. Формування структури і властивостей зносостійких чавунів зі зміною ступеня їх легування // Металознавство та обробка металів, 2004. № 2. С. 120 - 121.
3. Марукович Е.И., Карпенко М.И. Износостойкие сплавы. – М.: Машиностроение, 2005. 428с.
4. Tribological study of Fe–Cu–Cr–graphite alloy and cast iron railway brake shoes by pin-on-disc technique / C. Ferrer, M. Pascual, D. Busquets, E. Rayón. // Wear, 2010. 268. P. 784–789.
5. Tribological investigation of titanium-based materials for brakes / Peter J. Blau, Brian C. Jolly, Jun Qu]. // Wear, 2007. 263. P. 1202 – 1211.
6. Балицький М.Г. Експериментальні методи оптимізації ливарних сплавів. – Львів: Львівська політехніка, 2003. 204 с.

References

1. Yamshinsky M., Nazarenko V., Kravchenko K. Analysis of the brake pads and the ways of assessing their perspective designs // Visnyk of Volodymyr Dahl EUNU, 2015. № 1 (218). P. 204 – 209.
2. Piliushenko V. L., Shapovalov Yu. S. Formuvannia struktury i vlastyvoستي znosostiikykh chavuniv zi zminoiu stupinia yikh lehuvannia // Metaloznavstvo ta obrobka metaliv, 2004. № 2.

3. Marukovych E.Y., Karpenko M.Y. Yznosostoikye splavy. – М.: Mashynostroenye, 2005. 428 p.
4. Tribological study of Fe–Cu–Cr–graphite alloy and cast iron railway brake shoes by pin-on-disc technique / С. Ferrer, М. Pascual, D. Busquets, E. Rayón. // Wear, 2010. №268. P. 784–789.
5. Tribological investigation of titanium-based materials for brakes / Peter J. Blau, Brian C. Jolly, Jun Qu]. // Wear, 2007. №263. P. 1202–1211.
6. Balytskyi M.H. Eksperymentalni metody optymizatsii lyvarnykh splaviv. – Lviv: Lvivska politekhnika, 2003. 204 p.

Шевченко А.В. Исследование влияния бария и церия на процесс графитизации и структуру фрикционного серого чугуна.

В статье исследовано влияние бария и церия на процесс графитизации и структуру фрикционного серого чугуна, а именно влияние этих химических элементов на морфологию, распределение и дисперсность цементита и графита. Для модифицирования чугуна было использовано два типа лигатур: лигатура СиитМиш-1 (Si-Ca) и лигатура ЦИСМ (Si-Ca-Ba-Ce). Установлены оптимальные концентрации лигатур, которые обеспечивают необходимую степень графитизации чугуна, предотвращают образование ледебурита и ограничивают содержание вторичного цементита на допустимом уровне. Установлено, что модифицирование чугуна лигатурой ЦИСМ, содержащий барий и церий, позволяет полностью подавить образование междендритного графита, который существенно снижает фрикционные характеристики чугуна. Показано, что модифицирование серого фрикционного чугуна комплексной лигатурой, содержащей барий и церий, позволяет примерно втрое уменьшить длину графитных включений в сравнении с чугуном, модифицированным силико-кальциевой лигатурой.

Ключевые слова: фрикционный материал, модифицирование, аустенит, лигатура, вторичный цементит, графит, ледебурит.

Shevchenko O.V. Study of the influence of barium and cerium on the graphitization process and the structure of friction gray cast iron.

The authors of this scientific article conducted comprehensive studies aimed at identifying the influence of barium and cerium on the graphitization process and the structure of frictional gray cast iron. The purpose of this scientific article: to investigate the effect of barium and cerium, which are part of industrial foundry alloys used to modify iron-carbon alloys, on the morphology, distribution and dispersion of cementite and graphite. In the course of experimental studies, two industrial foundry alloys were used to modify cast iron. First foundry alloy: foundry alloy SiitMish-1 based on silicon and calcium. Second foundry alloy: foundry alloy TsISM; this foundry alloy is a powder alloy that contains silicon, calcium, barium, cerium. The authors of this article have established the optimal concentration of foundry alloys that provide the necessary degree of graphitization of cast iron without the formation of ledeburite. Such concentrations of foundry alloys make it possible to avoid the formation of ledeburite in the structure of cast iron and to limit the content of secondary cementite: the content of secondary cementite is optimal for gray friction cast irons, which have an austenitic structure of the metal base. The authors of this article found that the modification of cast iron with a foundry alloy TsISM, which contains barium and cerium, completely prevents the formation of graphite, which is located along the boundaries of dendrites. Graphite, which is located along the boundaries of dendrites, significantly reduces the frictional characteristics of cast iron. It was found that the modification of cast iron only with calcium does not allow avoiding the formation of graphite, which is located along the boundaries of dendrites. Modification of gray friction cast iron with a complex master alloy containing barium and cerium makes it possible to approximately three times reduce the length of graphite inclusions in comparison with cast iron modified with a silicon-calcium alloy.

Key words: friction material, modification, austenite, foundry alloy, secondary cementite, graphite, ledeburite.

Шевченко Олександр Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк), shev.cmw@ukr.net

Стаття подана 10.02.2021 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-194-200>

УДК 621.745.55:629.1.01

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МІКРОЛЕГУВАННЯ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ГАЛЬМІВНИХ КОЛОДОК

Шевченко О.В., Сергієнко О.В., Возлюблений Б.М.

STUDY OF THE MICRO-ALLOYING INFLUENCE ON THE WEAR RESISTANCE OF BRAKE PADS

Shevchenko O.V., Serhiienko O.V., Vozliublenyi B.M.

В статті досліджено вплив мікролегування на зносостійкість гальмівних колодок, а саме вплив концентрації вуглецю та алюмінію на вміст, морфологію та дисперсність цементиту у чавуні при введенні модифікаторів системи Si-Ca та Si-Ca-Ba-Ce. Отримані закономірності графітизації марганцевих сірих чавунів, легованих алюмінієм, при їхньому модифікуванні лігатурами системи Si-Ca та Si-Ca-Ba-Ce дають можливість встановити оптимальний вміст цих лігатур у чавуні, при якому забезпечується його задовільна структура без утворення міждендритного графіту та без перевищення допустимого вмісту вторинного цементиту, який забезпечує мінімальну інтенсивність зношування важко навантажених гальмівних колодок в умовах сухого тертя.

Ключові слова: гальмівна колодка, зносостійкість, мікролегування, фрикційний чавун, інтенсивність зношування.

Вступ. Гальмування та фрикційний знос в умовах сухого тертя являють собою специфічні нестационарні процеси, які супроводжуються суттєвими структурними змінами в поверхневих шарах деталей, що контактують між собою. Для інтенсивних процесів гальмування, що супроводжуються значним тепловиділенням і високими температурами у зоні контакту, які істотно впливають на інтенсивність зношування пар тертя.

Для виготовлення фрикційних елементів, що працюють в умовах короткочасного локального підвищення температури до 700°C, широко використовуються сірі чавуни [1]. Одним з перспективних напрямків поліпшення структури фрикційних сірих чавунів є мікролегування та модифікування. У сучасних фрикційних вузлах все частіше починають використовуватись гальмівні колодки з високолегованих марганцевих сірих чавунів, але до теперішнього часу не встановлені закономірності графітизації цих чавунів при

комплексному впливі кремнію, вуглецю та алюмінію, з однієї сторони, та кальцію, барію і церію з іншої сторони.

У зв'язку з цим **метою роботи** є розробка конкретних рекомендацій щодо використання лігатур, що містять кальцій, барій та церій, для модифікування марганцевих сірих чавунів, з яких виготовляються важко навантажені гальмівні колодки рухомого складу залізничного транспорту.

Завдання дослідження:

1. Дослідити закономірності графітизації марганцевих сірих чавунів, легованих алюмінієм, при їхньому модифікуванні лігатурами системи Si-Ca та Si-Ca-Ba-Ce. Встановити оптимальний вміст цих лігатур у чавуні, при якому забезпечується задовільна структура чавуна без утворення міждендритного графіту та без перевищення допустимого вмісту вторинного цементиту.

2. Дослідити вплив концентрації вуглецю та алюмінію на вміст, морфологію та дисперсність цементиту у чавуні при введенні у чавун модифікаторів системи Si-Ca та Si-Ca-Ba-Ce.

3. Оптимізувати склад марганцевого сірого чавуна за критерієм найменшої інтенсивності зношування.

Основна частина.

Для фрикційних вузлів тертя характерні наступні режими роботи [2]:

1. Легкі, коли на поверхні тертя температура не перевищує 250°C.

2. Середні і важкі, при яких температура відповідно підвищується до 250 - 600°C та 600 - 1000°C.

3. Надважкі, коли температура досягає 1000 - 1300°C і більше.

Зносостійкість литих деталей при сухому терті, також, як і при абразивному зносі, знаходиться, як правило, у прямій залежності від твердості виливків. Але у деяких випадках ця залежність має зворотний

характер. Так, зносостійкі та тверді білі чавуни практично не використовуються в умовах фрикційного зносу, а перевага віддається графітізованим сплавам системи залізо - вуглець - кремній [3]. Основними особливостями сірих фрикційних чавунів є: високий коефіцієнт тертя, висока зносостійкість і здатність протистояти утворенню задирів у широкому інтервалі температур. Цим вимогам задовільно відповідають сірі фосфористі чавуни з металевою основою із дрібнозернистого перліту з рівномірно розподіленими включеннями подвійної та потрійної фосфідної евтектики і пластинчастого графіту [4]. У чавунах з вуглецевим еквівалентом $S_e > 5,2$ при низьких швидкостях охолодження утворюється розеткова форма графіту, що негативно впливає на механічні та експлуатаційні властивості фрикційних виробів. При цій формі графіту в центральній зоні зразків діаметром 30 - 60 мм утворюється переважно ферит, що призводить до зниження міцності, вібросійності і зносостійкості чавуну [4]. Більш високі механічні властивості забезпечують чавуни доевтектичного та евтектичного складу. У виливках з товщиною стінок 40 мм при підвищеному вмісті фосфору утворюється металева основа П96 (Ф4) - ФЕЗ - ПД0 і графіт ПГ6 - ПГр3 - ПГд45 - ПГф2. Така структура забезпечує литим виробам хороші фрикційно-зносні властивості при роботі в парі з асбофрикційними матеріалами [5]. Якщо в бінарній системі Fe - C критична швидкість кристалізації, при якій сірий чавун переходить у білий, дорівнює 420 - 450 мкм/с, то в потрійній системі Fe - C - P вона змінюється від 30 до 100 мкм/с [6]. Зміна довжини включень графіту в основному визначається умовами охолодження і розміром відлитого зразка. Чисто перлітна структура в масивних зразках забезпечується тільки при відносно низькій ступені евтектичності ($S_e = 0,7 - 0,8$), що характерно для фосфористих нелегованих і модифікованих чавунів, які використовуються для виробництва тонкостінних фрикційних виливків. При збільшенні ступеня евтектичності до 0,8 - 0,9 кількість фериту в структурі різко зростає, а зносостійкість зразків знижується [3].

Встановлено, що добавка фосфору в сірий чавун підвищує його фрикційні властивості, але сприяє утворенню тріщин, знижує термічну стійкість, стабільність коефіцієнта тертя при підвищених температурах і механічні властивості, особливо динамічну міцність [6]. Для поліпшення механічних властивостей фрикційного сірого чавуну доцільно реалізувати в ньому хоча б обмежену пластичність, що запобігає його крихкому руйнуванню. При збільшенні ступеня евтектичності фосфористих чавунів до 0,8 - 1,0 має місце значне зниження пластичності, хоча дисперсність перліту залишається досить високою як при литті в кокіль, так і в пісчано - глиняні форми. У виливках з товщиною стінок понад 30 мм виникає осьова пористість і неоднорідність структури. У виливках з

товщиною стінок 16 - 20 мм при литті в кокіль утворюється структура вибіленого чавуну при $S_e > 0,75$ [7].

Для роботи у фрикційних парах, в яких контактні поверхні нагріваються до температури не більше 250°C і небезпеки утворення тріщин немає, вміст фосфору в чавуні може бути доведений до 1,35 - 1,85 %. Однак для виготовлення фрикційних виробів, що працюють при підвищених температурах та ударних навантаженнях, коли одночасно з високою зносостійкістю необхідні підвищені термічна стійкість і динамічна міцність (наприклад, для гальмівних барабанів), слід використовувати більш термостійкі чавуни або інші фрикційні сплави [3, 6, 7].

Для отримання сірих фрикційних чавунів поряд з легуванням фосфором використовують комплексні лігатури і модифікатори, що містять бориди тугоплавких металів, дисульфід молібдену, нітрид бору і рідкоземельні метали, а також інші компоненти, що знижують знос при сухому терті і підвищують коефіцієнт тертя. Встановлено, що фрикційні матеріали з боридами тугоплавких металів і нітридом бору мають стабільний коефіцієнт тертя, хорошу прироблюваність, не схоплюються з контртілом, є корозійностійкими, негорючими, володіють необхідною механічною міцністю, зносостійкістю, а в ряді випадків і високими пружно-пластичними властивостями.

Для фрикційних виробів, що в процесі експлуатації нагріваються до температур 250 - 500°C, більш ефективними конструкційними матеріалами є мікролеговані сірі чавуни, що містять не більше 0,15 % фосфору [3]. Зокрема, мікролегування є одним з найефективніших засобів протидії утворенню між дендритного графіту без використання спеціальних режимів охолодження чавуну або спеціальної термічної обробки з тривалим часом витримки при температурі, на 100 - 150°C вище A_{c1} [8]. Модифікування доевтектичних зносостійких чавунів рідкоземельними металами (РЗМ) в кількості 0,03 - 0,16 % знижує точки первинних і евтектичних перетворень, збільшує евтектичне переохолодження, подрібнюючи структуру чавуну і підвищуючи його твердість та зносостійкість [8].

По характеру впливу на мікроструктуру чавуну модифікатори на основі рідкоземельних металів можна розділити на дві групи [3]:

1. Модифікатори, що прискорюють процес графітізації, але не впливають на форму та розподіл включень графіту (модифікатори систем Si - Ca, Si - Ca - Na).

2. Модифікатори, що прискорюють процес графітізації та водночас подрібнюють графітну фазу, особливо графітну евтектику (модифікатори систем Si - Ba, Si - Ce, Si - Ba - Ce).

Слід відзначити, що позитивний вплив рідкоземельних металів на мікроструктуру сірих фрикційних чавунів спостерігається при їхньому

сумарному вмісті не більше 0,18 %. При більш високій концентрації рідкоземельних металів у чавунах процес графітизації уповільнюється, а вміст карбідів збільшується. Важливим також є те, що модифікатори на основі РЗМ сильно прискорюють графітизацію вторинних карбідів та карбідів ледебуритної евтектики і водночас уповільнюють графітизацію карбідів, що входять до складу перліту [8]. За рахунок цього у чавунах, комплексно модифікованих РЗМ, отримати структуру перліту в металевій матриці значно простіше, ніж у чавунах, не модифікованих РЗМ. В металевій матриці чавунів, не модифікованих РЗМ, поряд із перлітом може міститись значна кількість фериту. Ферит вкрай негативно впливає на фрикційну зносостійкість сірих чавунів.

Коефіцієнт тертя, пластичність і міцність сірого чавуну, що має ступінь евтектичності 0,8 - 1,0, істотно підвищуються при легуванні молібденом у кількості 0,12 - 0,9 %. Для нейтралізації карбідоутворюючої дії молібдену в чавун можуть вводиться сурьма та нікель [9]. Для підвищення в'язкості чавуну може використовуватись комплексне його легування молібденом і міддю або молібденом і нікелем. Поєднання молібдену та нікелю дозволяє отримувати бейнітний чавун, що володіє одночасно високою міцністю, в'язкістю і відносно стабільним при підвищенні температури коефіцієнтом тертя [10].

Мікролегування сірого чавуну бором забезпечує підвищення стійкості коефіцієнта тертя внаслідок утворення карбоборидів і більш дисперсної та твердої евтектики, ніж фосфідна евтектика. Виливки з чавуну, мікролегованого бором в кількості до 0,35 %, мають більш високу герметичність, ніж виливки з високофосфористих чавунів. При збільшенні вмісту бору більше 0,35 % знижуються пластичність і тріщиностійкість чавуну [3]. Комплексне мікролегування є ефективним методом підвищення міцності, твердості та зносостійкості литих деталей з фрикційних чавунів. Титан та TiN у фосфористих чавунах не використовують, оскільки вони знижують коефіцієнт тертя [10].

При мікролегуванні фосфористих фрикційних чавунів металевою сурьмою остання витісняє фосфор з твердих фаз у рідкий розчин, що призводить до збільшення площі, яку займають включення фосфідної евтектики [11]. Кількість цементиту у виливках зростає, що призводить до збільшення мікротвердості фосфідної евтектики.

