

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ



В І С Н И К

**Східноукраїнського
національного університету
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**№ 4 (260)
2020**

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Сєвєродонецьк 2020

ВІСНИК

СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

№ 4 (260) 2020

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

№ 4 (260) 2020

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 №1328 21.12.2015 р.), (Наказ МОН №515 16.05.2016 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,

Лория 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

Рекомендовано до друку Вченою радою Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Протокол № 6 від 03 березня 2020 р.)

Матеріали номера друкуються мовою оригіналу.

© Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, 2020

© Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2020

З М І С Т

ТЕХНІЧНІ НАУКИ

Asmankina A.A., Loria M.G., Tselishchev O.B., Kupina O.A. RESEARCH-AND-DEVELOPMENT OF THE HIT-PUMP STEP SETTING WITH HYDRODYNAMIC KAVITATION DEVICE IN COMPLEX OF SYSTEMS	7
Барбарук Л.В., Виноградов В.В., Ломакін С.О. СИСТЕМА МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ СТІЛИ ЗА ПАРАБОЛІЧНОЮ ТРАЄКТОРІЄЮ.....	13
Довгополий А.С., Збруцький О.В., Білобородов О.О. ОСОБЛИВОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ КВАЗІКОНСЕРВАТИВНИХ СИСТЕМ ПІД ДІЄЮ СТОХАСТИЧНИХ ЗБУРЕНЬ	17
Дьомін Ю.В., Дьомін Р.Ю., Черняк Г.Ю. ОЦІНКА ЗАСОБАМИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ БЕЗПЕКИ РУХУ ВАГОНІВ-ПЛАТФОРМ	24
Karpyuk L.V., Davydenko N.A. COMPUTER PRACTICE IN ENGINEERING GRAPHICS.....	29
Кроль О.С. ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТА ПОБУДОВА ПАРАМЕТРИЧНИХ І 3D-МОДЕЛЕЙ ЗУБОРІЗАЛЬНОЇ ФРЕЗИ З ФЛАНКОМ.....	34
Кроль О.С., Замковець Д.М. ОЦІНКА ПІДДАТЛИВОСТІ ПРУЖНОЇ ЛАНКИ ШПИНДЕЛЬ-РОЗТОЧНА ОПРАВКА В СЕРЕДОВИЩІ АРМ WINMACHINE	40
Логунів О.М. ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ВИВЧЕННІ КУРСУ ПРОГРАМУВАННЯ ВЕРСТАТІВ З ЧПК.....	46
Мелконов Г.Л., Мелконова І.В. ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ В ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ COMSOL MULTIPHYSICS.....	50
Міщук А.В. РОЗВИТОК ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ ВІЛЬНИМ АБРАЗИВНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ В КОЛИВНИХ РЕЗЕРВУАРАХ І ФОРМУВАННЯ ЇХ ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ.....	55
Ніколаєнко А.П., Шумакова Т.О. ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВУЗЛІВ МЕТАЛОРІЗАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ В СИСТЕМІ ANSYS	66
Соколов В.І., Степанова О.Г., Батурін Є.О. КОРЕКЦІЯ АВТОМАТИЧНОГО ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНОГО ПРИВОДУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ.....	72
Степанова О.Г. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНОГО ПРИВОДУ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ	79
Сулим А.О., Хозя П.О., Мельник О.О. ЗАСТОСУВАННЯ БОРТОВИХ ЄМНІСНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ НЕЗНАЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА ЕНЕРГОЄМНОСТІ НА РУХОМОМУ СКЛАДІ МЕТРОПОЛІТЕНУ.....	87
Ткаченко В.А. МОРФОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ КОМУНІКАЦІЯМИ В ОСВІТНІХ ПРОЕКТАХ.....	93
Третяк Е.В. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ З ВПРОВАДЖЕННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ НА РУХОМОМУ СКЛАДІ МЕТРОПОЛІТЕНУ	98

Харламов Ю.О., Романченко О.В., Міцик А.В. ПРО МОЖЛИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ГОРІННЯ МЕТАЛЕВИХ ЧАСТИНОК ПРИ ГАЗОТЕРМІЧНОМУ НАПИЛЕННІ	109
Харламов Ю.О., Міцик А.В., Романченко О.В. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТОНАЦІЙНО-ГАЗОВИХ ПОКРИТТІВ МЕТОДОМ МІКРОІНДЕНТУВАННЯ.....	120
Харламов Ю.О., Романченко О.В., Міцик А.В. ОСОБЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ ОКСИДНИХ ПОКРИТТІВ ДЕТОНАЦІЙНО-ГАЗОВИМ НАПИЛЕННЯМ	129
Чернікова І.Д., Черніков М.Г., Беседа Т.А. МАНІПУЛЯТОР ДЛЯ СВЕРХВИСОКОВАКУУМНИХ ФОТОЕЛЕКТРОННИХ ТА ЕЛЕКТРОН-ЕЛЕКТРОННИХ СПЕКТРОМЕТРІВ	141
Черніков М.Г., Чернікова І.Д. ВИСОКОВАКУУМНИЙ НАНОМЕТРИЧНИЙ КОМПЛЕКСНИЙ СПЕКТРОМЕТР	144
Шумакова Т.О., Ніколаєнко А.П. ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ ANSYS У РОЗРАХУНКАХ НА МІЦНІСТЬ КРУГЛИХ ПРОТЯЖОК	149