Для отримання голчатої бейнітоподібної структури фрикційні чавуни додатково легують молібденом. При мікролегуванні чавуну молібденом твердість підвищується до 245 - 320 НВ, а фрикційні властивості досягають параметрів, необхідних для виготовлення штампів, проводок дротяних станів і сепараторів підшипників. Сучасні фрикційні чавуни з бейнітоподібною структурою комплексно легують

вольфрамом, молібденом і нікелем [3, 11]. При комплексному мікролегуванні підвищується щільність чавуну в товстостінних виливках.

Додаткове введення в розплав кремнію, кальцію, цирконію і вуглецю збільшує схильність чавуну до усадкової пористості і знижує його фрикційні властивості. Зміна співвідношення між фосфором, кремнієм, марганцем і хромом в фосфористих чавунах є найважливішим резервом регулювання стабільності коефіцієнта тертя та інших фрикційних властивостей, а присадка молібдену в кількості 0,3 - 0,6 % підвищує фрикційну теплостійкість і службові властивості. Чавуни, леговані 0,3 - 0,6 % молібдену, 0,2 - 0,4 % фосфору і 0,03 - 0,06 % бору, характеризуються однорідною структурою графіту і металевої основи (навіть у товстостінних виливках), мають високі механічні та фрикційні властивості, стабільний (до 600°C) коефіцієнт тертя [8, 9].

Широке розповсюдження отримали високолеговані алюмінієві чавуни з пластинчастим графітом. Вони володіють рядом цінних фізичних та експлуатаційних властивостей: високою корозійною стійкістю, зносостійкістю, жароміцністю, стабільним коефіцієнтом тертя і високою теплопровідністю [12]. У сплавах з високим вмістом вуглецю алюміній впливає як на процес графітизації, так і на структуру металевої основи. Алюміній сприяє графітизації чавуну. Однак при збільшенні вмісту алюмінію понад 5 % його графітизуюча здатність знижується, а при 9 - 16 % алюмінію сплав кристалізується без виділення графіту [12]. Чавуни цієї групи характеризуються високою твердістю та крихкістю; вони погано обробляються усіма видами механічної обробки.

Відносно оптимальної структури металевої матриці сірих фрикційних чавунів єдиної думки серед дослідників не існує. Більшість дослідників відзначають, що вибір оптимальної структури металевої матриці напряму залежить від умов експлуатації деталей [3, 6, 8, 9, 11]. Якщо температура у зоні тертя не перевищує 250°C, максимальну фрикційну зносостійкість мають чавуни з мартенситною та мартенситно - бейнітною металевою основою. Мартенсит утворюється без додаткової термічної обробки у процесі охолодження виливки у ливарній формі при концентрації нікелю в чавуні 3,5 - 4,0 %.

При температурі у зоні тертя 250 - 450°C оптимальною структурою металевої основи вважається бейніт. Бейніт значно менш чутливий, ніж мартенсит, до концентраторів напруг, які утворюють пластинки графіту, і забезпечує високу тріщиностійкість сірого чавуну при різкій зміні температури у зоні тертя [3, 9, 11].

Якщо температура у зоні тертя періодично підвищується до 450 - 600°C, найкращим варіантом структури металевої основи сірих фрикційних чавунів є марганцевий аустеніт [11]. Вміст марганцю в аустенітних сірих чавунах складає 10 -

13 %. При такій концентрації марганцю утворюється стабільний аустеніт, який в умовах інтенсивної пластичної деформації поверхневих шарів фрикційних елементів сильно зміцнюється, але не розпадається з утворенням крихкого мартенситу. Марганцевий аустеніт ефективно пручається втомному руйнуванню завдяки поєднанню двох властивостей: здатності до сильного зміцнення при пластичному деформуванні та здатності до релаксації внутрішніх напруг, що виникають при пластичному деформуванні. Частковій релаксації внутрішніх напруг сприяють підвищені температури в зоні фрикційного контакту.

Мета досліджень полягала у вивченні впливу хімічного складу модифікаторів і вмісту легуючих елементів на структуру та фрикційні властивості аустенітних сірих чавунів.

Методика проведення експериментальних досліджень. Хімічний склад чавунів змінювався у наступних межах: 3,2 - 3,8 мас. % С; 9 - 12 мас. % Mn; 2,5 - 3,5 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si. Цілеспрямовано варіювались концентрації вуглецю, марганцю та алюмінію. Концентрація кремнію у всіх зразках залишалась на постійному рівні – 1,7 - 1,9 мас. %. Алюміній вводився до складу чавунів як замітник фосфору.

Для модифікування чавунів використовувались два типи лігатур: силіко-кальцієва лігатура СітМіш-1 та комплексна лігатура ЦІСМ системи Si-Ca-Ba-Se. Лігатури вводились у розплавлені чавуни у вигляді пресованих брикетів безпосередньо перед розливкою чавунів у ливарні форми – кокілі з теплоізоляційним покриттям по ТУ 226.32.884 - 86. Перед введенням у розплавлений чавун брикети зважувались на оптико-механічних вагах ВЛМ-001 з точністю ±0,0005г.

Твердість вимірювалась за шкалами Бринеля та Роквела відповідно на твердомірах ТШ та ТК. Мікроструктуру чавунів досліджували на оптичному мікроскопі МІМ-8М. Для хімічного травлення мікрошліфів використовувалась царська водка. Для шліфування та полірування мікрошліфів використовувався шліфувально-полірувальний станок СШП-12. Мікротвердість вимірювалась на мікротвердомірі ПМТ-3.

Триботехнічні випробування чавунів проводились на машині тертя СМЦ-2 за схемою “ролик - колодка” (рис. 2.1). Ролик 2, виготовлений із сталі 45 твердістю 45 - 48 HRC, обертався із постійною частотою 300 об./хв., а нерухома чавунна колодка 1 притискалась до ролика з зусиллям 350Н (рис. 1). Тривалість кожного триботехнічного випробування становила три хвилини.

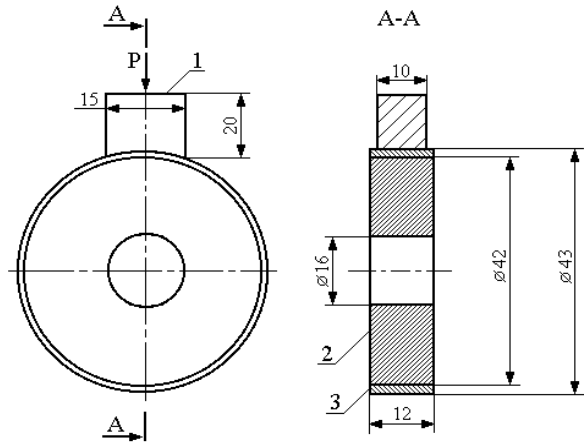


Рис. 1. Схема триботехнічних випробувань фрикційних чавунів:

1 – колодка із фрикційного чавуну; 2 – ролик зі Сталі 45

Після повного циклу випробувань визначалась втрата маси чавунних колодок і розраховувалась інтенсивність зношування чавунів. Зважування колодок до та після випробувань здійснювалось на оптико-механічних вагах ВЛМ-001 з точністю ±0,0005г.

Інтенсивність зношування чавунів визначалась як питома втрата маси колодок:

$$W = \frac{\Delta M}{A}, \text{ г/см}^2, \quad (1)$$

де ΔM – втрата маси чавунних колодок, г;

A – площа поверхні тертя колодок; $A = 1,4 \text{ см}^2$.

Експериментальна оптимізація хімічного складу фрикційних сірих чавунів. Експериментальні дослідження проводились з використанням методики повного факторного експерименту 2^3 (табл. 1, 2) [13].

Таблиця 1

Матриця плану ПФЕ 2^3 "Інтенсивність зношування чавунів, модифікованих лігатурою Si-Ca"

Фактор, що варіюється	Al, %	Mn, %	C, %	Інтенсивність зношування (W), г/см ² (середнє значення)	
Основний рівень	3,0	10,5	3,5		
Інтервал варіювання	0,5	1,5	0,3		
Верхній рівень	3,5	12,0	3,8		
Нижній рівень	2,5	9,0	3,2		
№ досліді	X_0	X_1	X_2	X_3	
1	+1	-1 (2,5)	-1 (9,0)	-1 (3,2)	0,857
2	+1	+1 (3,5)	-1 (9,0)	-1 (3,2)	0,617
3	+1	-1 (2,5)	+1 (12)	-1 (3,2)	0,461
4	+1	+1 (3,5)	+1 (12)	-1 (3,2)	0,561
5	+1	-1 (2,5)	-1 (9,0)	+1 (3,8)	1,263
6	+1	+1 (3,5)	-1 (9,0)	+1 (3,8)	1,394
7	+1	-1 (2,5)	+1 (12)	+1 (3,8)	1,183
8	+1	+1 (3,5)	+1 (12)	+1 (3,8)	1,46

Експеримент складався з 8 дослідів. У кожному досліді випробовувались зразки фрикційного чавуну різного хімічного складу. Кожний дослід дублювався три рази. Факторами, що варіювались, були концентрації легуючих елементів в чавуні: алюмінію (x_1), марганцю (x_2), вуглецю (x_3). Межі варіювання концентрації легуючих елементів: алюмінію – 2,5 - 3,5 %, інтервал варіювання 0,5 %; марганцю – 9 - 12 %, інтервал варіювання 1,5 %; вуглецю – 3,2 - 3,8 %, інтервал варіювання 0,3 %. Умовний вміст легуючих елементів по верхньому та нижньому рівнях позначений через кодовані значення факторів " $X_i = +1$ " і " $X_i = -1$ ". Верхній рівень " $X_i = +1$ " відповідає максимальному вмісту легуючих елементів, нижній рівень " $X_i = -1$ " – мінімальному їхньому вмісту.

Графічне зіставлення експериментальних даних, наведених в табл. 1, 2, дозволяє заключити, що хімічний склад чавунів по різному впливає на їхню зносостійкість залежно від типу модифікатора (рис. 2).

Таблиця 2

Матриця плану ПФЕ 2³ "Інтенсивність зношування чавунів, модифікованих лігатурою Si-Ca-Ba-Ce"

Фактор, що варіюється	Al, %	Mn, %	C, %	Інтенсивність зношування (W), г/см ² (середнє значення)	
Основний рівень	3,0	10,5	3,5		
Інтервал варіювання	0,5	1,5	0,3		
Верхній рівень	3,5	12,0	3,8		
Нижній рівень	2,5	9,0	3,2		
№ дослідів	X_0	X_1	X_2	X_3	
1	+1	-1 (2,5)	-1 (9,0)	-1 (3,2)	0,383
2	+1	+1 (3,5)	-1 (9,0)	-1 (3,2)	0,281
3	+1	-1 (2,5)	+1 (12)	-1 (3,2)	0,232
4	+1	+1 (3,5)	+1 (12)	-1 (3,2)	0,297
5	+1	-1 (2,5)	-1 (9,0)	+1 (3,8)	0,078
6	+1	+1 (3,5)	-1 (9,0)	+1 (3,8)	0,131
7	+1	-1 (2,5)	+1 (12)	+1 (3,8)	0,059
8	+1	+1 (3,5)	+1 (12)	+1 (3,8)	0,084

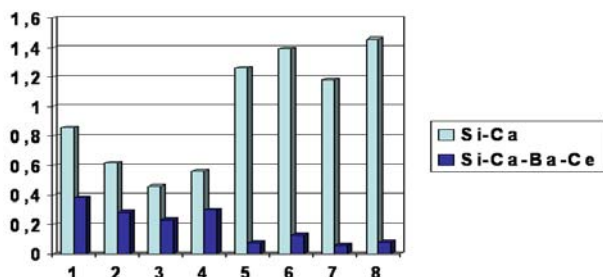


Рис. 2 Інтенсивність зношування (г/см²) фрикційних сірих чавунів, модифікованих лігатурами систем Si - Ca та Si - Ca - Ba - Ce, за номером дослідів

Серед чавунів, модифікованих лігатурою системи Si - Ca, максимальну зносостійкість має чавун, що містить 2,5 % Al; 12 % Mn; 3,2 % C (інтенсивність зношування – 0,461 г/см²) (рис. 2). Максимальна зносостійкість чавуну досягається при вмісті в ньому вуглецю по нижньому рівню – 3,2 %. Серед чавунів, модифікованих лігатурою системи Si - Ca - Ba - Ce, максимальну зносостійкість має чавун, що містить 2,5 % Al; 12 % Mn; 3,8 % C (інтенсивність зношування – 0,061 г/см²) (рис. 2). Максимальна зносостійкість чавуну досягається при вмісті в ньому вуглецю по верхньому рівню – 3,8 %.

Звертає на себе увагу також і той факт, що зносостійкість чавунів, модифікованих лігатурою системи Si - Ca - Ba - Ce, істотно перевищує зносостійкість чавунів, модифікованих лігатурою системи Si - Ca (рис. 2). Тому у подальшому основна увага приділялась оптимізації хімічного складу фрикційних чавунів, модифікованих лігатурою системи Si - Ca - Ba - Ce.

Для виявлення можливих напрямів оптимізації хімічного складу фрикційних чавунів, модифікованих лігатурою системи Si - Ca - Ba - Ce, за результатами випробувань, наведених у табл. 2, було побудоване регресійне рівняння, що описує вплив вмісту основних легуючих елементів (алюмінію, марганцю, вуглецю) на інтенсивність зношування чавунів.

Для побудови залежності інтенсивності зношування чавунів від вмісту в них алюмінію, марганцю та вуглецю скористаємось регресійним рівнянням у неповній квадратичній формі [13]:

$$W' = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3 \quad (2)$$

де X_1, X_2, X_3 – кодовані значення факторів, які можуть змінюватись від -1 до +1 (табл. 2);

b_0, b_1, \dots, b_{123} – коефіцієнти регресійного рівняння.

Коефіцієнти регресійного рівняння (2) розраховуються по залежності [13]:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N X_{i_u} \bar{W}_u}{N} \quad (3)$$

де u – номер дослідів;

X_{i_u} – кодовані значення факторів (X_1, X_2, X_3) в u -му досліді (табл. 2);

\bar{W}_u – середнє значення інтенсивності зношування чавунів в u -му досліді.

Числові значення коефіцієнтів регресійного рівняння, розраховані за формулою (3), наведені у табл. 3.

Таблиця 3

Зведена таблиця з обчисленими значеннями коефіцієнтів регресійного рівняння

b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
0,193	$4,911 \cdot 10^{-3}$	-0,025	-0,105	0,017	0,014	$8,554 \cdot 10^{-3}$	-0,024

З урахуванням числових значень коефіцієнтів $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$ (табл. 3) регресійне рівняння (2) запишеться у вигляді:

$$W' = 0,193 + 4,911 \cdot 10^{-3} X_1 - 0,025 X_2 - 0,105 X_3 + 0,017 X_1 X_2 + 0,014 X_1 X_3 + 8,554 \cdot 10^{-3} X_2 X_3 - 0,024 X_1 X_2 X_3 \quad (4)$$

За процедурою [13] було оцінено статистичну значимість коефіцієнтів регресії. Коефіцієнт b_1 виявився статистично не значимим.

Після виключення коефіцієнту b_1 регресійне рівняння (4) запишеться у виді:

$$W' = 0,193 - 0,025 X_2 - 0,105 X_3 + 0,017 X_1 X_2 + 0,014 X_1 X_3 + 8,554 \cdot 10^{-3} X_2 X_3 - 0,024 X_1 X_2 X_3 \quad (5)$$

Проаналізуємо рівняння (5). Оскільки в ньому відсутній коефіцієнт b_1 (коефіцієнт b_1 статистично незначущий), зміна вмісту алюмінію з 2,5 до 3,5 % не впливає на зносостійкість фрикційних сірих чавунів, модифікованих комплексною лігатурою системи Si - Ca - Ba - Ce. Отже, концентрацію алюмінію в чавунах можна брати по нижньому рівню – 2,5 %. Зміна вмісту марганцю (x_2) з 9 до 12 % та вуглецю (x_3) з 3,2 до 3,8 % призводить до зменшення інтенсивності зношування чавунів. Про це свідчать знаки коефіцієнтів b_2 та b_3 у рівнянні (4.29): $b_2 = -0,025$; $b_3 = -0,105$. Отже, для досягнення максимальної зносостійкості чавунів (мінімальної інтенсивності зношування) вміст марганцю та вуглецю доцільно брати по верхньому рівню – 12 % Mn та 3,8 % C.

Висновки.

1. Досліджено вплив модифікаторів СітМіш-1 і ЦІСМ на структуру та фрикційні властивості сірих чавунів з аустенітною матрицею. Встановлено оптимальні концентрації модифікаторів, при яких досягається максимальна ступінь графітизації чавунів. Оптимальний вміст силіко-кальцієвого модифікатора СітМіш-1 складає 0,05 - 0,1 %, комплексного модифікатора ЦІСМ системи Si-Ca-Ba-Ce – 0,03 - 0,05 %. При такій концентрації модифікаторів вміст вторинного цементиту в чавуні не перевищує 2 - 4 %.