ЕКОНОМІЧНІ НАУКИ

Гаврюшенко Г.В. КОНКУРЕНТІ ПЕРЕВАГИ УКРАЇНИ НА СВІТОВИХ РИНКАХ.....	155
---	-----

CONTENTS

TECHNICAL SCIENCES

Asmankina A.A., Loria M.G., Tselishchev O.B., Kupina O.A. RESEARCH-AND-DEVELOPMENT OF THE HIT-PUMP STEP SETTING WITH HYDRODYNAMIC KAVITATION DEVICE IN COMPLEX OF SYSTEMS.....	7
Barbaruk L.V., Vynohradov V.V., Lomakin S.O. SYSTEM FOR SIMULATING THE MOVEMENT OF A PROJECTILE ALONG A PARABOLIC PATH	13
Dovhopoly A.S., Zbrutsky O.V., Biloborodov O.O. FEATURES OF THE STUDY OF QUASICONSERVATIVE SYSTEMS UNDER THE ACTION OF STOCHASTIC PERTURBATIONS.....	17
Domin Yu.V., Domin R.Yu., Cherniak G.Yu. EVALUATION BY MEANS OF COMPUTER SIMULATION OF THE DYNAMIC INDICATORS OF TRAFFIC SAFETY OF FLAT CARS.....	24
Karpyuk L.V., Davydenko N.A. COMPUTER PRACTICE IN ENGINEERING GRAPHICS.....	29
Krol O.S. RESEARCH OF THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF PARAMETRIC AND 3D MODELS OF GEAR CUTTING MILLS WITH FLANK	34
Krol O.S., Zamkovets D.M. ASSESSMENT OF ELASTIC LINK SPINDLE-BORING ARBOR IN THE APM WINMACHINE ENVIRONMENT.....	40
Lohunov O.M. USE OF MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES IN STUDY OF CNC MACHINE PROGRAMMING COURSE.....	46
Melkonov H.L., Melkonova I.V. MODELING FEATURES OF MECHANICAL PROCESSES BY USING THE FINITE ELEMENT METHOD IN A PROGRAMMER COMSOL MULTIPHYSICS	50
Mitsyk A.V. DEVELOPMENT OF PROCESSES WITH A FREE ABRASIVE MEDIUM TREATMENT IN OSCILLATING RESERVOIRS AND THE FORMATION OF THEIR PHYSICAL AND TECHNOLOGICAL CAPABILITIES	55
Nikolaenko A.P., Shumakova T.O. RESEARCH OF STRENGTH CHARACTERISTICS OF METAL-CUTTING EQUIPMENT UNITS IN ANSYS	66
Sokolov V.I., Stepanova O.G., Baturin E.O. CORRECTION OF AUTOMATIC ELECTROHYDRAULIC DRIVE FOR TECHNOLOGICAL EQUIPMENT	72
Stepanova O.G. MATHEMATICAL MODEL OF DYNAMIC CHARACTERISTICS FOR POWER PART OF ROTARY MOTION ELECTROHYDRAULIC DRIVE	79
Sulym A.O., Khozia P.O., Melnyk O.O. USE OF ON-BOARD LOW POWER AND CAPACITY ENERGY STORAGE DEVICES ON THE METRO ROLLING STOCK	87
Tkachenko V.A. MORPHOLOGICAL MODEL OF COMMUNICATION MANAGEMENT IN EDUCATIONAL PROJECTS	93
Tretiak E.V. ANALYSIS OF RESEARCH ON THE INTRODUCTION OF ENERGY STORAGE DEVICES ON METRO ROLLING STOCK	98

Kharlamov Y.O., Romanchenko O.V., Mitsyk A.V. ON THE POSSIBILITY OF USING OF METAL PARTICLES OXIDATION IN-FLIGHT DURING THERMAL SPRAYING	109
Kharlamov Y.O., Mitsyk A.V., Romanchenko O.V. THE STUDY OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF D-GUN SPRAYED COATINGS BY MICROINDENTATION TEST	120
Kharlamov Y.O., Romanchenko O.V., Mitsyk A.V. FEATURES OF OXIDE COATINGS DEPOSITION BY D-GUN SPRAYING	129
Chernikova I.D., Chernikov M.G., Beseda T.A. MANIPULATOR FOR SUPER HIGH VACUUM PHOTOELECTRONIC AND ELECTRON-ELECTRONIC SPECTROMETERS.....	141
Chernikov M.G., Chernikova I.D. HIGH VACUUM NANOMETRIC COMPLEX SPECTROMETER	144
Shumakova T.O., Nikolaenko A.P. APPLICATION OF THE ANSYS SYSTEM IN THE STRENGTH CALCULATIONS OF ROUND BROACHES.....	149

ECONOMIC SCIENCES

Gavrushenko G.V. COMPETITIVE ADVANTAGES OF UKRAINE IN THE WORLD MARKETS	155
---	-----

ТЕХНІЧНІ НАУКИ

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-7-12>

УДК 681.5.015

RESEARCH-AND-DEVELOPMENT OF THE HIT-PUMP STEP SETTING WITH
HYDRODYNAMIC KAVITATION DEVICE IN COMPLEX OF SYSTEMS

Asmankina A.A., Loria M.G., Tselishchev O.B., Kupina O.A.

ДОСЛІДЖЕННЯ І РОЗРОБКА СТУПІНЧАСТОЇ ТЕПЛОНАСОСНОЇ УСТАНОВКИ
З ГІДРОДИНАМІЧНИМ ПРИСТРОЄМ КАВІТАЦІЇ В КОМПЛЕКСІ СИСТЕМ

Асманкіна А.А., Лорія М.Г., Целіщев О.Б., Купіна О. А.

Presently all world tendencies of energy are directed on the use and combining of renewable energy sources. Combining of a few renewable energy sources and not renewable results in partial energy independence. In this work the laboratory setting was investigational on cooling and heating of water. During an experiment principles of Carnot were incorporated, hydrodynamics, recurrent-forward and dynamic compression of gases and many other. The association of a few renewable energy systems offered, here it is evidently rotined on charts, how many sources must be involved for work of the experimental setting. Statements were taken at the different experimental setting work terms for this purpose it was equipped plenty of sensors. Burn-time, pressure, temperature on the different areas of setting controlled remotely, through mobile application. For the constructions and estimation of testimonies mathematical model collection adequacy from sensors changes depending on the temperature indexes of external environment, that requires more detailed supervisions depending on time of year and desired temperature in an apartment, therefore and may need for this research more than year. The conducted experiments allowed to get the approximated information for the construction of pressure festering dependences charts from temperatures: exit from a compressor, from a capillary and, directly in a reservoir with a liquid, and similarly pressure from time of action.

A research result was become by the built pressure dependences charts from temperatures on four basic areas of setting. For the estimation of testimonies mathematical model collection adequacy from sensors changes depending on the temperature indexes of external environment, that requires more detailed supervisions depending on time of year and desired temperature in an apartment, therefore and may need for this research more than year. Charts are similarly resulted showing, that with each necessary subsequent start, there are less time for achievement of maximal value of pressure in the system is need. Findings enable to build a mathematical model for the further improvement of setting.

Ключові слова: coolagent of R134a, hydrodynamic setting, kavitation, thermal coefficient, automation, filter-vaporiser, motor-compressor, microcontroller Esp8266 NODEMCU v3, sensor Ds18b20, wattmeter Pzem-021.

Вступ. In this work it is suggested to combine a few systems types, with the further controlled from distance control. We will consider the systems in the differentiated kind. The first is the system of dwelling apartment heating. In heating and cooling System of dwelling apartment — same power and economic expense part of charges in the modern world, a necessity to search the possible resources expenses diminishing ways for the receipt of the same amount of warmth appears therefore. In setting as a working body from which taken off warmly, running water is chosen. Using principle of heat-pump, we take the several of heat and increase it due to work of domestic motor-compressor.[1]

The second system is the autonomous power supply system. For compressor work electricity is needed. Adding to the system of a few autonomous energy types (for example, sun panels, wind turbines) and accumulator sources is increased by the systems stability work.[2]

For evidentness will consider the systems separately. The system, plugging in itself only sun panels for providing of our experimental setting, will plug in itself: 10 sun batteries of Hh-mono-60w by a general area 4,6 m², accumulator on 200 Ah.

On fig.1 yellow curve it is the produced energy, and dark blue - consumed for a year.

System, plugging in itself only two wind generators Hy-400 in 10 m. high.

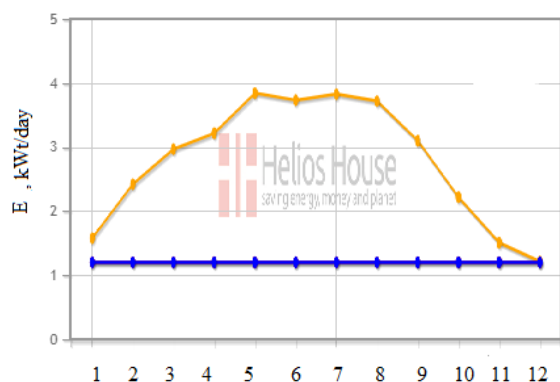


Fig. 1. System is making of sun panels

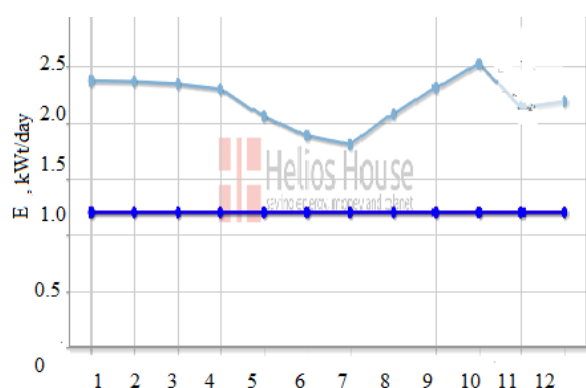


Fig. 2. System is Making of wind generator

On fig.2 blue curve it is the produced energy, and dark blue - consumed for a year.

Combined system, including two sun panels, by an area 0, 9 m² and one wind generator, that comfortably to place in city boundaries and will not take much place on sizes, will not only produce the necessary amount of energy but also enables to accumulate in an accumulator a two-bit in case of absence of energy sources.[3–10]

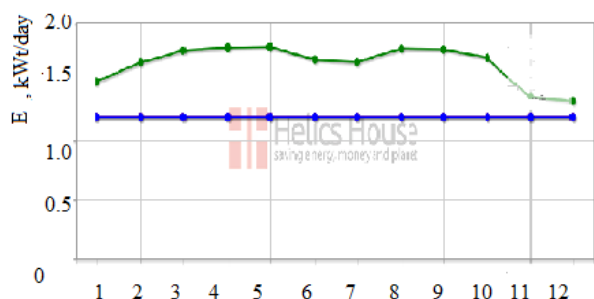


Fig. 3. Total making of the system from both resorsers

On fig.3 green curve it is the produced energy, and dark blue - consumed for a year.