2. Фрикційні чавуни найбільш доцільно модифікувати комплексною лігатурою ЦІСМ системи Si-Ca-Ba-Ce, котра не тільки прискорює процес графітизації чавуна, але і подрібнює графітну фазу (перш за все графітну евтектику).

3. Визначено оптимальний хімічний склад фрикційних сірих чавунів з аустенітною матрицею, який забезпечує мінімальну інтенсивність їхнього зношування в умовах сухого тертя. Оптимальний хімічний склад чавунів, модифікованих комплексною лігатурою Si-Ca-Ba-Ce: 2,5 % Al; 12 % Mn; 3,8 % C. Оптимальний хімічний склад чавунів,

модифікованих лігатурою Si-Ca: 2,5 % Al; 12 % Mn; 3,2 % C.

Література

1. Ямшинський М.М., Назаренко В.С., Кравченко К.О. Аналіз гальмівних колодок та шляхи оцінки їх перспективних конструкцій // ВІСНИК СХУ ім. В. Даля, 2015. № 1 (218). С. 204 – 209.
2. Шелушевич А.М. Структура и свойства литых фрикционных материалов / А.М. Шелушевич, С.П. Бортников. – Полоцк: Изд-во ПГУ, 2010. – 287с.
3. Худокормов Д. А. Повышение прочности и теплопроводности чугуна путём управления процессами формирования его структуры : дис. канд. техн. наук: 05.16.04 / Худокормов Дмитрий Андреевич – Минск, 2000. 144 с.
4. Ползунов В.В. Вягилев К.М., Меркулов Е.И. Металловедение износостойких чугунов. – М.: Metallurgy, 1982. 356 с.
5. Тихонович В. І., Гаврилюк В. П., Тихонович В. В., Грипачевський А. Н. Формування зносостійких структур хромистих сталей і чавунів // Металознавство та обробка металів. 2003. № 3;
6. Пілюшенко В. Л., Шаповалов Ю. С. Формування структури і властивостей зносостійких чавунів зі зміною ступеня їх легування // Металознавство та обробка металів, 2004. № 2.
7. Марукович Е.И., Карпенко М.И. Износостойкие сплавы. – М.: Машиностроение, 2005. 428с.
8. Кузнецов О.П., Махненко Р.С. Сплавы для работы в экстремальных условиях трения. – К.: Наук. думка, 1991. 267с.
9. Tribological study of Fe–Cu–Cr–graphite alloy and cast iron railway brake shoes by pin-on-disc technique / C. Ferrer, M. Pascual, D. Busquets, E. Rayón. // Wear, 2010. 268. P. 784–789.
10. Tribological investigation of titanium-based materials for brakes / Peter J. Blau, Brian C. Jolly, Jun Qu та ін.]. // Wear, 2007. 263. P. 1202 – 1211.
11. Сапунов Д.Н., Корягин П.В., Самойлов В.В. Усталостный износ фрикционных материалов. – К.: Наук. думка, 1992. 193 с.
12. Марукович Е.И., Зинченко О.П. Новые фрикционные материалы. – М.: Машиностроение, 2000. – 274 с.
13. Балицький М.Г. Експериментальні методи оптимізації ливарних сплавів. – Львів: Львівська політехніка, 2003. 204 с.

References

1. Yamshinsky M., Nazarenko V., Kravchenko K. Analysis of the brake pads and the ways of assessing their perspective designs // Visnyk of Volodymyr Dahl EUNU, 2015. № 1 (218). P. 204 – 209.
2. Shelushevych A.M. Struktura y svoistva lytykh fryktsyonnykh materyalov / A.M. Shelushevych, S.P. Bortnykov. – Polotsk: Yzd-vo PHU, 2010. – 287 p.
3. Khudokormov D. A. Povyshenye prochnosty y teploprovodnosty chuhuna putem upravleniya protsessamy formirovaniya ego struktury : dys. kand. tekhn. nauk: 05.16.04 / Khudokormov Dmytryi Andreevych – Mynsk, 2000. 144 p.
4. Polzunov V.V. Viahylev K.M., Merkulov E.Y. Metallovedenye yznosostoikykh chuhunov. – M.: Metallurgy, 1982. 356 p.

5. Tykhonovych V. I., Havryliuk V. P., Tykhonovych V. V., Hrypachevskiy A. N. Formuvannya znosostiikykh struktur khromystykh stalei i chavuniv // Metaloznavstvo ta obrobka metaliv. 2003. № 3.
6. Piliushenko V. L., Shapovalov Yu. S. Formuvannya struktury i vlastyvoستي znosostiikykh chavuniv zi zminoiu stupinia yikh lehuвання // Metaloznavstvo ta obrobka metaliv, 2004. № 2.
7. Marukovych E.Y., Karpenko M.Y. Yznosostoikyе splavy. – M.: Mashynostroenye, 2005. 428 p.
8. Kuznetsov O.P., Makhnenko R.S. Splavy dlia raboty v ekstremalnykh uslovyakh treniya. – K.: Nauk. dumka, 1991. 267 p.
9. Tribological study of Fe–Cu–Cr–graphite alloy and cast iron railway brake shoes by pin-on-disc technique / C. Ferrer, M. Pascual, D. Busquets, E. Rayón. // Wear, 2010. №268. P. 784–789.
10. Tribological investigation of titanium-based materials for brakes / Peter J. Blau, Brian C. Jolly, Jun Qu та ін. // Wear, 2007. №263. P. 1202–1211.
11. Sapunov D.N., Koriahyn P.V., Samoilo V.V. Ustalostnyi yznos fryktsyonnykh materyalov. – K.: Nauk. dumka, 1992. 193 p.
12. Marukovych E.Y., Zynchenko O.P. Novye fryktsyonnye materyaly. – M.: Mashynostroenye, 2000. 274 p.
13. Balytskyi M.H. Eksperymentalni metody optymizatsii lyvamykh splaviv. – Lviv: Lvivska politehnika, 2003. 204 p.

**Шевченко А.В., Сергиенко О.В.,
Возлюбленный Б.Н. Исследование влияния
микролегирования на износостойкость тормозных
колодок**

В статье исследовано влияние микролегирования на износостойкость тормозных колодок, а именно влияние концентрации углерода и алюминия на содержание, морфологию и дисперсность цементита в чугунах при введении модификаторов системы Si-Ca и Si-Ca-Ba-Ce. Полученные закономерности графитизации марганцевых серых чугунов, легированных алюминием, при их модифицировании лигатурами системы Si-Ca и Si-Ca-Ba-Ce дают возможность установить оптимальное содержание этих лигатур в чугунах, при котором обеспечивается его удовлетворительная структура без образования междендритного графита и без превышения допустимого содержания вторичного цементита, который обеспечивает минимальную интенсивность изнашивания тяжело нагруженных тормозных колодок в условиях сухого трения.

Ключевые слова: *тормозная колодка, износостойкость, микролегирование, фрикционный чугун, интенсивность изнашивания*

Shevchenko O.V., Serhiienko O.V., Vozliublenyi B.M. Study of the micro-alloying influence on the wear resistance of brake pads

The article investigates the effect of microalloying on the wear resistance of brake pads, namely the effect of carbon and

aluminum concentration on the contents, morphology and dispersion of cementite in cast iron with the introduction of modifiers of Si-Ca and Si-Ca-Ba-Ce, which allowed to optimize the composition of manganese gray cast iron by the criterion of the lowest wear intensity. The obtained regularities of graphitization of manganese gray cast irons alloyed with aluminum, when modified by ligatures of the Si-Ca and Si-Ca-Ba-Ce system make it possible to establish the optimal contents of these ligatures in cast iron, which ensures its satisfactory structure without interdendritic graphite and without exceeding the allowable the content of secondary cementite, which provides a minimum wear intensity of heavily loaded brake pads in dry friction. In order to determine possible directions for optimizing the chemical composition of friction gray cast irons modified with the Si - Ca - Ba - Ce alloy, a regression equation was constructed on the basis of accelerated tribotechnical tests, which describes the dependence of the wear rate of brake pads on the content of the main alloying elements: aluminum, manganese, carbon. Tribotechnical tests were carried out according to the scheme of a full factorial experiment; the concentrations of aluminum, manganese and carbon were variable factors. Factors were varied at two levels: at the upper level and at the lower level. The minimum wear rate of cast irons corresponds to the concentration of carbon and manganese at the upper level. The aluminum concentration does not affect the wear rate of cast irons, that is, the aluminum concentration can correspond to the lower level of variation. The authors of the article proved that the modification of friction cast irons with a complex master alloy containing barium and cerium gives the most stable and reliable results in the context of preventing the formation of graphite inclusions located between grains. Therefore, despite an increase in the number of graphite inclusions in cast irons with an increase in carbon concentration in cast irons, the wear rate of cast irons decreases. In this case, graphite continues to play the role of a solid lubricant, and an increase in the number of graphite inclusions without increasing their size has a positive effect on the wear rate of cast irons.

Key words: *brake pad, wear resistance, micro-alloying, friction cast iron, wear intensity.*

Шевченко Олександр Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк), shev.cmw@ukr.net

Сергиенко Оксана Вікторівна – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк), sergienko.o.v@gmail.com

Возлюбленный Богдан Миколайович – студент групи ГМ-18д факультету інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) bogdanzenkevich1997@gmail.com

Стаття подана 25.01.2021 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-201-213>

УДК 621.9.048

ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВІБРАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ «ПРОБКА КУЛЬОВА»

Шумакова Т.О., Ніколаєнко А.П.

INCREASE OF PERFORMANCE OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF VIBRATION TREATMENT OF DETAILS «BALL CORK»

Shumakova T.O., Nikolaienko A.P.

Стаття присвячена проблемам фінішної обробки деталей зі сферичними поверхнями, в тому числі деталей кульових фланцевих кранів «Пробка кульова». Експериментально встановлено, що після вібраційного шліфування та полірування якості поверхонь поліпшилася з 3-го до 8-го класів шорсткості. На підставі досліджень наведені науково обгрунтовані практичні рекомендації щодо підвищення продуктивності технологічних процесів вібраційного шліфування за рахунок скорочення часу обробки шляхом: застосування абразивних гранул в формі П12 та проведення вібраційного шліфування на верстаті контейнер якого розташовано під кутом 45° до осі ординат, перпендикулярній повздовжній осі, що проходить через його центр мас.

Ключові слова: вібраційна обробка, технологічний процес, сферична поверхня, абразивний гранула, шорсткість поверхні, продуктивність.

Вступ. На сучасному етапі розвитку машинобудування підвищення продуктивності та якості праці вимагає значного вдосконалення та оптимізації технологічних процесів обробки деталей машин. Для виготовлення деталей нафтової, хімічної і харчової промисловості, які працюють з агресивними середовищами, при виробництві деталей складної форми з важкооброблюваних сплавів набуває все більшої значущості оздоблювальні операції технологічного процесу, що включають процес шліфування (шліфування, хонінгування, полірування) і різні методи поверхнево-пластичного деформування (обкатка, дробеструйна обробка та ін.). Скорочення припусків на механічну обробку в сучасному машинобудуванні призводить до значного збільшення числа чистових операцій, серед яких найважливіше місце належить операціям шліфування та полірування [1, 2]. Саме на фінішних операціях формується поверхневий шар деталі, що визначає їх експлуатаційні властивості.

Ефективність застосування абразивних інструментів на операціях фінішної обробки залежить від багатьох технологічних факторів: марки оброблюваного матеріалу та його термообробки; розмірів, форми і виду оброблюваної поверхні, необхідної точності та якості поверхні заготовки; припуску, що знімається; програми випуску; технологічних можливостей обладнання; режимів і умов обробки та ін.

Одним з поширених виробів, що застосовується в багатьох галузях промисловості є кульовий кран (рис. 1). До сучасних кульових кранів пред'являються все більш високі вимоги щодо їх надійності при експлуатації та ресурсу роботи. При роботі в агресивних середовищах з присутністю абразивних частинок застосування пробки кульового крана, виконаної з конструкційної сталі з нанесеним покриттям не завжди доцільно й гарантує високий ресурс. Виконання жорстких вимог змушує широко використовувати міцні корозійностійкі сталі, приділяти значну увагу якості поверхневого шару основних деталей крана, що викликає зростання ролі оздоблювально-зміцнюючої обробки. Нержавіючі сталі, володіючи цінними конструкційними властивостями, характеризуються поганою оброблюваністю. Особливу складність представляє фінішна обробка точних фасонних поверхонь.

Перспективним напрямком оздоблювальної обробки пробок кульових кранів із нержавіючих сталей є вібраційне шліфування та полірування. Цей метод забезпечує високу якість поверхневого шару при порівняно невеликих витратах на його реалізацію. Висока ефективність використання методів вібраційного шліфування та полірування деталей машин доведено роботами багатьох дослідників [3–7], а також підтверджується практикою сучасного машинобудування.

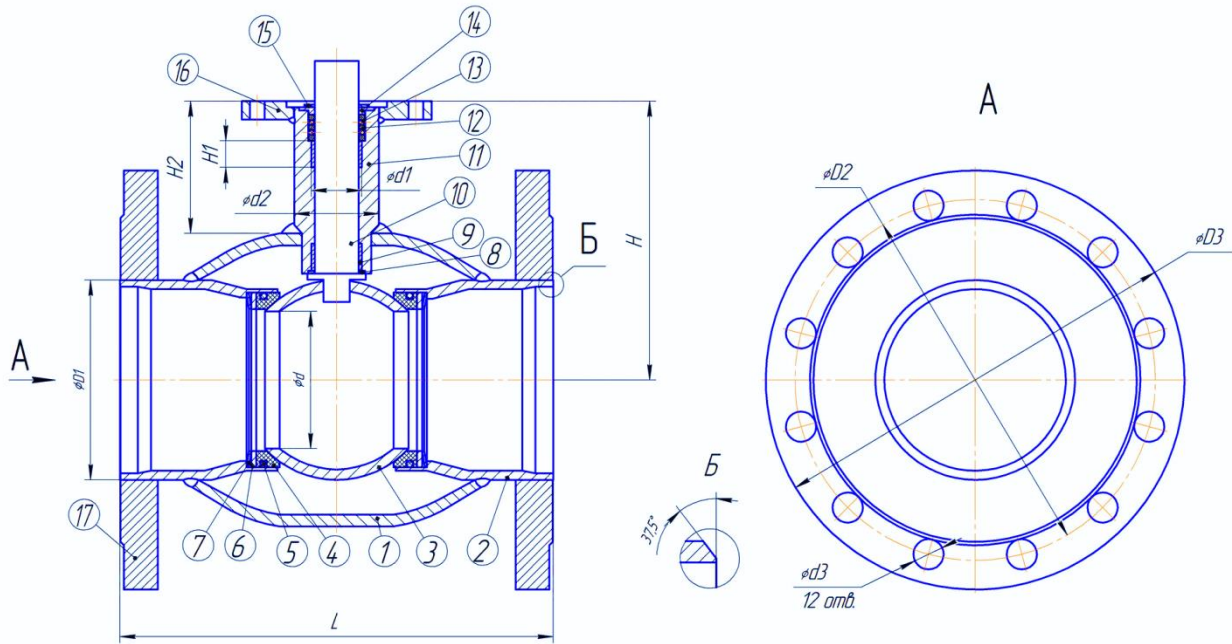


Рис. 1. Креслення крану кульового фланцевого DN 200 PN 25:

1 – корпус; 2 – патрубок; 3 – пробка кульової; 4 – сідло; 5 – ущільнюоче кільце кулі; 6 – кільце опорне; 7 – пружина тарілчаста; 8 – кільце штоку 9 – підшипник; 10 – шток; 11 – горловина; 12 – шайба упорна; 13 – кільце ущільнювача штока; 14 – втулка піджимна; 15 – кільце стопорне; 16 – фланець верхній; 17 – фланець

Кульові фланцеві крани (рис. 1) призначені для установки як запірний пристрій, що перекриває потоки рідких і газоподібних робочих середовищ на трубопроводах в системах водо- і газопостачання, підприємствах теплоенергетики, в хімічній, нафтопереробній, газовій та інших галузях промисловості. При цьому температура робочих середовищ може коливатися від мінус 30°C до плюс 200°C.



Рис. 2. Зовнішній вигляд деталей «Пробка кульова»

Пробка кульова, є основним елементом кульового крана. Цю деталь виконують у вигляді кулі з двома співвісними отворами за допомогою операцій обробки тиском і зварювання з наступною механічною обробкою зі товстолистових корозійностійких, жаростійких і жароміцних сталей марок 14X17H2, 12X18H10T, 10X14Г14Н4Т (ГОСТ 7350-77) (рис. 2).

Деталь працює в парі тертя з неметалевими гумотехнічними виробами, тому до зовнішньої поверхні такої деталі пред'являються вимоги щодо шорсткості поверхні – $Ra=0,8...0,3$ мкм і відсутності слідів інструменту.

Традиційні методи обробки такої деталі (точіння на верстатах з ЧПУ й шліфування правленими кругами із застосуванням спеціальних пристосувань) забирають велику кількість штучного часу обробки, вимагають спеціального устаткування й висококваліфікованих кадрів, що значною мірою підвищує собівартість продукції [1, 8].