Основний матеріал. A this job performance is creation of the experimental setting, bay of coolagent of R134a, soldering of copper tubes, connecting in the sys-

tem of manometers, wattmeter, fire button, for an urgent deenergizator.

On fig.1 the developed laboratory setting is ro-tined, where 1 is collagents filter-vaporiser; 2 is an insulating lid; 3 is a copper tube; 4 is a capacity with running water at which taken off warmly; 5 is a capacity which heating is in; 6 is a motor-compressor of domestic refrigerator.[11]

Further, for the leadthrough of data automatic capture, their treatment, control and possibility of adjusting of parameters sensors were connected and a comptrol-ler[12]is prograded. Tubes and throttle for the system of heat transfer a copper was chosen, because it has the most large heat conductivity and can survive pressure to 11 mPa at a diameter 6 mm and to the thickness of wall 0,8 mm.

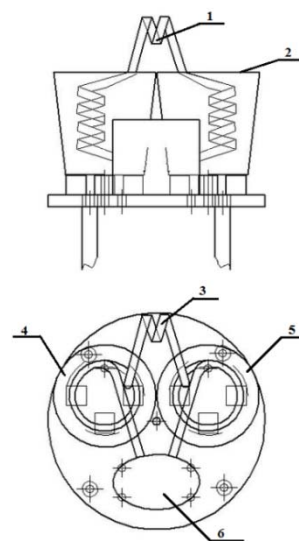


Fig.4 The schematic image of the laboratory setting

As a system for automation temperature testimonies setting and removal, pressure, amount of expended electric power and water - we used Esp8266 NODEMCU v3.

For the removal of testimonies of temperature we used the waterproof sensors Ds18b20, which work in the range of measuring from -55° C to +125° C.

For the removal of testimonies of pressure we used the manometers of pressure on 15 mPa.

We meter reading electric power by Pzem-021 range of power measuring from 0 to 4,5 kW, current strength from 0 to 20 A, energies from 0 to 9999 kW, tension from 80 to 260 V.

For rate-of-flow testimonies removal we used the rate-of-flow sensor, diameter 1/2 inch from Elecrow range of measuring which from 1 to 30 litres. Also for measuring of ambient Dht22 temperature range of temperature measuring from -40 to 80 °C, range of humidity measuring from 0 to 99,99%.

Programming is carried out on the platform of microcontroller Esp8266 NODEMCU v3, sketches load through Arduino IDE, storage of data and reflection in real time carried out on a base Open Source appendixes of Blynk.

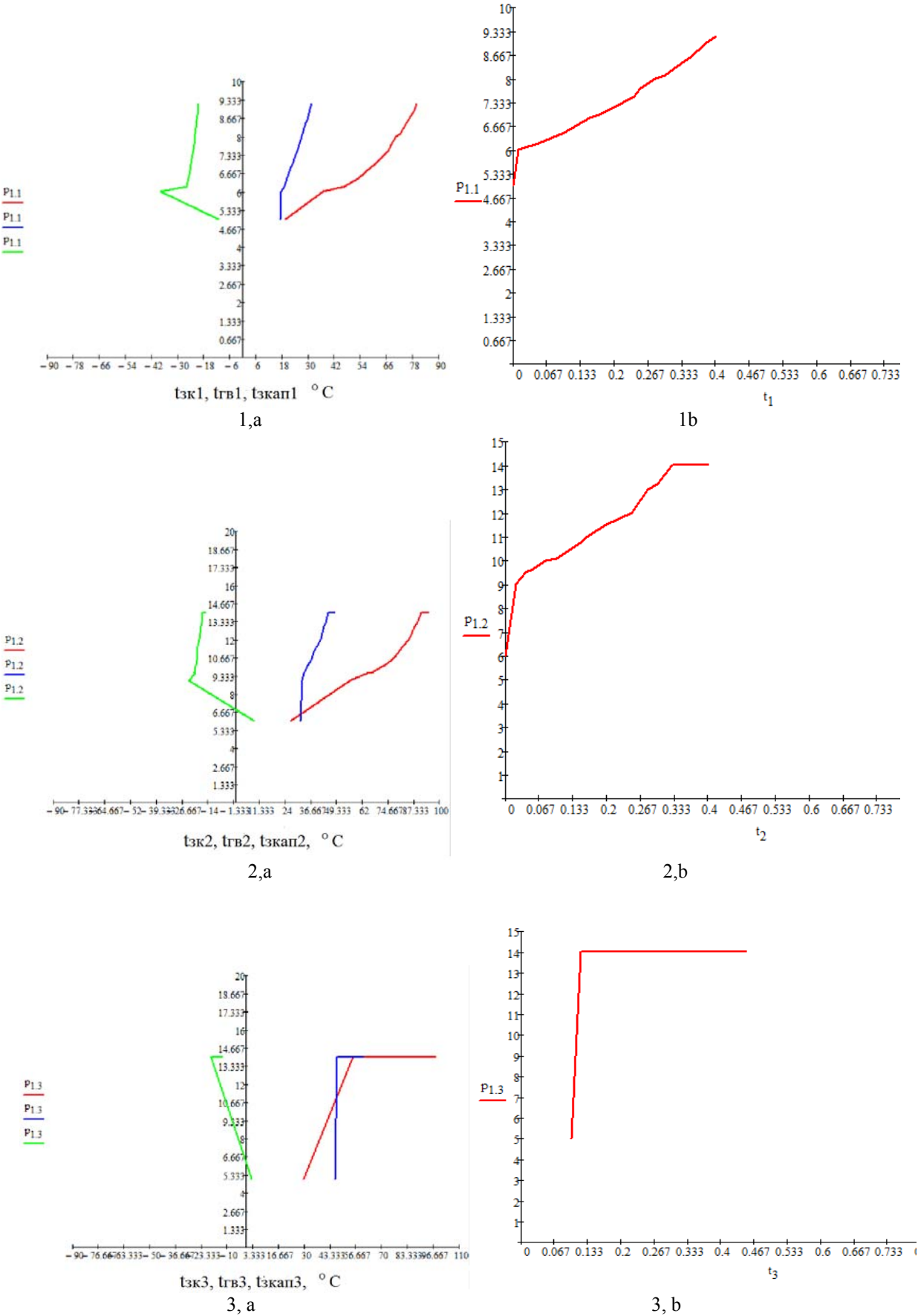


Fig. 5. Results of start 1 – the first cycle; 2 – second; 3 – third

The developed complex of the systems allows to heat and cool an apartment, not dependency upon the source of centralized energy liver disease.

The developed experimental setting was started with the rotor compressor efficiency determination purpose with working coolant R134a and power 1.2 kW.[13,16] For this purpose during great while from sensors information was taken off and taken in tables. The compressor start was conducted 3 cycles at one bout, every cycles work duration makes 40 minutes, then interruption between cycles on 15. For the estimation of testimonies mathematical model collection adequacy from sensors changes depending on the temperature indexes of external environment, that requires more detailed supervisions depending on time of year and desired temperature in an apartment, therefore and may need for this research more than year. The conducted experiments allowed to get the approximated information for the construction of pressure festering dependences charts from temperatures: exit from a compressor, from a capillary and, directly in a reservoir with a liquid, and similarly pressure from time of action.[17,18]

In part a) on charts presented: red is dependence of pressure from the heater temperature tube to collagents filter-vaporiser, dark blue is dependence of pressure from the temperature of the heated water, green is dependence of pressure from the temperature of heater tube after collagents filter-vaporiser. In part b) the red is rotin the chart of dependence of pressure from the time of work in hours. Apparently from charts, at achievement of temperature a compressor 70°C at the first start, the level of pressure remains stable 14 mPa. At subsequent starts, arriving at pressure in 14mPa, we made decision disconnecting by hand from technical descriptions of the used compressor and connecting tubes.

As a result of experiment we succeeded to attain high heat emission of the heated element, that too high expansion of the heated gas appeared weak in it. For the improvement of setting more suitable compressor, able to work on khladagente of other kind, is needed.

Висновки. This work result is development and testing of pilot laboratory setting. The analysis of existent developments of the autonomous energy liver disease systems and descriptions of producible equipment allowed to expose basic progress of this area trends, form perspective direction practical realization of fluidizer removal of testimonies from sensors.

The strong side of this research is the got positive effect from the decline of the power loading on a compressor. Similarly, the choke losses of working heat diminish in the contours of heat-pump, that is arrived at at the middle temperatures of condensation.