Метою досліджень є підвищення продуктивності технологічних процесів вібраційного шліфування та полірування деталей «Пробка шарова» шляхом вибору науково обґрунтованих параметрів обладнання, інструменту та режимів обробки.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Провести аналіз методів, що використовуються для обробки деталей сферичної форми.

2. Дослідити можливість обробки деталей «Пробка кульова», виконаних з нержавіючої сталі, вібраційним методом.

3. Розробити технологію обробки сферичних поверхонь деталей вібраційним методом в середовищі вільних абразивів.

4. Дослідити точність форми та шорсткість поверхонь сферичних деталей після їх вібраційної обробки.

5. Розробити рекомендації, щодо технологічних рішень, які дозволять досягти підвищення продук-

тивності вібраційного шліфування та полірування сферичних поверхонь деталей з нержавіючої сталі.

Аналіз досліджень і публікацій. Технологія фінішної обробки сферичних поверхонь деталей залежить від особливостей їх геометричної форми. Деталі, що мають сферичні поверхні, можна розділити на три групи. Залежно від виду сферичної поверхні можна виділити деталі, у яких сферу можна безперешкодно обробити з усіх боків. До цієї групи належать деталі типу куль підшипників, пробки шарових кранів зі штоком, що відокремлюється [1, 8, 9]. Обробка деталей цієї групи в основному виконується простими високопродуктивними методами [1, 2] при яких деталь знаходиться в незакріпленому стані (шліфування кульок підшипників) або кріпиться за допомогою спеціальних верстатних пристосувань (шліфування пробок шарових кранів абразивним кругом з поперековою подачею).

Шліфування підшипникових кульок в масовому виробництві виконується на спеціальних елеваторних кулькошліфувальних верстатах двома дисковими шліфувальними кругами одне з яких або обидва містять кільцеві робочі канавки для розміщення кульок (рис. 3) [10]. Сутність методу полягає в наступному: дисковий шліфувальний круг 3 обертається, притискний круг 2 при цьому, слугує для створення притискного зусилля кульок, які перекочуються по кільцевим канавкам. На притискному диску 2 виконано вирізи 5 для виведення кульок в елеватор 4 з робочої зони. В елеваторі 4 відбувається переорієнтування та перемішування кульок, після чого вони знов потрапляють в зону обробки, набуваючи необхідної точності поверхонь (до 10 та 16 ступені точності за ДСТУ 3722:2018).

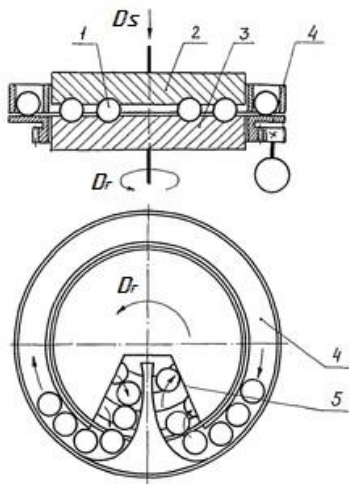


Рис. 3. Схема шліфування кульок підшипників в кільцевих канавках елеваторний метод [10]:

1 – кулька, що оброблюється; 2 – притискний шліфувальний круг з вирізами 5; 3 – дисковий шліфувальний круг; 4 – елеватор; D_r – головний рух; D_s – рух подачі

Автором роботи [11] було запропоновано метод шліфування сферичних поверхонь, суть якого

полягає в наступному: куля 6 отримує обертання від провідного круга 3, а його гвинтові канавки 4 переміщують кулі вздовж шліфувального круга (рис. 4). При проходженні кулею зони гвинтової канавки шліфувального круга відбувається переривання його контакту зі шліфувальними ділянками, і куля звільняється від дії на нього сил різання. На думку автора [11] у цей момент відбувається зміна динамічного стану технологічної системи: куля – абразивний круг, що веде – шліфувальний круг – опорний ніж, і куля змінює свою орієнтацію відносно ріжучого інструменту. В результаті цього відбувається миттєвий розворот кулі на деякий кут, величина якого залежить від багатьох як систематичних, так і випадкових факторів. Як стверджує автор [11], виконання на шліфувальному кругу гвинтової канавки дозволяє багаторазово переривати контакт кулі зі шліфувальним кругом, тобто вести обробку дискретно, сферичними сегментами, які в результаті створюють сферичну поверхню деталі.

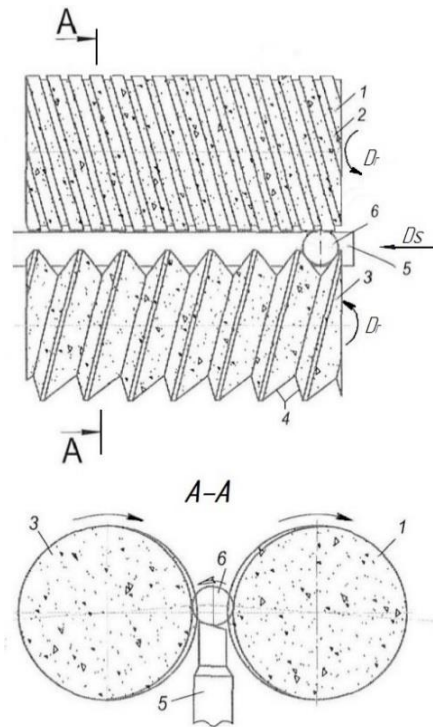


Рис. 4. Схема способу безцентрового шліфування кульок [11]:

1 – шліфувальний круг з гвинтовими канавками 2; 3 – абразивний круг, що веде з гвинтовою V-подібною канавкою 4; 5 – скошений опорний ніж; 6 – деталь, що оброблюється; D_r – головний рух; D_s – рух подачі

Основними недоліками описаних вище методів є їх малопродуктивність, складність обладнання та конструкції шліфувальних дисків, що використовуються в якості інструментів, та необхідність правки цих інструментів при їх зношуванні, що значно здорожує технологію обробки.

Шліфування сферичних поверхонь деталей абразивним кругом виконується за допомогою фасонних шліфувальних кругів з використанням копирів

по яким переміщуються або деталь, що оброблюється, або шліфувальний круг [1, 2] (рис. 5).

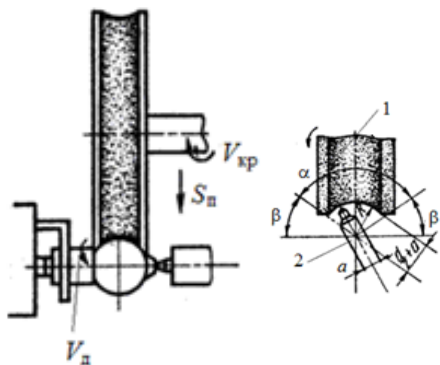


Рис. 5. Схема обробки: а – шліфування сферичних поверхонь абразивним кругом з поперековою подачею; б – профілювання шліфувального круга по радіусу; 1 – шліфувальний круг; 2 – алмазний олівець; $V_{кр}$ – швидкість шліфувального круга, с; V_d – швидкість деталі; S_n – поперекова подача

Головним недоліком представленого методу обробки є його низька продуктивність та висока собівартість. Для обробки кожного типорозміру деталей необхідно мати комплект установочних пристосувань та спеціальних фасонних шліфувальних кругів. Крім того є необхідність правки кругів в процесі їх зношування. Важливим недоліком також є можливість в результаті перегріву деталі в процесі різання появи шліфувальних прижогів (ділянок зі зниженою твердістю) і мікротріщин.

Аналізуючи наведені вище результати досліджень можна відзначити, що на сьогоднішній день в технології машинобудування недостатньо детально розглянуті технологічні особливості обробки сферичних поверхонь. Дані, наявні в підшипниковій промисловості, не можуть мати широкого застосування в серійному та дрібносерійному виробництвах.

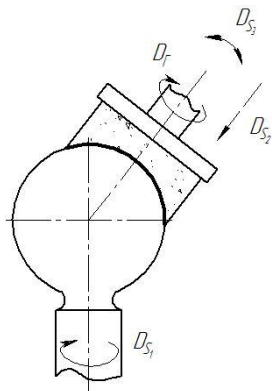


Рис. 6. Схеми шліфування сферичних поверхонь абразивним кругом з складним відносним рухом заготовки та абразивного інструменту [1]: D_g – головний рух; D_s – рух подачі

До другої групи можна віднести деталі, у яких сферична поверхня має конструктивні обмеження. Деталі-представники цієї групи – кульові пальці

[1, 2]. Для обробки сферичних поверхонь деталей другої групи невеликого діаметру широко застосовується урізне шліфування фасонним абразивним кругом із застосуванням профільної правки (рис. 6). Цей метод дозволяє отримувати високу точність форми і шорсткість поверхні до $Ra\ 0,63 \dots 0,32$. [1]. Істотними недоліками такої технології є необхідність частішої правки абразивного інструменту та використання трудомісткого і малопродуктивного процесу доведення, крім того, даний метод не забезпечує стабільно необхідну точність виготовлення. Даний метод непридатний для обробки сфер великого діаметру.

До третьої групи можна віднести деталі, у яких є конструктивні елементи з двох протилежних сторін сферичної поверхні. До таких деталей відносяться пробки кульових кранів. Одним із шляхів поліпшення параметрів шорсткості поверхневого шару і надання поверхні певної мікро геометрії при абразивній обробці є застосування складного відносного руху заготовки й абразивного інструменту при хонінгуванні [8] (рис. 7). При цьому методі обробки вісь обертання абразивного інструменту перпендикулярна осі обертання заготовки. Метод дозволяє виконувати шліфування сферичних поверхонь різного діаметру і отримувати високу точність форми, порядку $0,02\ \text{мм}$ і шорсткість поверхні до $Ra\ 0,32 \dots 0,16\ \text{мкм}$. Сутність методу полягає в наступному: заготівля в процесі обробки обертається навколо осі X (рис. 7) з кутовою швидкістю $\omega_{заг}$; абразивний головка, що складається з чотирьох абразивних брусків, обертається навколо осі Y з кутовою швидкістю $\omega_{хон}$. Частота обертання заготовки може змінюватися від 20 до 800 об/хв з кроком в 1 об/хв. При цьому автор роботи [8] зазначає, що частота обертання абразивної головки може змінюватися в межах 20, 200, 400, 800 об/хв. Поверхня обробки представляє собою сферу, усічену з двох протилежних сторін на рівну величину. У сфері є наскрізний отвір.

Недоліком описаного методу є його висока собівартість, бо для кожного типорозміру деталей необхідно виготовляти бруски з фасонною радіусною поверхнею, що дуже збільшує вартість технологію обробки.

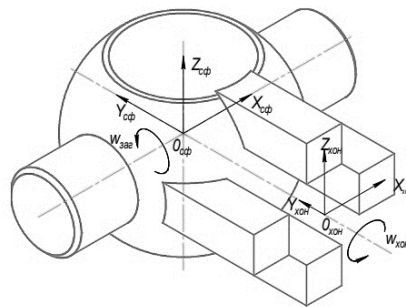


Рис. 7. Схема руху інструменту і заготовки при шліфуванні сфери кульового крана [8]

Вирішення проблеми фінішної обробки деталей сферичної форми з досягненням високих показників

точності та якості поверхонь можливо використання методів обробки без жорсткого зв'язку системи ВПЗ.

Одним з поширених методів обробки деталей складної конфігурації без їх закріплення є вібраційна обробка в середовищі вільних абразивів. Завдяки високій ефективності та універсальності вібраційна обробка застосовується в різних сферах виробництва [12-16]. Цей метод дозволяє одночасно обробляти велику кількість деталей, при цьому віброобробка може застосовуватися як на операціях шліфування й зняття задирок так і для полірування, поверхневого зміцнення, підготовки поверхні під покриття. Вібраційні методи обробки можна розділити в залежності від якості отриманої поверхні та інструмента, що застосовувався на віброшліфування (абразивні гранули) та віброполірування (безабразивні матеріали), остання операція поєднується з процесом зміцнення при застосуванні сталевих полірованих кульок або роликів [17, 19, 21, 23].

Сутність цього методу полягає в тому, що оброблювані деталі та робоче середовище у відповідній пропорції поміщаються в підпружинений контейнер вібраційного верстата. Робоче середовище складається з абразивних гранул і робочих рідин, найчастіше – хімічно активних розчинів [18, 22]. Існує велика кількість схем вібраційної обробки, з закріпленням деталі у віброуючому контейнері та обробкою в навал, різноманітні форми контейнерів верстатів (циліндрична, U-подібна, тороїдальна, тороїдно-гвинтова спіральна) але найбільшого поширення має саме U-подібна форма контейнера, наведена на рис. 8.

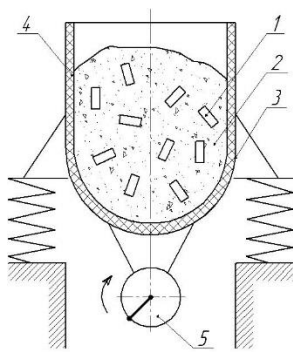


Рис. 8. Принципова схема віброобробки:
1 – деталь; 2 – гранули; 3 – контейнер;
4 – футерування контейнера; 5 – вал вібробудувач

Під впливом коливань в процесі обробки орієнтація завантажених оброблюваних деталей безперервно змінюється. Вони переміщуються в потоці циркулюючого робочого середовища з різною швидкістю в залежності від маси деталі та гранули. При цьому, на думку авторів [21-23], спостерігається два основних види рухів робочого середовища: осцилююче, частота цього руху відповідає частоті коливань контейнера верстата, і циркуляційний – повільне обертання всієї середовища щодо поздовжньої осі контейнера. В результаті стохастичних відносних

рухів блукаючих абразивних гранул, що супроводжуються ударним взаємодією абразивних гранул між собою і з деталями, протікають процеси, з одного боку, знімання з деталей металу і його окислів і формування нового поверхневого шару, а з іншого боку, спостерігається знос абразивних гранул протягом усього часу обробки [24].

Слід зазначити, що ефективна віброобробка деталей можлива тільки при наявності стійкого циркуляційного руху робочого середовища. Забезпечення такого руху є важкою, але необхідною задачею, та потребує значних корегувань в залежності від типу оброблюваних деталей. Моделювання та дослідження цього питання є актуальним і досліджено не в повному обсязі.

Автори роботи [25] вважають, що рух маси завантаження в контейнері U-подібної форми ділиться на три зони: ковзання, циркуляції, вторинної циркуляції (рис. 9). У зоні ковзання відбувається ковзаючий рух часток завантаження з найбільшою (максимальною) швидкістю. Друга зона є найбільшою і в ній, як і в першій, маса завантаження рухається по траєкторії, близькій до кола, в напрямку, протилежному напрямку руху валу вібробудувача. Причому зовнішні шари переміщуються з великими швидкостями, а шари, розташовані ближче до центру, – з меншими. У зоні вторинної циркуляції (на рис. 9 III зона), за результатами досліджень, наведених в [25] деталі не обробляються. Маса завантаження обертається по траєкторії, близькій до кола з невеликим радіусом, в напрямку, що збігається з напрямком обертання валу вібробудувача, при цьому авторами [25] не наводяться рекомендації щодо усунення зони вторинної циркуляції.

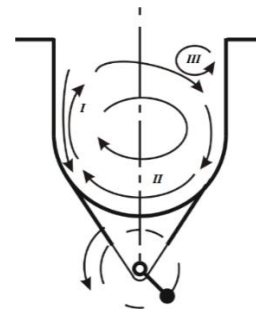


Рис. 9. Схема зон переміщення робочого середовища в U-подібному контейнері вібраційного верстата:
I – зона ковзання; II – зона циркуляції;
III – зона вторинної циркуляції

Боротьбі з пасивними зонами циркуляції робочого середовища в контейнері вібраційного верстата U-подібної форми було присвячено ряд робіт [6, 7, 25, 26].

Автором роботи [26] було наведено моделі, що дозволяють вибрати раціональні параметри роботи вібраційного верстата, ґрунтуючись на необхідній і для абразивної і для зміцнюючої обробки передачі потужності в зону контакту деталь-гранула. В роботі [26] також були запропоновані режими, при яких

спостерігається стабільний циркуляційний рух робочого середовища (отже й рівномірна обробка деталей). Визначено, що в різних зонах U-образного вібруючого контейнера з'їм металу з зразків нерівномірний, а для отримання рівномірного знімання металу необхідна наявність рівномірного циркуляційного потоку, швидкість якого залежить від частоти і амплітуди коливань. Автором [26] встановлено, що зміна силового імпульсу і переданої потужності в зону обробки залежить від поєднання параметрів частоти і амплітуди коливань. Для операції вібраційного шліфування поверхонь циліндричних ступінчастих зразків виконаних зі сталі 18X2H4MA ГОСТ 4543-71 на вібраційному верстаті моделі ВМІ-1004А запропоновано поєднання частоти 34 Гц та амплітуди 3 мм. Нажаль, в роботі [26] не проводилися дослідження вібраційного шліфування та полірування зразків сферичної форми, але рекомендації, що приводять автор можуть бути корисними при розробці технологічних процесів вібраційної обробки деталей, що виконано з корозійностійких, жаростійких і жароміцних сталей.