Література

1. Calm J M 2008 The next generation of refrigerants—Historical review, considerations, and

- outlook International Journal of Refrigeration 31 1123–1133
2. Kulcar, B., Goricanec, D., Kropce, J. (2008). Economy of exploiting heat from low-temperature geothermal sources using a heat pump. *Energy and Buildings*, 40 (3), 323–329. doi: 10.1016/j.enbuild.2007.02.033
3. A Polzot, P D'Agaro, G Cortella Energy analysis of a transcritical CO2 supermarket refrigeration system with heat recovery - *Energy Procedia*, 2017 – Elsevier
4. Пятков И., Чернышов Д., Шевкун А., Швейцер А. и др. «О выборе конструкторских решений при разработке роторно-поршневого компрессора с улучшенными экологическими характеристиками» *Журнал «Двигателестроение»*, № 5, 2004.
5. Randhavane, S. B., Khambete, A. K. (2017). Harnessing hydroxyl radicals generated by hydrodynamic cavitation reactor in simultaneous removal of chlorpyrifos pesticide and COD from aqueous solution. *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, 82, 346–354. doi: 10.5004/dwt.2017.20965
6. URL: <http://www.helios-house.ru/on-line-kalkulyator.html>
7. Won, S. P. (2012). Performance Analysis of an Air-Cycle Refrigeration System. *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 24 (9), 671–678. doi: 10.6110/kjacr.2012.24.9.671
8. Блинова Н.П., Левченко Г.Н., Мясников В.А., Янович К.В. (2018) СИСТЕМЫ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ КАК КОМПОНЕНТЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ НАУКА И ВОЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования "Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева" Министерства обороны Российской Федерации (Омск), 1(12)
9. Прилуцкий И. К. Метод определения мгновенных локальных коэффициентов теплоотдачи в элементах ступеней машин объемного действия. // *Технические Газы*. 2013. № 4. с. 19–26.
10. Mohanraj M, Jayaraj S and Muraleedharan C 2008 Comparative assessment of environment-friendly alternatives to R134a in domestic refrigerators *Energy Efficiency* 1 189–198
11. Amin, L. P., Gogate, P. R., Burgess, A. E., Bremner, D. H. (2010). Optimization of a hydrodynamic cavitation reactor using salicylic acid dosimetry. *Chemical Engineering Journal*, 156 (1), 165–169. doi: 10.1016/j.ccej.2009.09.043
12. Danfoss builds heat pump portfolio. (2006). *Pump Industry Analyst*, 2006 (7), 11. doi:10.1016/s1359-6128(06)71441-0
13. Wei, J., Kawaguchi, Y., Hirano, S., & Takeuchi, H. (2004). Study on a PCM Heat Storage System for Rapid Heat Supply. *Heat Transfer*, Volume 1, 267–274. doi: 10.1115/imece2004-61025
14. CHEN, Y., DING, G., SHI, Y. (2009). C303 A new technology coupling with heat pump water heat, dehumidification and refrigeration (Heat Pump-1). The Proceedings of the International Conference on Power Engineering (ICOPE), 2009.3, 3-151–3-156. doi: 10.1299/jsmeicope.2009.3_3-151_
15. Glatzmaier, G. A. (2017). *Magnetic Field*. Princeton University Press. doi: 10.23943/princeton/9780691141725.003.0011
16. Pace, M. E. (2004). LIQUID PROPANE GAS (LPG) STORAGE AREA BOILING LIQUID EXPANDING VAPOR EXPLOSION (BLEVE) ANALYSIS. doi: 10.2172/820866

17. Siang J T and Sharifian A 2017 Extending the Capillary Tube of a Propane Air-conditioner to Reduce the Refrigerant Charge Energy Procedia 110 229-234
18. Kim, J.-H.; Seong, N.-C.; Choi, W. Modeling and Optimizing a Chiller System Using a Machine Learning Algorithm. *Energies* 2019, 12, 2860.

References

1. Calm J M 2008 The next generation of refrigerants—Historical review, considerations, and outlook International Journal of Refrigeration 31 1123–1133
2. Kulcar, B., Goricanec, D., Kroppe, J. (2008). Economy of exploiting heat from low-temperature geothermal sources using a heat pump. *Energy and Buildings*, 40 (3), 323–329. doi: 10.1016/j.enbuild.2007.02.033
3. A Polzot, P D'Agaro, G Cortella Energy analysis of a transcritical CO₂ supermarket refrigeration system with heat recovery - *Energy Procedia*, 2017 – Elsevier.
4. Pyatov I., Chernyshov D., Shevkun A., Shvejcer A. i dr. «O vybore konstruktorskih reshenij pri razrabotke rotno-porshnevogo kompressora s uluchshennymi ekologicheskimi harakteristikami» Zhurnal «Dvigatellestroenie», № 5, 2004.
5. Randhavane, S. B., Khambete, A. K. (2017). Harnessing hydroxyl radicals generated by hydrodynamic cavitation reactor in simultaneous removal of chlorpyrifos pesticide and COD from aqueous solution. *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, 82, 346–354. doi: 10.5004/dwt.2017.20965
6. URL: <http://www.helios-house.ru/on-line-kalkulyator.html>
7. Won, S. P. (2012). Performance Analysis of an Air-Cycle Refrigeration System. *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 24 (9), 671–678. doi: 10.6110/kjacr.2012.24.9.671
8. Blinova N.P., Levchenko G.N., Myasnikov V.A., Yanovich K.V. (2018) SISTEMY ChASTOTNOGO REGULIROVANIYA KAK KOMPONENTY SISTEM AVTOMATIZIROVANNOGO UPRAVLENIYA NAUKA I VOENNAYA BEZOPASNOST Federalnoe gosudarstvennoe kazennoe voennoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Voennaya akademiya materialno-tehnicheskogo obespecheniya imeni generala armii A.V. Hruleva" Ministerstva oborony Rossijskoj Federacii (Omsk), 1(12)
9. Priluckij I. K. Metod opredeleniya mgnovennyh lokalnyh koefitsientov teplootdachi v elementah stupenej mashin obemnogo dejstviya. // *Tekhnicheskie Gazy*. 2013. № 4. s. 19-26.
10. Mohanraj M, Jayaraj S and Muraliedharan C 2008 Comparative assessment of environment-friendly alternatives to R134a in domestic refrigerators *Energy Efficiency* 1 189-198
11. Amin, L. P., Gogate, P. R., Burgess, A. E., Bremner, D. H. (2010). Optimization of a hydrodynamic cavitation reactor using salicylic acid dosimetry. *Chemical Engineering Journal*, 156 (1), 165–169. doi: 10.1016/j.cej.2009.09.043
12. Danfoss builds heat pump portfolio. (2006). *Pump Industry Analyst*, 2006 (7), 11. doi:10.1016/s1359-6128(06)71441-0
13. Wei, J., Kawaguchi, Y., Hirano, S., & Takeuchi, H. (2004). Study on a PCM Heat Storage System for Rapid Heat Supply. *Heat Transfer*, Volume 1, 267–274. doi: 10.1115/imece2004-61025
14. CHEN, Y., DING, G., SHI, Y. (2009). C303 A new technology coupling with heat pump water heat, dehumidification and refrigeration (Heat Pump-1). The Proceedings of the International Conference on Power Engineering (ICOPE), 2009.3, 3-151–3-156. doi: 10.1299/jsmeicope.2009.3_3-151
15. Glatzmaier, G. A. (2017). *Magnetic Field*. Princeton University Press. doi: 10.23943/princeton/9780691141725.003.0011
16. Pace, M. E. (2004). LIQUID PROPANE GAS (LPG) STORAGE AREA BOILING LIQUID EXPANDING VAPOR EXPLOSION (BLEVE) ANALYSIS. doi: 10.2172/820866
17. Siang J T and Sharifian A 2017 Extending the Capillary Tube of a Propane Air-conditioner to Reduce the Refrigerant Charge Energy Procedia 110 229-234
18. Kim, J.-H.; Seong, N.-C.; Choi, W. Modeling and Optimizing a Chiller System Using a Machine Learning Algorithm. *Energies* 2019, 12, 2860.

Асманкіна А.А., Лорія М.Г., Целішев О.Б., Купіна О.А. Дослідження і розробка ступінчастої теплонасосної установки з гідродинамічним пристроєм кавітації в комплексі систем

В даний час всі світові тенденції енергетики направлені на використання і комбінування поновлюваних джерел енергії. Комбінування декількох поновлюваних джерел енергії і не поновлюваних приводить до часткової незалежності. У даній роботі була досліджена лабораторна установка по охолодженню і нагріву води. В ході експерименту були об'єднані принципи Карно, гідродинаміки, зворотно-поступального і динамічного стискування газів і багато інших. Пропонується об'єднання декількох систем поновлюваної енергії, при цьому наочно показано на графіках, скільки джерел необхідно задіювати для роботи експериментальної установки. Були зняті свідчення за різних умов роботи експериментальної установки, для чого вона була оснащена великою кількістю датчиків. Час роботи, тиск, температура на різних ділянках установки контролюються дистанційно, за допомогою мобільного додатка. Для побудови і оцінки адекватності математичної моделі збір свідчень з датчиків мініється залежно від температурних показників зовнішнього середовища, що вимагає детальніших спостережень залежно від пори року і бажаної температури в приміщенні, тому і знадобилося для цього дослідження більше року. Проведені експерименти дозволили отримати апроксимовані дані для побудови графіків залежностей нагнітання тиску від температур: виходу з компресора, з капіляра і, безпосередньо в резервуарі з рідиною, а так само тиску від часу дії.

Результатом дослідження стали побудовані графіки залежностей тиску від температур на трьох основних ділянках установки. Проведені експерименти дозволили отримати апроксимовані дані. Так само приведені графіки, що показують, що з кожним подальшим запуском необхідно менше часу для досягнення максимального значення тиску в системі. Отримані дані дають можливість побудувати математичну модель для подальшого поліпшення установки.

Ключові слова: хладагент R134a, гідродинамічна установка, тепловий коефіцієнт, автоматизація, фільтр-осушувач, мотор-компресор, мікроконтролер Esp8266 NODEMCU v3, датчик Ds18b20, ватметр Pztem-021.

Асманкина А.А., Лория М.Г., Целищев А.Б., Купина О.А. Исследование и разработка ступенчатой теплонасосной установки с гидродинамическим кавитационным устройством в комплексе систем

В настоящее время все мировые тенденции энергетики направлены на использование и комбинирование возобновляемых источников энергии. Комбинирование нескольких возобновляемых источников энергии и не возобновляемых приводит к частичной энергонезависимости. В данной работе была исследована лабораторная установка по охлаждению и нагреву воды. В ходе эксперимента были объединены принципы Карно, гидродинамики, возвратно-поступательного и динамического сжатия газов и многие другие. Предлагается объединение нескольких систем возобновляемой энергии, при этом наглядно показано на графиках, сколько источников необходимо задействовать для работы экспериментальной установки. Были сняты показания при различных условиях работы экспериментальной установки, для этого она была оснащена большим количеством датчиков. Время работы, давление, температура на разных участках установки контролируются дистанционно, при помощи мобильного приложения. Для построения и оценки адекватности математической модели сбор показаний с датчиков меняется в зависимости от температурных показателей внешней среды, что требует более детальных наблюдений в зависимости от времени года и желаемой температуры в помещении, поэтому и понадобилось для этого исследования более года. Проведенные эксперименты позволили получить аппроксимированные данные для построения графиков зависимостей нагнетания давления от температур: выхода из компрессора, из капилляра и, непосредственно в резервуаре с жидкостью, а так же давления от времени действия.

Результатом исследования стали построенные графики зависимостей давления от температур на трех основных участках установки. Так же приведены графики показывающие, что с каждым последующим запуском необходимо меньше времени для достижения максимального значения давления в системе. Полученные данные дают возможность построить математическую модель для дальнейшего улучшения установки.

Ключевые слова: хладагент R134a, гидродинамическая установка, тепловой коэффициент, автоматизация, фильтр-осушитель, мотор-компрессор, микроконтроллер ESP8266 NodeMCU v3, датчик DS18B20, ваттметр PZEM-021.