Автором роботи [6] були визначені частотні режими вібраційного верстата моделі УВІ-25, при яких циркуляційний рух елементів робочого середовища та траєкторії руху деталей забезпечують стабільність технологічного процесу: частота коливань контейнера – 50 Гц, амплітуда – $A=2,5$ мм. Однак ця робота була присвячена пошуку технологічних рішень обробки дрібних та плоских деталей. Можливість обробки фасонних деталей складної геометричної форми чи деталей сферичної форми в цій роботі не розглядалася.

Для досягнення найліпшого технологічного результату автором робіт [7] було запропоновано математичну модель руху контейнера вібраційного верстата, що враховує вплив маси завантаження з урахуванням реологічних параметрів коливальної системи. Автором [7] було також встановлено, що вібраційна обробка чинить значний позитивний вплив на параметри мікрогеометрії поверхневого шару виробів. При застосуванні вібраційної обробки відбувається змінання вершин шорсткості, зростає опорна довжина профілю на рівні 10...40% в середньому в 2,6 рази, зростають радіуси вершин виступів в середньому в 18,3 рази, що веде до зростання площі контакту поверхонь, що сполучаються та до зростання зносостійкості до 15...20%. В роботі наведено результати експериментальних досліджень обробки деталей середнього типорозміру складної конфігурації [7], але немає інформації, щодо обробки деталей сферичної форми.

Результати досліджень. Для досягнення поставленої мети було проведено ряд експериментальних досліджень. При проведенні досліджень були прийняті наступні постійні умови:

1. В якості зразків для операцій вібраційного шліфування та полірування були обрані 4 групи заготовок деталей «Пробка кульова». Всі заготовки пройшли попередню токарну обробку

на верстаті зЧПК. На зовнішніх поверхнях заготовок були явні дефекти – глибокі риски від різця, подряпини, реб-ристість, забоїни, вм'ятини з глибиною 0,5-0,8 мм, зварювальні прижоги. На внутрішніх, необроблених поверхнях, – сліди іржі, раковини, напливи в зоні зварювального шва. На торцевих поверхнях заготовок наявні задирки. Шорсткість зовнішніх поверхонь до обробки лежала в межах:

- для заготовок 1-3 груп Ra 6,5-6,1 мкм;
- для заготовок 4 групи Ra 12,8...11,4 мкм.

Характеристика оброблюваних заготовок наведена в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристика заготовок, що оброблювалися

№ гр.	Прохідний діаметр, $d_{пр}$, мм	Зовнішній діаметр, $D_{нз}$, мм	Висота, H, мм	Маса, г
1	15	26	16	19,4
2	25	42	28	62,15
3	30	48	33	66,2
4	65	98	68	395,4

Як, видно, з табл. 1 оброблювані заготовки належать до чотирьох типорозмірів зі стандартного ряду, нормованого по прохідному діаметру ($d_{пр}$): 15, 25, 32 і 65 мм. Зовнішній вигляд заготовок деталей «Пробка шарова» наведено на рис. 10.



Рис. 10. Фото заготовок деталей «Пробка шарова» до обробки

Всі заготовки, що досліджувались, виконані зі товстолистової корозійностійкої, жаростійкої та жароміцної сталі марки 12X18H10T (ГОСТ 7350-77), хімічний склад якої наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Хімічний склад в% сталі 12X18H10T

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Ti	Fe
до 0,12	до 0,8	до 29-11	до 0,02	до 0,035	до 0,035	17-19	до 0,3	0,4-1	~67

Сталь 12X18H10T аустенітного класу, застосовується для деталей, що працюють при температурі до 600 °С. Основне застосування – зварні апарати і ємкості, що працюють в розведених розчинах азотної, оцтової, фосфорної кислот, розчинах лугів і солей та інші деталі, що працюють під тиском при температурі від –196 до +600 °С, а при наявності агресивних середовищ до +350 °С.

До всіх деталей, що надійшли на операції вібраційної обробки шліфуванням та поліруванням, пред'являлися вимоги округлення гострих кромки до радіусу 0,3 мм; отримання однорідних матових поверхонь деталей без спрямованих слідів обробки, прижогів і мікротріщин з рівномірно розподіленими заглибленнями; зниження шорсткості поверхні з 3-го до 7-8-го класів шорсткості без зміни геометричних розмірів оброблюваних деталей.

2. Вибір моделі вібраційного верстата для проведення експериментального дослідження здійснювався виходячи з габаритів оброблюваних деталей і робочого об'єму контейнера, технічний опис обладнання наведено в табл. 3. Зовнішній вигляд верстатів наведено на рис. 11.

Таблиця 3

Технічні характеристики вібраційних верстатів

Характеристики верстата	Модель верстата	
	УВІ-25	ВМІ-1003
Об'єм контейнера, л	25	15
Габаритні розміри контейнера, мм	250×450×350	200×400×300
Розташування віброзбудника	Нижче	Нижче
Кількість віброзбудників	1	1
Амплітуда коливань, мм	0,5...4	0,2...5
Частота коливань, Гц	34, 43, 50, 54, 63, 67	35, 63
Потужність привода, кВт	4,5	0,7



УВІ-25



ВМІ-1003

Рис. 11. Фото верстатів, що використовувалися для проведення експериментальних досліджень

При виборі моделі вібраційного верстата була врахована можливість вільного циркуляційного переміщення заготовок в контейнері. Так шліфування всіх деталей не викликало ніяких труднощів при обробці в навал та проводилося на верстаті моделі УВІ-25. При виконанні операцій вібраційного полірування для всіх зразків використовувався верстат модель ВМІ-1003.

3. Для виконання операції попереднього шліфування (очищення, зняття окалини і округлення

гострих кромки) для деталей 4 групи були обрані режими: амплітуда коливань 3 мм, частота – 50 Гц; для деталей всіх груп для виконання операцій вібраційного шліфування режими – амплітуда коливань 1 мм і частота 50 Гц; для полірування – амплітуда коливань 1 мм і частота 35 Гц.

Режими вібраційної обробки обралися виходячи з уже існуючих технологічних рекомендацій [6, 26].

4. Як інструмент при вібраційній обробці заготовок всіх груп використовувалися робочі середовища, що склалися з:

– для операцій шліфування: абразивних гранул АН-2 грануляцією 15...25 мм (біл шарошліфовальних кругів типу ТУ 2-036-159-80) і хімічно активного розчину до складу якого входила щавлева кислота $C_2H_2O_4$ – 30 г/л; перекис водню H_2O_2 – 30 г/л; сірчана кислота H_2SO_4 – 2 мл/л; сульфанол – 0,1 г/л;

– для операцій полірування: сталевих загартованих полірованих куль $\varnothing 5$ мм зі сталі ШХ-15 ГОСТ 801-78 і розчину соди кальцинованої Na_2CO_3 – 30 г/л, триетаноламіну $(HOCH_2CH_2)_3N$ – 30 г/л та олеїнової кислоти $CH_3(CH_2)7CH=CH(CH_2)7COOH$ – 10 г/л.

Завантаження контейнеру верстата робочими тілами становило 2/3 від загального об'єму контейнера.

Хімічно активний розчин в процесі обробки подавався безперервно.

Зовнішній вигляд робочих тіл, що використовувалися при проведенні експериментальних досліджень наведено на рис. 12.



а

б

Рис. 12. Фото робочих тіл, що використовувалися при проведенні експериментальних досліджень: а – АН-2; б – сталеві загартовані поліровані кулі $\varnothing 5$ мм

5. При обробці заготовок 1-3 груп час вібраційної обробки склав: віброшліфування – 90 хв.; віброполірування – 60 хв.

При обробці заготовок 4 групи процес було поділено на три етапи: попереднє шліфування (очистка і видалення окалини) продовж 60 хв.; чистове шліфування – 60 хв. та віброполірування впродовж 60 хв.

Всі оброблені в ході експериментальних досліджень заготовки за класифікацією, наведеною в [9], відносяться до середнього типорозміру. Для цих деталей дослідниками лабораторії НІЛ ОСА «СНУ ім. В. Даля» були розроблені типові технологічні процеси вібраційної обробки. Приклад маршрутних карт типових технологічних процесів вібраційного шліфування та полірування деталей «Пробка шарова» наведені в табл. 4, 5.

Таблиця 4

Операційна карта технологічного процесу вібраційного шліфування деталей «Пробка шарова»

СНУ ім. В. Даля	Операційна карта типового технологічного процесу ВіО	Найменування деталей «Пробка шарова»							
Найменування операції	Марка матеріалу	Характеристика деталей							
Віброшліфування	Сталь 12Х18Н10Т ГОСТ 7350-77	Габаритні розміри Ø15×Ø26×16 мм; Ø25×Ø42×28 мм; Ø30×Ø48×33 мм				Маса 0,019 кг; 0,062 кг; 0,066 кг			
Обладнання, притосування	Робочий розчин								
Вібраційний верстат моделі УВИ-25, тара для деталей	Склад і концентрація робочого розчину					Кількість розчину			
	Щавлева кислота C ₂ H ₂ O ₄ Перекис водню H ₂ O ₂ Сірчана кислота H ₂ SO ₄ Сульфанол	30 г/л 30 г/л; 2 мл/л; 0,1 г/л				Розчин подається безперервно			
Технічні умови на деталі									
До обробки					Після обробки				
1. Деталі отримані методом зварювання та обробки тиском з наступним попереднім точінням на верстаті з ЧПК. 2. Дефекти поверхні: на зовнішніх поверхнях є глибокі риски від різця, ребристість, подряпини, забоїни, вм'ятини з глибиною 0,5-0,8 мм, зварювальні прижоги, задирки. 3. Вихідна шорсткість поверхні (без урахування виявлених дефектів) відповідає Ra 6,5-6,1 мкм					1. Дефекти поверхні вилучені повністю. 2. Шорсткість поверхні відповідає Ra = 0,63...1,1 мкм. 4. Радіус округлення гострих кромки 0,3 мм. 3. Поверхня має природний матовий колір.				
№ п/п	Зміст переходу	Інструмент			Умовні позначення		Тривалість переходу, хв		
		Характеристика робочого середовища	Розміри, мм	Об'єм загрузки, %	Ставлення деталей і середовища	Амплітуда, мм	Частота, Гц	Основний час	Допоміжний час
1	Встановити режими вібрації	АН-2	15...5	50 - 60	1:8	1	50		1,0
2	Завантажити абразивні гранули								2,0
3	Включити вібраційний верстат								0,5
4	Промити вміст контейнеру								2,0
5	Включити подачу в контейнер хімічно активного розчину								1,0
6	Завантажити деталі в контейнер								2,0
7	Віброшліфувати							60	
8	Відокремити деталі від гранул								5,0
9	Вимкнути верстат								0,5
10	Перевірити зовнішнім оглядом якість оброблених деталей, виміряти шорсткість і радіус округлення гострих кромки								1,0
Разом:							60	15	

В процес обробки деталей всіх груп на всіх режимах, спостерігалось стійке циркуляційний переміщення маси завантаження вздовж стінок контейнера. Деталі не затягувались в центр контейнеру та підкоряючись закономірностям по яких рухається саме робоче середовище переміщувалися усередині контейнера верстата, проходячи всі його зони, що забезпечувало рівномірність їх обробки.

При обробці деталей 1-3 груп після 60 хв вібраційного шліфування були повністю ліквідовані всі поверхневі дефекти (глибокі риски від різця, ребристість, подряпини, забоїни, вм'ятини, зварювальні прижоги, задирки). На зовнішніх поверхнях деталей спостерігалася велика кількість дрібних слідів (до 1 мм). При візуальному дослідженні кількість косих ударів довжиною більше 1 мм не перевищувала 2%. Колір деталі – світло сірий, матовий спостерігається слабкий металевий блиск. З огляду на те, що вібраційна обробка – це в першу чергу процес мікрорізання, то збільшення часу обробки може призвести до зміни геометричних розмірів деталі, що і змусило припи-

нити віброшліфування і перейти до віброполірування.

Подальше полірування протягом 60 хв повністю ліквідувало сліди від гранул і в результаті було отримане зниження вихідної шорсткості поверхні для деталей до величини Ra=0,5-0,3 мкм без зміни геометричних розмірів оброблюваних деталей. Деталі мали однорідні дзеркальні зовнішні поверхні. Результат повністю відповідав вимогам, що пред'являються до виробу.

Як вказувалось вище, вібраційну обробку деталей 4 групи було поділено на 3 етапи: попереднє шліфування (60 хв.) чистове шліфування (60 хв.) та полірування (60 хв.). Після перших 30 хв обробки гранулами АН-2 при амплітуді 3 мм та частоті 50Гц на поверхні деталей спостерігалася велика кількість ковзаючих ударів від гранул завдовжки до 2 мм, дефекти обробки від попередніх операцій стали менш явними. Поверхня набула матовий світло сірий відтінок. Спостерігалось зняття задирок і округлення гострих кромки (рис 13, а).

Таблиця 5

Операційна карта технологічного процесу вібраційного полірування деталей «Пробка шарова»

СНУ ів. В. Даля	Операційна карта типового технологічного процесу ВіО	Найменування деталей							
		«Пробка шарова»							
Найменування операції	Марка матеріалу	Характеристика деталей					Маса		
		Габаритні розміри							
Віброполірування	Сталь 12Х18Н10Т ГОСТ 7350-77	Ø15×Ø26×16 мм; Ø25×Ø42×28 мм; Ø30×Ø48×33 мм			0,019 кг; 0,062 кг; 0,066 кг				
Обладнання, пристосування	Робочий розчин								
Вібраційний верстат моделі ВМІ-1003, тара для деталей	Склад і концентрація робочого розчину					Кількість розчину			
	Сода кальцинована Na ₂ CO ₃ ГОСТ 5100-85 Триетаноламін (НОСН ₂ СН ₂) 3N ТУ 6-09-2448-66 Олеїнова кислота СН ₃ (СН ₂) ₇ СН=СН(СН ₂) ₇ СООН ТУ 6-09-3306-66			30 г/л 30 г/л 10 г/л		Розчин подається безперервно			
Технічні умови на деталі									
До обробки				Після обробки					
1. Шорсткість поверхонь Ra = 0,63...1,1 мкм. 2. Поверхні мали матовий колір.				1. Шорсткість поверхонь Ra = 0,3...0,5 мкм 2. Поверхні однорідні дзеркальні.					
№ п/п	Зміст переходу	Інструмент			Умовні позначення		Тривалість переходу, хв		
		Характеристика робочого середовища	Розміри, мм	Об'єм заправки, %	Ставлення деталей і середовища	Амплітуда, мм	Частота, Гц	Основний час	Допоміжний час
1	Встановити режими вібрації	сталеві загартовані поліровані кулі	Ø5	50 - 60	1:8	1	35		1,0
2	Завантажити абразивні гранули								2,0
3	Включити вібраційний верстат								0,5
4	Промити вміст контейнеру								2,0
5	Включити подачу в контейнер хімічно активного розчину								1,0
6	Завантажити деталі в контейнер								2,0
7	Віброполірувати							60	
8	Відокремити деталі від гранул								5,0
9	Вимкнути верстат								0,5
10	Перевірити зовнішнім оглядом якість оброблених деталей, виміряти шорсткість поверхонь								1,0
						Разом:	60	15	

Після 60 хв попереднього шліфування (амплітуда 3 мм; частоті 50Гц) поверхні заготовок при тактильному дослідженні набули гладкості та стали однорідними. Однак при візуальному дослідженні були виявлені ризики від різця з попередньої обробки, дефекти не зникли. (рис 13, б).

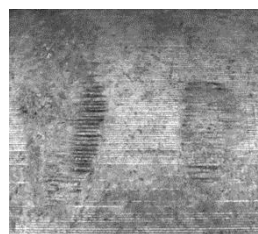
Після 1 година 30 хв обробки (чистове шліфування при амплітуді 1 мм та частоті 50Гц) на поверхнях спостерігалася велика кількість слідів від великих абразивних гранул. В цілому поверхня гладка і однорідна, матова без блиску. Сліди попередньої механічної обробки – приховані. (рис. 13 в).

Подальша обробка протягом 30 хв. при збереженні вихідних параметрів процесу не призвела до значних змін поверхні. Стан поверхневого шару при візуальному і тактильному контролі залишилося практично незмінним (рис. 13 г, рис. 14 а).

Деталі 4 групи після полірування протягом 60 хв мали однорідну дзеркальну поверхню (рис. 14 б). Зовнішня поверхня, до якої пред'являли особливі вимоги чистоти, мала кінцевий параметр шорсткості Ra 0,6 ... 0,5, що відповідає 8-му класу шорсткості.

Знаючи багатфакторність вібраційної обробки, досягти необхідного результату підвищення продуктивності технології, можна змінюючи: конструкцію вібраційного обладнання, режими обробки

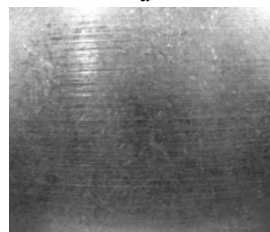
деталей, тип і розміри одиничних абразивних гранул, хімічний склад робочих розчин і його кількість. Технологічні шляхи досягнення результату слід обирати виходячи з можливостей верстата і витрат на допоміжний час по переналагодженню обладнання.



а



б



в



г

Рис. 13. Фото поверхонь деталей 4 групи після кожних 30 хв. вібраційного шліфування

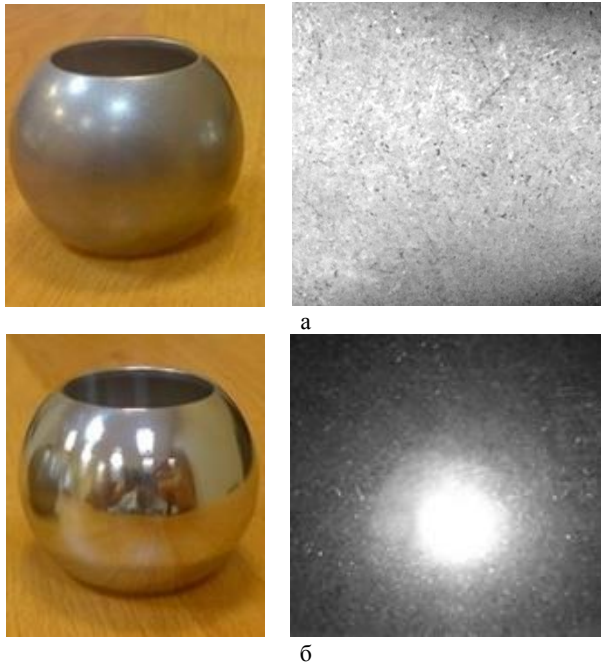


Рис. 14. Фотографії поверхонь деталей:
а – після чистового шліфування; б – після полірування

Так, наприклад, автором робіт [27] в ході експериментальних досліджень було доведено, що для підвищення продуктивності процесу шліфування та скорочення часу обробки слід обирати в якості інструменту гранули в формі двосторонніх пірамід в поперечному перерізі яких лежить неопуклий шестикутник – П12. В роботі [27] вказується, що шорсткість поверхонь зразків, що були оброблені в П12 була нижчою ніж при обробці таких же зразків в гранулах довільної форми АН-2 на 41,5%. Автором доведено, що використання в якості інструменту гранул в формі П12 сприяє скорочення операційного часу і підвищення продуктивності вібраційної обробки деталей, незалежно від їх матеріалу і початкової шорсткості.

В роботі [28] встановлено, що для скорочення часу обробки деталей та отримання рівномірно оброблених усіх поверхонь деталей необхідна наявність рівномірного циркуляційного потоку робочого середовища. Встановлено, що зміна положення вібробуджувача відносно контейнера верстата дозволяє до 20% збільшити потужність, що передається робочому середовищу від стінок контейнера. Автором [28] запропоновано модель верстата з можливістю зміни положення вібробуджувача відносно контейнера та визначено місце його розташування для даного верстата під кутом 45° до осі ординат, перпендикулярній повздовжній осі, що проходить через центр мас контейнера. Встановлено, що запропоноване взаємне розташування вузлів вібраційного верстата дозволяє до 40% збільшити циркуляційну швидкість маси завантаження та її стабільність, ліквідувати зони вторинної циркуляції, що дозволяє, при досяганні заданих характеристик поверхневого шару, скоротити час обробно-зачистних

операцій на 20...30% порівняно з часом обробки на вібраційних верстатах с традиційним компонованням.

Враховуючи результати проведених досліджень, та результати, що наведено в [27, 28] можна стверджувати, що для підвищення продуктивності технологічних процесів вібраційного шліфування та полірування сферичних поверхонь деталей слід використовувати в якості інструментів для операцій шліфування гранули в формі П12, обробку проводити на верстаті з можливістю зміни положення вібробуджувача відносно контейнера та в розташуванням його під кутом 45° до осі ординат, перпендикулярній повздовжній осі, що проходить через центр мас контейнера. Обробку слід проводити на режимах: попереднє шліфування амплітуда коливань 3 мм, частота – 50 Гц; чистове шліфування – амплітуда коливань 1 мм і частота 50 Гц; для полірування – амплітуда коливань 1 мм і частота 35 Гц.

Висновки.

1. В роботі проведено аналіз технологічних методів обробки сферичних поверхонь деталей машинобудівного виробництва.

2. Розглянуто можливість обробки сферичних поверхонь деталі типу «Пробка кульова» кранів запірної арматури вібраційним методом.

3. На підставі ряду проведених експериментальних досліджень наведені практичні рекомендації щодо вибору обладнання, інструменту та режимів обробки деталей «Пробка кульова» на операціях вібраційного шліфування та полірування.

4. Виявлено позитивний ефект від застосування вібраційної обробки в середовищі вільних абразивів для обробки деталей сферичної форми на прикладі кульових пробок різних розмірів. Встановлено, що після вібраційного шліфування та полірування можливе поліпшення якості поверхонь з 3-го до 8-го класів шорсткості.

5. Запропоновано способи підвищення продуктивності технологічних процесів вібраційного шліфування за рахунок скорочення часу обробки шляхом: застосування в якості інструменту абразивних гранул в формі П12; проведення віброшліфування на верстатах з контейнерами, розташованими під кутом 45° до осі ординат, перпендикулярній повздовжній осі, що проходить через центр мас контейнера.

Література

1. Ящерицын П.И. Чистовая обработка деталей в машиностроении / П. И. Ящерицын, А.Н. Мартынов. - Минск: Высш. шк., 1983. - 191 с.
2. Бабичев А.П. Справочник инженера-технолога в машиностроении: справочник / А.П. Бабичев, И.М. Чукарина, Т.Н. Рысева, П.Д. Мотренко. – Ростов н/Д: «Феникс», 2005. – 541 с.
3. Мицько А.В., Федорович В.А. Пути интенсификации вибрационной отделочно-зачистной обработки комбинированием схем энергетических воздействий

- на рабочую среду и детали. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2011, № 6 (83). С. 26 – 34.
4. Мицьк А.В., Федорович В.А. Развитие новых технологий вибрационной отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей общемашиностроительного применения. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків: НТУ «ХПІ», 2012. № 47 (953). С. 226 – 233.
 5. Міщик А.В., Федорович В.О. Оцінка ефективності вібраційної оздоблювально-зачищувальної обробки у резервуарах з мультиенергетичним впливом і різною формою поперечного перерізу. *Різання та інструмент в технологічних системах: Міжнар. наук.-техн. зб.* Харків: НТУ «ХПІ», 2019. Вип. 90. С. 51 – 63.
 6. Калмыков М.А. Повышение производительности вибрационной обработки / Калмыков М.А., Лубенская Л.М., Мелконов Г.Л., Романченко А.В. // *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля: Науковий журнал*. - №7(113), Ч.1, 2007. – С. 141-151.
 7. Лубенська Л.М., Ніколаєнко А.П. Застосування вібраційного обладнання для підвищення експлуатаційних властивостей виробів: монографія. Луганськ: вид - во СНУ ім. В. Даля, 2009. 288 с.
 8. Горяинов Д.С. Повышение эффективности процесса хонингования сферических поверхностей деталей из нержавеющей сталей: диссертация ... кандидата технических наук: 05.02.08 / Сам. гос. техн. ун-т. Самара, 2009. 170 с.
 9. Иллюстрированный определитель деталей общемашиностроительного применения. Классы 40 и 50 / Под ред. Е.А.Понфилова, Ю.И. Блохина, Л.М. Кулика и др. М.: Издательство стандартов, 1977. – 238 с.
 10. Дьяков И.И. Интенсификация процесса шлифования шариков методом обработки их в потоке среды под давлением: диссертация ... кандидата технических наук: 05.03.01 / Белорусский ОТКЗ политех. институт. Минск, 1984. 184 с.
 11. Бочкарев А.П. Повышение эффективности и качества формообразования полых тонкостенных шаров бесцентровым шлифованием: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.0.08 / ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.». Саратов, 2013. 20 с.
 12. Sokolov, V., Krol, O., Baturin, Y.: Dynamics Research and Automatic Control of Technological Equipment with Electrohydraulic Drive. 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE (2019). DOI: <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867652>.
 13. Sokolov, V.: Transfer functions for shearing stress in nonstationary fluid friction. In: Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 707-715. Springer, Cham (2020). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22041-9_76.
 14. Krol O., Sokolov V., Tsankov P. Modeling of vertical spindle head for machining center. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, No. 1553. 012012. – VSPID-2019. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1553/1/012012>
 15. Krol O., Sokolov V. Parametric modeling of machine tools for designers. Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. 112 p. <https://doi.org/10.7546/PMMTD.2018>
 16. Krol O.S., Porkuian O.V., Sokolov V.I., Tsankov P.G. Vibration Stability of Spindle Nodes in the Zone of Tool Equipment Optimal Parameters. *Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences*. Sofia: “Prof. Marin Drinov” Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2019. Vol. 72. No. 11. P. 1546–1556. <https://doi.org/10.7546/CRABS.2019.11.12>
 17. Мицьк А.В., Федорович В.А. Процесс отделочно-зачистной виброобработки и параметры, влияющие на его производительность. *Різання та інструмент в технологічних системах: Міжнар. наук.-техн. зб.* Харків: НТУ «ХПІ», 2013. Вип. 83. С. 184 – 194.
 18. Бабичев А.П. Применение вибрационных технологий на операциях отделочно-зачистной обработки деталей (очистка, мойка, удаление облоя и заусенцев, обработка кромок): моногр. / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко, Г.А. Прокопец; ДГТУ. - Ростов н/Д, 2010. - 289 с.
 19. Mitsyk A.V., Fedorovich V.A., Grabchenko A.I. The effect of a shock wave in an oscillating working medium during vibration finishing-grinding processing. *Cutting & Tools in Technological System*. Kharkiv: NTU “KPI”, 2020. Ed. 93. P. 43 – 55. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2020.93.06>
 20. Копылов Ю.Р. Виброударное упрочнение: Монография. – Воронеж: Воронежский институт МВД России, 1999. – 386 с.
 21. Kundrák J., Morgan M., Mitsyk A.V., Fedorovich V.A. The effect of the shock wave of the oscillating working medium in a vibrating machine’s reservoir during a multi-energi finishing-grinding vibration processing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 106, p. 4339 – 4353 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04844-2>
 22. Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах / И.Н. Карташов, М.Е. Шаинский, В.А. Власов, Б.П. Румянцев и др. - К.: Высшая школа, 1975. – 179 с.
 23. Kundrák J., Mitsyk A.V., Fedorovich V.A., Morgan M., Markopoulos A.P. The Use of the Kinetic Theory of Gases to Simulate the Physical Situations on the Surface of Autonomously Moving Parts During Multi-Energy Vibration Processing. *Materials* Vol. 12 (19), p. 1 – 26, (2019). <https://doi.org/10.3390/ma12193054>
 24. Шумакова Т.А. Исследование влияния на производительность процесса виброобработки основных факторов / Т.А. Шумакова // *Журнал «Технологический аудит и резервы производства»*. – 2014. – №6/1(20). – С. 4-8 DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2014.34768>
 25. Калмыков М.А. Поведение рабочей среды в контейнерах вибрационных станков / М.А. Калмыков, С.Н. Ясуник, А.В. Романченко // *Вібрації в техніці і технологіях*. – 2010. – № 3 (59). – С. 38 – 42.
 26. Волков И.В. Повышение производительности процесса вибрационной обработки деталей на отделочных и упрочняющих операциях: дис... канд. техн. наук: 05.02.08 / Приазов. гос. техн. ун-т. Мариуполь, 2008. 174 с.
 27. Патент № 40383 Україна МПК В24В 31/14. Абразивні гранули для вібраційної обробки деталей / Лубенська Л.М., Шумакова Т.О., Калмыков М.О.; заявник і патентовласник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № U2008 11534; заявл. 25.09.2008; опубл. 10.04.2009, Бюл. №7.

28. Патент №46009 Україна МПК В24В 31/14. Верстат для вібраційної обробки деталей. Ніколаєнко А.П., Калмыков М.О. Заявник і патентовласник ЧНУ ім. В. Даля. №U2009 04399; заявл 05.05.2009; опубл. 10.12.2009, Бюл. №23.

References

1. Yashchericyn P.I. Chistovaya obrabotka detalej v mashinostroenii / P. I. YAshchericyn, A.N. Martynov. - Minsk: Vyssh. shk., 1983. - 191 s.
2. Babichev A.P. Spravochnik inzhenera-tehnologa v mashinostroenii: spravochnik / A.P. Babichev, I.M Chukarina, T.N. Ryseva, P.D. Motrenko. - Rostov n/D: «Feniks», 2005. - 541 s.
3. Mitsyk A.V., Fedorovich V.A. Puti intensivatsii vibracionnoj otdelochno-zachistnoj obrabotki kombinovanim shem jenergeticheskikh vozdeystvij na rabochuju sredu i detali // Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija. 2011. № 6. s. 26 – 34.
4. Mitsyk A.V., Fedorovich V.O. Razvitie novykh tehnologij vibracionnoj otdelochno-zachistnoj i uprochnjajushhej obrabotki detalej obshhemashinostroitel'nogo primeneniya. Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «HPI». Serija: Novi rishennja v suchasni tehnologijah. Kharkiv: NTU «KPI», 2012. № 47 (953). S. 226 – 233.
5. Mitsyk A.V., Fedorovich V.O. Ocinka effektivnosti vibracijnoї ozdobljuval'no-zachishhuval'noї obrabotki u rezervuarah z mul'tienergetičnim vplivom i riznoju formoju poperečnogo pererizu. Rizannja ta instrument v tehnologičnih sistemah: Mizhnar. nauk.-tehn. zb. Kharkiv: NTU «KPI», 2019. Vip. 90. S. 51 – 63.
6. Kalmykov M.A. Povyshenie proizvoditel'nosti vibracionnoj obrabotki / Kalmykov M.A., Lubenskaya L.M., Melkonov G.L., Romanchenko A.V. // Visnik Volodymyr Dahl East Ukrainian National University: Naukovij zhurnal. - №7(113), CH.1, 2007. – S. 141-151.
7. Lubens'ka L.M., Nikolaenko A.P. Zastosuvannya vibracijnogo obladnannya dlya pidvishčennja ekspluatacijnih vlastivostej vırobiv: monografiya. Lugans'k: vid-vo Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2009. 288 s.
8. Goryainov D.S. Povyshenie effektivnosti processa honingovaniya sfericheskikh poverhnostej detalej iz nerzhavyushchih stalej: dissertacija ... kandidata tehničeskikh nauk: 05.02.08 / Sam. gos. tekhn. un-t. Samara, 2009. 170 s.
9. Ponfilova, E.A., Blokhina, Iu.I., Kulika, L.M. (1977), *Illustrirovannyi opredelitel detalej obshchemashinostroitel'nogo primeneniia. Klassy 40 i 50* [Illustrated determinant of details of the machine-building application. Classes 40 and 50], Izdatelstvo standartov, Moskva, Russia.
10. D'yakov I.I. Intensifikaciya processa shlifovaniya sharikov metodom obrabotki ih v potoke sredy pod davleniem: dissertacija ... kandidata tehničeskikh nauk: 05.03.01 / Belorusskij OTKZ politekh. institut. Minsk, 1984. 184 s.
11. Bochkarev A.P. Povyshenie effektivnosti i kachestva formobrazovaniya polyh tonkostennyh sharov bescentrovym shlifovaniem: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.0.08 / FGBOU VPO «Saratovskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet imeni Gagarina YU.A.». Saratov, 2013. 20 s.
12. Sokolov, V., Krol, O., Baturin, Y.: Dynamics Research and Automatic Control of Technological Equipment with Electrohydraulic Drive. 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE (2019). DOI: <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867652>.
13. Sokolov, V.: Transfer functions for shearing stress in nonstationary fluid friction. In: Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 707-715. Springer, Cham (2020). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22041-9_76.
14. Krol O., Sokolov V., Tsankov P. Modeling of vertical spindle head for machining center. Journal of Physics: Conference Series. 2020, No. 1553. 012012. – VSPID-2019. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1553/1/012012>
15. Krol O., Sokolov V. Parametric modeling of machine tools for designers. Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. 112 p. <https://doi.org/10.7546/PMMTD.2018>
16. Krol O.S., Porquian O.V., Sokolov V.I., Tsankov P.G. Vibration Stability of Spindle Nodes in the Zone of Tool Equipment Optimal Parameters. Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences. Sofia: “Prof. Marin Drinov” Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2019. Vol. 72. No. 11. P. 1546–1556. <https://doi.org/10.7546/CRABS.2019.11.12>
17. Mitsyk A.V., Fedorovich V.O. Process otdelochno-zachistnoj vibroobrabotki i parametry, vlijajushhie na ego proizvoditel'nost'. Rizannja ta instrument v tehnologičnih sistemah: Mizhnar. nauk.-tehn. zb. Kharkiv: NTU «KPI», 2013. Vip. 83. S. 184 – 194.
18. Babichev A.P. Primenenie vibracionnykh tehnologij na operacijah otdelochno-zachistnoj obrabotki detalej (ochistka, mojka, udalenie obloya i zausencev, obrabotka kromok): monogr. / A.P. Babichev, P.D. Motrenko, G.A. Prokopec; DGTU. - Rostov n/D, 2010. - 289 s.
19. Mitsyk A.V., Fedorovich V.A., Grabchenko A.I. The effect of a shock wave in an oscillating working medium during vibration finishing-grinding processing. Cutting & Tools in Technological System. Kharkiv: NTU “KPI”, 2020. Ed. 93. P. 43 – 55. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2020.93.06>
20. Kopylov YU.R. Vibroudarnoe uprochnenie: Monografiya. – Voronezh: Voronezhskij institut MVD Rossii, 1999. – 386 s.
21. Kundrák J., Morgan M., Mitsyk A.V., Fedorovich V.A. The effect of the shock wave of the oscillating working medium in a vibrating machine’s reservoir during a multi-energi finishing-grinding vibration processing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 106, p. 4339 – 4353 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04844-2>
22. Kartashov, I. N., Shainskij, M. E. and Vlasov, V. A. (1975), *Obrabotka detalej svobodnymi abrazivami v vibrirujushchih rezervuarah* [Free abrasives treatment of details in vibrating tanks], Vysshaja shkola, Kiev, Ukraine.
23. Kundrák J., Mitsyk A.V., Fedorovich V.A., Morgan M., Markopoulos A.P. The Use of the Kinetic Theory of Gases to Simulate the Physical Situations on the Surface of Autonomously Moving Parts During Multi-Energy Vibration Processing. Materials Vol. 12 (19), p. 1 – 26, (2019). <https://doi.org/10.3390/ma12193054>
24. Shumakova T.A. Issledovanie vliyanija na proizvoditelnost protsessa vibroobrabotki osnovnykh faktorov / T.A. Shumakova // Zhurnal «Tehnologičeskij audit i rezervy proizvodstva». – 2014. – #6/1(20). – S. 4-8 DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2014.34768>
25. Kalmykov M.A. Povedenie rabochej sredy v kontejnerah vibracionnykh stankov / M.A. Kalmykov, S.N. YAsunik,

- A.V. Romanchenko // *Vibracii v tekhnici i tekhnologiyah.* – 2010. – № 3 (59). – S. 38 – 42.
26. Volkov I.V. *Povyshenie proizvoditel'nosti processa vibracionnoj obrabotki detalej na otdelochnyh i uprochnyayushchih operaciyah: dis... kand. tekhn. nauk: 05.02.08 /Priazov. gos. tekhn. un-t. Mariupol', 2008. 174 s.*
27. Lubenska, L.M., Shumakova, T.O., Kalmikov, M.O. *Abrazivni granuli dlia vibratciinoi obrobki detalei* [Abrasive granules for vibrating parts processing], Patent № 40383 Україна МПК V24V 31/14, заявник і патентовласник Volodymyr Dahl East Ukrainian National University. – № U2008 11534; заявл. 25.09.2008; opubl. 10.04.2009, Biul. №7.
28. Nikolaenko A.P., Kalmikov M.O. *Verstat dlya vibracijnioi obrobki detalej*, Patent №46009 Україна МПК V24V 31/14, заявник і патентовласник Volodymyr Dahl East Ukrainian National University. – №U2009 04399; заявл. 05.05.2009; opubl. 10.12.2009, Biul. №23.

Шумакова Т.А., Николаенко А.П. Повышение производительности технологических процессов вибрационной обработки деталей «Пробка шаровая»

Статья посвящена проблемам финишной обработки деталей сферической формы, в том числе деталей шаровых фланцевых кранов «Пробка шаровая». Экспериментально установлено, что после вибрационного шлифования и полировки возможно улучшение качества поверхностей с 3-го до 8-го классов шероховатости. На основании исследований приведены научно обоснованные практические рекомендации по повышению производительности технологических процессов вибрационного шлифования за счет сокращения времени обработки путем: применения абразивных гранул в форме П12 и проведения вибрационного шлифования на станке, контейнер которого расположен под углом 45° к оси ординат, перпендикулярной продольной оси, проходит через его центр масс.

Ключевые слова: *вибрационная обработка, технологический процесс, сферическая поверхность, абразивная гранула, шероховатость поверхности, производительность.*

Shumakova T.O., Nikolaenko A.P. Increase of performance of technological processes of vibration treatment of details «Ball cork»

The article is dedicated to the problems of finishing of parts with spherical surfaces, including parts of flange cranes «Ball Cork». The classification of details with spherical surfaces, their areas of use and methods of spherical surfaces processing are discerned. An analysis of the industrial processing technologies of such details was carried out. It showed that the traditional methods of processing have a number of shortcomings, such as low productivity, high cost, difficulty to

ensure accuracy, appearance of grinding burns, micro-cracks, directional tool tracks. The application of machining methods without rigid connection of the VPIZ system on finishing operations of spherical details processing with achievement of high indicators of accuracy and surfaces quality is offered.

One of the wider methods of processing parts of a folding configuration without fixing is shown - a vibrating processing of parts in a bulk in the hard abrasives. The results of experimental measurements of spherical surfaces grinding and polishing of the parts with different sizes of the type «Ball Cork» of the valves of the shut-off valves are induced. Examples of technological processes design of vibration grinding and polishing and examples of their technological documentation registration are resulted.

The positive effect of the application of vibration treatment in the environment of free abrasives for the treatment of spherical parts on the example of ball plugs of different sizes. It is established that after vibration grinding and polishing it is possible to improve the surfaces quality from the 3rd to the 8th roughness classes. On the basis of researches the scientifically substantiated practical recommendations concerning a choice of the equipment, the tool and processing modes of details «Ball Cork» on operations of vibration grinding and polishing are resulted.

Installed, as a result of the variability and polishing of the surface from the 3rd to the 8th class of shorts. Practical recommendations for the selection of the possession, tool and mode of processing parts «Ball Cork» at the operations of the vibration process and polishing.

Methods for increasing the productivity of technological processes of vibration grinding by reducing the processing time: by using as a tool of abrasive granules in the form of P12; carrying out vibration grinding on the machine with the possibility to change the position of the shaft-vibrator relative to the container and in the location of the container at an angle of 45° to the ordinate axis perpendicular to the longitudinal axis passing through the center of mass of the container.

Key words: *vibration treatment, technological process, spherical surface, abrasive granule, surface roughness, productivity.*

Шумакова Тетяна Олександрівна – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк), shumakovatania@gmail.com

Ніколаєнко Анна Павлівна – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк), apnikolaenko@gmail.com

Стаття подана 01.02.2021 р

ЕКОНОМІЧНІ НАУКИ

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-214-221>

УДК 336.14:352

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ БЮДЖЕТІВ ОБ'ЄДНАНИХ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД В УМОВАХ ФІНАНСОВОЇ ДЕЦЕНТРАЛІЗАЦІЇ

Гаврюшенко Г.В.

FEATURES OF FORMATION OF BUDGETS OF UNITED TERRITORIAL COMMUNITIES IN THE CONDITIONS OF FINANCIAL DECENTRALIZATION

Gavrushenko G.V.

У статті описано особливості адміністративно-територіальної реформи в Україні та сутність процесу децентралізації державного управління. Показано, що основою сучасного адміністративно-територіального устрою України є об'єднана територіальна громада. Наголошено на тому, що найважливішу роль у ефективному соціально-економічному розвитку об'єднаної територіальної громади відіграє місцевий бюджет. Визначено особливості формування доходної та витратної частини місцевих бюджетів об'єднаних територіальних громад в умовах фінансової децентралізації, охарактеризовано основні досягнення реформи децентралізації фінансових повноважень держави на користь місцевого самоврядування.

Ключові слова: місцеві бюджети, об'єднана територіальна громада, фінансова децентралізація, доходи місцевих бюджетів, видатки місцевих бюджетів.

Вступ. Україна нині перебуває на шляху перетворень. Протягом 2014 – 2020 років Урядом було вжито заходів у частині реформування адміністративно-територіального устрою країни, створення нового рівня місцевого самоврядування, удосконалення бюджетного законодавства. Було запроваджено сучасні підходи до планування місцевих бюджетів. Ефективність фінансової діяльності органів місцевого самоврядування залежить від повноти та своєчасності мобілізації фінансових ресурсів та їх оптимального використання.

Постановка проблеми. У результаті реформи адміністративно-територіального устрою в Україні з'явилися особливі утворення – об'єднані територіальні громади – структури, які спроможні через відповідні органи місцевого самоврядування забезпечити для своїх жителів належний рівень освіти, культури, охорони здоров'я, соціального захисту, житлово-комунального господарства на основі нової моделі фінансово-економічного забезпечення. Основою розвитку об'єднаної територіальної громади є місцевий бюджет – обов'язковий елемент для ефе-

ктивної побудови фінансово-управлінських відносин на місцевому рівні. Саме місцевий бюджет є найпотужнішим важелем управління, що дає змогу місцевим органам влади впливати на економічні, соціальні та політичні процеси у громаді. Виходячи з цього, характеристика сучасних особливостей формування бюджетів об'єднаних територіальних громад стає вкрай актуальною.

Аналіз досліджень та публікацій. Дослідженню теоретичних аспектів розвитку місцевих бюджетів як фінансової основи існування територіальних громад присвячено праці багатьох українських та зарубіжних учених, зокрема: В. Андрущенка, В. Базилевича, С. Буковинського, А. Буряченка, О. Василика, Р. Гнейста, О. Кириленко, О. Ковалюка, В. Кравченка, М. Кульчицького, І. Луніної, В. Лебедева, С. Михайленко, В. Опаріна, М. Орзіха, Т. Паєнтко, Ю. Пасічника, О. Підхомного, Д. Полозенка, С. Сембера, Л. Тарангул, О. Тимченко, В. Тропіної, М. Чумаченка, Р. Штурма, І. Янжула та інших. Поряд з цим залишаються недостатньо дослідженими питання, пов'язані з розвитком місцевих бюджетів в умовах фінансової децентралізації. Саме тому процес розвитку місцевих бюджетів об'єднаних територіальних громад у контексті фінансової децентралізації продовжує залишатися одним із найактуальніших для науковців та представників органів місцевого самоврядування питань, у зв'язку з чим потребує подальших системних досліджень.

Мета статті полягає у висвітленні особливостей формування бюджетів об'єднаних територіальних громад в умовах фінансової децентралізації.

Результати досліджень. Із періоду здобуття незалежності країни здійснювалися спроби змінити адміністративно-територіальний устрій, який би відповідав європейським принципам управління територій, Європейській хартії місцевого самоврядування та умовам ринкової економіки. Це було виклика-

но тим, що адміністративно-територіальному устрою України були притаманні значні недоліки, основні з яких представлено на рис. 1.

З огляду на зазначені вище недоліки можна дійти висновку, що проведення реформи адміністративно-територіального устрою України є об'єктивною необхідністю. У 2014 році після затвердження Концепції реформування місцевого самоврядування в Україні розпочалися трансформаційні зміни, наслідком яких стало затвердження у 2020 році нового адміністративно-територіального устрою районного рівня та рівня територіальних громад.

Систему адміністративно-територіального устрою України (за ст. 132, 133 Конституції України) становлять одиниці трьох рівнів:

- 1) вищого – Автономна Республіка Крим (АРК), 24 області, міста Київ та Севастополь зі спеціальним статусом центрального підпорядкування;
- 2) середнього – адміністративні райони, міста з районним поділом;

3) первинного – міста без поділу на райони, райони у містах, селища, села (рис. 2).

З березня 2014 р. анексовані Росією та мають статус тимчасово окупованих територій Автономна Республіка Крим та місто Севастополь. Крім того, з квітня 2014 р. суверенітет України тимчасово не поширюється на частину територій Донецької та Луганської областей, зайнятих російськими та проросійськими силами. Верховна Рада України визнала ці території тимчасово окупованими 17 березня 2015 р.

У 2015 р. в Україні розпочалася адміністративно-територіальна реформа, що полягає в наданні більших повноважень органам місцевого самоврядування (децентралізації) і зміні адміністративно-територіального поділу. Децентралізація державного управління – це розширення повноважень місцевих органів виконавчої влади й органів місцевого самоврядування за рахунок повноважень центральних органів.



Рис. 1. Основні недоліки адміністративно-територіального устрою України



Рис. 2. Адміністративно-територіальний устрій України

Відповідно до Закону України «Про добровільне об'єднання територіальних громад» замість понад 11 тисяч місцевих рад буде створено 1500 – 2000 об'єднаних територіальних громад. Вони утворюються внаслідок добровільного об'єднання суміжних територіальних громад сіл, селищ, міст. Об'єднана територіальна громада, адміністративним центром якої визначено місто, є міською територіальною громадою; центром якої визначено селище міського типу, – селищною; центром якої визначено село, – сільською.

Верховна Рада України 17.07.2020 р. прийняла постанову про скорочення кількості районів в Україні. Замість 490 районів було створено 136. У середньому у складі кожної області стало по 4 – 5 районів.

Станом на 12.06.2020 р. в Україні створено 1469 територіальних громад (в т.ч. 31 громада на невідконтрольній території в межах Донецької та Луганської областей) [3].

Таким чином, на теперішній час основою місцевого самоврядування в Україні є територіальні громади. Територіальна громада є первинним суб'єктом місцевого самоврядування, який приймає безпосередню або опосередковану участь у вирішенні питань місцевого значення. Основою розвитку об'єднаної територіальної громади є місцевий бюджет. Правильно складений проект місцевого бюджету та своєчасне його затвердження є запорукою ефективного управління бюджетними коштами впродовж усього бюджетного року.

Органи місцевого самоврядування об'єднаних територіальних громад у процесі реформи децентралізації отримали не тільки розширені повноваження, а й серйозний виклик, який полягає у необхідності формування власного потужного соціально-економічного потенціалу. Подолати цей виклик можна шляхом провадження ефективної фінансової ді-

яльності, передусім, застосовуючи місцевий бюджет як найпотужніший важіль управління, що дає змогу місцевим органам влади впливати на економічні, соціальні та політичні процеси, пов'язати інститути влади з усіма суб'єктами господарської діяльності, впливати на громадську думку в громаді.

Для забезпечення успішного сталого розвитку об'єднаних територіальних громад та провадження ефективної фінансової діяльності місцевій владі необхідно:

- здійснювати оптимальне оподаткування та підвищувати роль місцевих податків й зборів і збільшувати їх частку у складі доходів;
- залучати додаткові фінансові ресурси;
- збільшувати ефективність розподілу та використання фінансових ресурсів у об'єднаних територіальних громадах;
- підвищувати прозорість та підзвітність управління фінансами і комунальним майном;
- застосувати гендерно орієнтований підхід у бюджетному процесі на місцевому рівні [5].

Бюджетний процес в Україні чітко регламентовано бюджетним законодавством.

Відносини, які виникають на кожній стадії бюджетного процесу, регулюються Бюджетним кодексом України.

Доходи місцевих бюджетів схематично зображено на рис. 3.

Як видно із рис. 3, доходи місцевих бюджетів умовно поділяють на власні (ті, які органи місцевого самоврядування (надалі – ОМС) можуть «заробити») та передані (ті, які місцевим бюджетам передають з державного бюджету на безповоротній основі. Їх ще називають міжбюджетними трансфертами. Перелік трансфертів, які державний бюджет може передбачати для бюджету ОТГ, визначено статтею 97 Бюджетного кодексу України.



Рис. 3. Доходи місцевих бюджетів ОТГ України

Значення власних доходів місцевих бюджетів в останні три роки коливається в межах від 45 – 47 % загальних доходів місцевих бюджетів. У 2018 р. до доходів місцевих бюджетів надійшло 562,4 млрд. грн, з яких 263,5 млрд. грн – власні доходи, а 298,9 млрд. грн – передані з держбюджету.

Власні доходи місцевих бюджетів формують:

– податкові надходження (забезпечують понад 88 % загальної суми власних доходів місцевих бюджетів): частина від загальнодержавних податків та зборів (податок на доходи фізичних осіб, податок на прибуток, рентна плата (за користування надрами, видобування корисних копалин і т.п., акциз із пального та ін.), місцеві податки і збори (податок на майно, єдиний податок, туристичний збір та ін.);

– неподаткові надходження (становлять трохи більше 10 % загальної суми власних доходів місцевих бюджетів): плата за видачу ліцензій та дозволів, орендна плата, держмити, штрафи;

– інші надходження: кошти від продажу основного капіталу, цільові фонди, донорські кошти, отримані від ЄС та міжнародних організацій тощо.

Значення того чи іншого джерела доходів в структурі конкретного місцевого бюджету зумовлено специфікою розподілу у Бюджетному кодексі податків та зборів між місцевими бюджетами різних рівнів. Наприклад, податок на доходи фізичних осіб (ПДФО) надходить до ОТГ, міст обласного значення, районних та обласних бюджетів, а до сільських, селищних бюджетів та бюджетів міст районного значення – ні. Останні ж «живуть» в основному за рахунок місцевих податків.

Другу частину доходів місцевих бюджетів становлять кошти, які їм передають з держбюджету (чи іншого місцевого бюджету) у вигляді дотацій та субвенцій (тобто, міжбюджетних трансфертів). За ці кошти не стягують платню (як, наприклад, за користування кредитом) і їх не потрібно повертати (як позику чи кредит). Необхідність «перекидання» коштів з державного бюджету місцевим зумовлена неспроможністю ОМС профінансувати лише за рахунок власних доходів виконання всіх покладених на них повноважень (утримувати школи, лікарні, житлово-комунальне господарство тощо).

Головною відмінністю дотацій від субвенцій є відсутність обмежень щодо напрямів їх використання. Дотації здебільшого скеровують для фінансування поточних потреб місцевої громади. Хоча варто відзначити, що для ефективного використання коштів, урядовці деякі дотації «прив'язують» до конкретних напрямів використання. Наприклад, додаткова дотація на здійснення переданих з державного бюджету видатків з утримання закладів освіти та охорони здоров'я призначена для здійснення поточних видатків у школах, включаючи зарплату педагогічного персоналу, та для оплати енергоносіїв в лікарнях, амбулаторіях та інших закладах охорони здоров'я.

Загалом дотації є порівняно небагато: базова та реверсна, які призначені для горизонтального вирівнювання податкоспроможності територій; стабілізаційна, яка надається для компенсації диспропорцій бюджетів (в основному районів) у зв'язку із появою бюджетів ОТГ, які мають прямі взаємовідносини з державним бюджетом; додаткові дотації на окремі цілі (на 2019 рік їх передбачено лише три). У держбюджеті на 2019 рік на усі дотації для місцевих бюджетів (без врахування реверсної, яку передають з місцевих бюджетів до державного) закладено 25,9 млрд. грн.

Для субвенцій, які надходять з державного бюджету місцевим бюджетам, характерна конкретна мета і встановлений Кабміном порядок використання (наприклад, придбання ліків, формування інфраструктури ОТГ тощо). Але вузьке коло використання субвенцій компенсується їхньою кількістю. У держбюджеті на 2019 рік передбачено 44 окремі субвенції на загальну суму 262,4 млрд. грн. «Найдорожчими» серед них є: освітня субвенція (69,6 млрд. грн), субвенція на виплату допомоги малозабезпеченим сім'ям (63,0 млрд. грн), медична субвенція (55,7 млрд. грн), субвенція на надання пільг та житлових субсидій населенню на оплату природного газу (35,1 млрд. грн) та субвенція на будівництво автомобільних доріг (14,7 млрд. грн). Вони сумарно поглинають понад 90 % усіх виділених на субвенції коштів.

За рахунок нагромаджених в дохідній частині місцевих бюджетів коштів (власних доходів і переданих з держбюджету коштів), ОМС мають змогу здійснювати видатки на соціальний та економічний розвиток відповідних територіальних громад, зокрема: дитсадки та школи, лікарні та амбулаторії, соціальні допомоги та субсидії населенню, пільговий проїзд окремих категорій громадян, пожежну охорону та муніципальні формування з охорони громадського порядку, розвиток ЖКГ та будівництво доріг тощо (рис. 4, 5).

Упродовж 2018 року з місцевих бюджетів витратили 570,6 млрд. грн. «Найдорожчими» статтями видатків були: загальноосвітні школи (16,3 % усіх видатків місцевих бюджетів), субсидії ЖКГ (11,6 %), лікарні загального профілю (7,6 %), допомога малозабезпеченим сім'ям (7,4 %), ремонт та будівництво доріг (5,8 %), дитсадки (5,6%), житлово-комунальне господарство (5,3 %) та утримання органів місцевої влади і місцевого самоврядування (4,8 %). Сумарно на їх фінансування пішло майже дві третини усіх видатків місцевих бюджетів (рис. 6).

Основну роль у процесі підготовки проекту місцевого бюджету відіграють місцеві фінансові органи, які організовують роботу із формування проекту бюджету та забезпечують координацію усіх учасників бюджетного процесу.



Рис. 4. Делеговані видатки місцевих бюджетів ОТГ України



Рис. 5. Видатки на виконання власних повноважень



Рис. 6. Доходи і видатки місцевих бюджетів України у 2013 – 2018 рр. [14]



Рис. 7. Учасники бюджетного процесу ОТГ



Рис. 8. Основні заходи місцевих фінансових органів щодо підготовки та затвердження місцевого бюджету

Учасниками бюджетного процесу ОТГ є Голова (заступник Голови ОТГ), представники виконкому, представники виконавчих органів, представники депутатського корпусу, громадськість (рис. 7).

Підготовка проекту місцевого бюджету починається із таких організаційних заходів (рис. 8).

Особливості формування бюджетів об'єднаних територіальних громад подано на рис. 9.

Як видно із рис. 9, бюджети ОТГ, по-перше, мають міжбюджетні відносини з державним бюджетом. Тобто, законом про державний бюджет на плановий рік цим бюджетам затверджуються обсяги міжбюджетних трансфертів. Це – базова дотація, освітня субвенція, медична субвенція, інші субвенції та дотації, якщо є підстави для надання та отримання відповідних міжбюджетних трансфертів [6].

Слід зауважити, що бюджети громад, які не об'єдналися, не отримують міжбюджетні трансферти із державного бюджету.

По-друге, до бюджетів ОТГ, крім доходів, що отримували бюджети до їх об'єднання, зараховується

60% податку на доходи фізичних осіб. Раніше цей податок зараховувався до районного бюджету.

По-третє. За рахунок бюджетів ОТГ, крім видатків на здійснення самоврядних повноважень, фінансуватимуться видатки, які делегуються державою їм на виконання, а саме: видатки на утримання закладів бюджетної сфери – освіти, культури, охорони здоров'я, фізичної культури та спорту, соціального захисту та соціального забезпечення.

Джерелом фінансування видатків є як доходи, закріплені Бюджетним Кодексом за бюджетами ОТГ, так і міжбюджетні трансферти з державного бюджету (базова дотація, освітня та медична субвенції, інші дотації та субвенції).

По-четверте. Бюджети ОТГ беруть участь у горизонтальному вирівнюванні податкоспроможності. Дана система вирівнювання передбачає, що місцевим бюджетам з рівнем податкоспроможності (середні надходження на 1 мешканця) нижче 0,9 середнього показника по Україні для підвищення рівня їх забезпеченості надається базова дотація (80 % суми, необхідної для досягнення показника 0,9).



Рис. 9. Особливості формування бюджетів об'єднаних територіальних громад

По-п'яте. Ради ОТГ мають право здійснювати місцеві запозичення до бюджетів ОТГ – як місцеві, так і внутрішні, в тому числі шляхом отримання кредитів (позик) від міжнародних фінансових організацій. Запозичення здійснюються до бюджету розвитку і кошти спрямовуються на реалізацію інвестиційних програм (проектів), метою яких є розвиток комунальної інфраструктури, впровадження ресурсозберігаючих технологій, створення, приріст чи оновлення стратегічних об'єктів довготривалого користування або об'єктів, які забезпечують виконання завдань міських рад, спрямованих на задоволення інтересів населення їх громад.

Висновки. Отже, сучасна система адміністративно-територіального устрою була сформована в Україні в період панування радянської влади й побудована на тоталітарних засадах. Така система не відповідає сучасним вимогам побудови демократичної держави.

Удосконалення адміністративно-територіального устрою країни визнане одним із пріоритетних завдань її розвитку. Адміністративно-територіальна реформа в Україні покликана оптимізувати систему управління територіями, упорядкувати взаємовідносини органів влади різних ієрархічних рівнів, а в кінцевому підсумку – сприяти підвищенню рівня життя кожного громадянина в кожному міському чи сільському населеному пункті.

Адміністративно-територіальна реформа в Україні передбачає створення об'єднаних територіальних громад. Об'єднана територіальна громада – це громада, яка спроможна через відповідні органи місцевого самоврядування забезпечити для своїх жителів належний рівень освіти, культури, охорони здоров'я, соціального захисту, житлово-комунального господарства на основі нової моделі фінансово-економічного забезпечення.

Доходи місцевих бюджетів ОТГ формуються за рахунок власних доходів та переданих із державного бюджету на безповоротній основі міжбюджетних трансферів. Видатки місцевих бюджетів ОТГ спря-

мовуються на соціальний та економічний розвиток територіальних громад.

Основні досягнення реформи децентралізації фінансових повноважень держави на користь місцевого самоврядування полягають у значному розширенні права місцевих органів влади та наданні їм повної бюджетної самостійності; розширенні джерел наповнення місцевих бюджетів; запровадженні нового механізму бюджетного регулювання – горизонтального вирівнювання податкоспроможності місцевих бюджетів; запровадженні нової трансфертної політики. Для здійснення видатків на делеговані державою повноваження в галузях освіти та охорони здоров'я запроваджено нові субвенції з державного бюджету місцевим бюджетам – освітню та медичну.

Таким чином, реформа децентралізації дозволила суттєво наростити доходну частину місцевих бюджетів. Однак, одночасно фінансування більшої частини видатків, пов'язаних з життям територіальних громад, тепер здійснюється за рахунок їхніх бюджетів.

Література

1. Адміністративно-територіальний устрій України: методологічні основи та практика реформування. ДУ «Інститут регіональних досліджень імені М.І.Долішнього НАН України», наук. ред. В.С.Кравців. Львів, 2016. 264 с.
2. Безпалько О.М. Роль територіальних об'єднань в забезпеченні місцевого економічного розвитку: теоретичні основи дослідження. Економіка і організація управління. № 1 (33), 2019. С. 119 – 123.
3. Децентралізація дає можливості. URL: <https://decentralization.gov.ua/newgromada>
4. Доходи і видатки місцевих бюджетів: коротко про головне. URL: <https://cost.ua/687-revenues-and-expenditures-of-local-budgets>
5. Моделювання ефективної фінансової діяльності органів місцевого самоврядування ОТГ в умовах децентралізації. Консолідований підхід. Практичний посібник. URL:

<https://decentralization.gov.ua/uploads/library/file/563/UA-UNDP-financial-operations-for-local-gov-ATC-1.pdf>

6. Особливості формування бюджетів об'єднаних територіальних громад: роз'яснення експерта. URL: <https://decentralization.gov.ua/news/3958>
7. Раделицький Ю.О. Місцеві бюджети в умовах поглиблення фінансової децентралізації в Україні. Монографія. Львів, ЛНУ ім. Івана Франка, 2018. 312 с.
8. Стратегія реформування системи управління державними фінансами на 2017–2020 роки». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/142-2017-%D1%80#Text>
9. Ткачук А.Ф. Про бюджет і не тільки. Спеціально для об'єднаних територіальних громад. К. ІКЦ «Легальний статус», 2016. 76 с.

References

1. Administrativno-teritorial'nij ustrij Ukraїni: metodologichni osnovi ta praktika reformuvannja. DU «Institut regional'nih doslidzhen' imeni M.I. Dolishn'ogo NAN Ukraїni», nauk. red. V.S. Kravciv. L'viv, 2016. 264 s.
2. Bezpal'ko O.M. Rol' territorial'nyh obshhin v obespechenii mestnogo jekonomicheskogo razvitija: teoreticheskie osnovy issledovanija. Ekonomika i organizacija upravlinnja. № 1 (33), 2019. S. 119 – 123.
3. Decentralizacija dae mozhlivosti. URL: <https://decentralization.gov.ua/newgromada>
4. Dohodi i vidatki miscevih bjudzhetiv: korotko pro golovne. URL: <https://cost.ua/687-revenues-and-expenditures-of-local-budgets>
5. Modeljuvannja efektyvnoї finansovoї dijalnosti organiv misceвого samovrjaduvannja OTG v umovah decentralizacii. Konsolidovaniy pidhid. Praktichnij posibnik. URL: <https://decentralization.gov.ua/uploads/library/file/563/UA-UNDP-financial-operations-for-local-gov-ATC-1.pdf>
6. Osoblivosti formuvannja bjudzhetiv ob'ednanih territorial'nih gromad: roz'jasnennja eksperta. URL: <https://decentralization.gov.ua/news/3958>
7. Radelic'kij Ju.O. Miscevi bjudzheti v umovah poglublennja finansovoї decentralizacii v Ukraїni. Monografija. L'viv, LNU im. Ivana Franka, 2018. 312 s.
8. Strategija reformuvannja sistemi upravlinnja derzhavnimi finansami na 2017 – 2020 roki». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/142-2017-%D1%80#Text>
9. Tkachuk A.F. Pro bjudzhet i ne til'ki. Special'no dlja ob'ednanih territorial'nih gromad. K. IKC «Legal'nij status», 2016. 76 s.

Гаврюшенко А.В. Конкурентные преимущества Украины на мировых рынках

В статье описаны особенности административно-территориальной реформы в Украине и сущность процесса децентрализации государственного управления. Показано, что основой современного административно-территориального устройства Украины является объединенная территориальная община. Отмечено, что важнейшую роль в эффективном социально-экономическом развитии объединенной территориальной общины играет местный бюджет. Определены особенности формирования доходной и расходной части местных бюджетов объединенных территориальных общин в

условиях финансовой децентрализации, охарактеризованы основные достижения реформы децентрализации финансовых полномочий государства в пользу местного самоуправления.

Ключевые слова: *местные бюджеты, объединенная территориальная громада, финансовая децентрализация, доходы местных бюджетов, расходы местных бюджетов*

Gavrushenko G.V. Features of formation of budgets of united territorial communities in the conditions of financial decentralization

The article focuses on the fact that the modern system of administrative-territorial structure was formed in Ukraine during the period of Soviet rule and was built on totalitarian principles. It is noted that such a system does not meet the modern requirements of building a democratic state. It was emphasized that the improvement of the country's administrative-territorial structure was recognized as one of the priority tasks of its development. It is noted that the administrative-territorial reform in Ukraine is designed to optimize the territorial management system, to streamline the relationship between the authorities of various hierarchical levels, and ultimately to help improve the standard of living of every citizen in every city or village. It has been established that the administrative-territorial reform in Ukraine provides for the creation of united territorial communities (hereinafter referred to as UTC). It was noted that UTC is a community that, through local self-government bodies, is able to provide its residents with an appropriate level of education, culture, health care, social protection, housing and communal services based on a new model of financial and economic support. It is shown that the local budget is the basis for the development of UTC. It is noted that the revenue side of the local budgets of the UTC is formed at the expense of their own revenues and inter-budgetary transfers from the state budget on a non-refundable basis. The expenditures of local budgets of the UTC are directed to the social and economic development of territorial communities. It has been established that the main achievements of the reform of decentralization of financial powers of the state in favor of local self-government are to significantly expand the rights of local authorities and grant them full budgetary independence; expanding the sources of filling local budgets; introduction of a new mechanism of budgetary regulation - horizontal alignment of the tax capacity of local budgets; introduction of a new transfer policy. It was found that in order to implement the expenses for the powers delegated by the state in the field of education and health care, new subventions were introduced from the state budget to local budgets - educational and medical. It is noted that the decentralization reform has made it possible to significantly increase the revenue side of local budgets. However, at the same time, most of the costs associated with the life of UTCs are now financed from their budgets.

Keywords: *local budgets, united territorial community, financial decentralization, local budget revenues, taxes of local budgets.*

Гаврюшенко Ганна Володимирівна – к.е.н., доцент кафедри географії, Луганський національний університет імені Тараса Шевченка (м. Старобільськ)
super_superanna@ukr.net

Стаття подана 02.02.2021 р.

**ВІСНИК
СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ
№ 1 (265) 2021**

Науковий журнал

Відповідальний за випуск Соколов В.І.

Оригінал-макет Могильна О.В.

Статті надруковано в авторській редакції

Підписано до друку 16.03.2021 р.
Формат 60 x 84 1/8. Папір офсетний. Гарнітура Times.
Друк офсетний. Умов. друк. арк. 25,8. Обл.-вид. арк. 27,2.
Наклад 50 прим. Вид. № 3311. Замов № _____. Ціна вільна.

Видавництво
Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля

Свідоцтво про реєстрацію: серія ДК № 1620 від 18.12.03 р.

Адреса університета: просп. Центральний 59-А
м. Сєвєродонецьк, 93400, Україна
E-mail: vidavnictvoSNU.ua@gmail.com

Надруковано:
Надруковано у типографії Мадрид, ООО
Свідоцтво про реєстрацію: ДК № 4399 від 27.08.2012 р.
Адреса видавництва: вул. Гуданова, 18,
м. Харків, 61024, Україна
Телефон/факс +38 (057) 756-53-25
E-mail: info@madrid.in.ua www.madrid.in.ua