Лорія Марина Генадіївна – д.т.н., доцент кафедри електронних апаратів, Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля

Асманкіна Анастасія Анатоліївна – аспірант кафедри електронних апаратів, ст. лаборант кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, asmankina@ukr.net

Целищев Олексій Борисович – д.т.н., проф., директор Інституту міжнародних відносин, Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля

Купіна Оксана Анатоліївна – аспірант кафедри електронних апаратів, ст. лаборант кафедри електронних апаратів Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, kupina@ukr.net

Стаття подана 12.02.2020 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-13-16>

УДК 004.94

СИСТЕМА МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ СТРІЛИ ЗА ПАРАБОЛІЧНОЮ ТРАЄКТОРІЄЮ

Барбарук Л.В., Виноградов В.В., Ломакін С.О.

SYSTEM FOR SIMULATING THE MOVEMENT OF A PROJECTILE ALONG A PARABOLIC PATH

Barbaruk L.V., Vynohradov V.V., Lomakin S.O.

Розглянуто реалізацію системи для моделювання польоту об'єкта за параболічною траєкторією без використання фізичних сил, що впливають на рухомий об'єкт. Запропоновано варіант реалізації системи, що базується на квадратичних кривих Безьє. Виконано порівняльний аналіз функцій інтерполяції прямолінійного руху для візуального середовища розробки «Unity». Обґрунтовано доцільність використання запропонованої системи для моделювання польоту об'єкта за параболічною траєкторією шляхом її впровадження у гру «Para Bellum».

Ключові слова: Unity, квадратична крива Безьє, моделювання польоту стріли, Para Bellum.

Вступ. На поточний момент в індустрії комп'ютерних ігор спостерігається тенденція щодо збільшення кількості незалежних розробників, які часто беруть за основу середньовічне оточення при створенні ігор. Відповідно до ресурсу Steamspy, кількість опублікованих ігор на майданчику Steam за 2019 рік збільшилася на 6954, у порівнянні із показником за 2014 рік. Загалом на майданчику Steam понад 130 ігор мають мітку «Medieval», що підтверджує відносну популярність ігор за окресленою тематикою.

Постановка проблеми. При розробці гри, оточення якої наближене до середньовічного, можливо зіштовхнутися із проблематикою створення методу симуляції польоту стріли за параболічною траєкторією. Окрім наведеного прикладу із стрілою, подібної симуляції польоту може потребувати будь-який об'єкт, що здійснює рух за параболічною траєкторією. Основним підходом при реалізації подібних систем є моделювання впливу фізичних сил на рухомий об'єкт. Проте, подібний підхід значно ускладнює реалізацію системи, якщо вона передбачає коригування початкової траєкторії рухомого об'єкта. Варто відзначити, що моделювання впливу фізичних сил на рухомий об'єкт потребує істотної кількості обчислювальних ресурсів, тому альтернативний

варіант реалізації системи надає змогу обмеження витрат обчислювальних ресурсів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У галузі розробки комп'ютерних ігор криві Безьє мають вузькоспеціалізовану сферу застосування. Основним напрямком при використанні кривих Безьє є задача пошуку оптимального шляху. Окреслена тематика розглядалася у роботах І. Макарова, П. Зюзіна, М. Ботти, В. Гот'єрі, В. Снэгселя та інших вчених. Стаття [8] описує використання кривих Безьє для системи пошуку та побудовання шляху для гри у жанрі «First-Person Shooter». У статті [9] розглянуто використання кривих Безьє при побудові оптимальної траєкторії проходження траси для досягнення конкурентного часу подолання кола. Цю роботу представлено для ігор у жанрі «Racing». У статті [10] представлено підхід до планування шляху на основі кривої Безьє для футболу із участю роботів. Цей підхід поєднує в собі функції планування шляху, уникнення перешкод, вирівнювання шляху та коригування постави. Проведений аналіз наукових робіт дає підставу стверджувати, що використання кривих Безьє для моделювання польоту стріли є мало досліджуваною сферою.

Мета статті. Аналіз етапів проектування системи, що моделює політ об'єкта за параболічною траєкторією базується на квадратичних кривих Безьє. Дослідження стабільності розробленої системи при зміні траєкторії руху модельованого об'єкта та впровадження допоміжних підсистем, які виявляють неприйнятні зміни у траєкторії руху. Дослідження доцільності використання розробленої системи у порівнянні із типовим підходом, що задіє фізичні сили для впливу на рухомий об'єкт.

Побудова квадратичної кривої Безьє. Для побудови квадратичних кривих Безьє [1,2] необхідне виділення двох проміжних точок Q_0 та Q_1 за умови, що параметр t змінюється від 0 до 1:

– точка Q_0 змінюється від P_0 до P_1 та описує лінійну криву Безьє;

- точка Q_1 змінюється від P_1 до P_2 та описує лінійну криву Безьє;
- точка B змінюється від Q_0 до Q_1 та описує квадратичну криву Безьє.

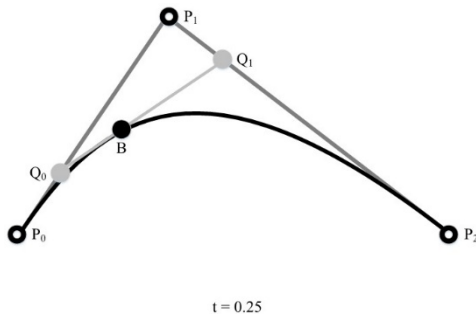


Рис. 1. Схема побудови квадратичної кривої Безьє при $t=0.25$

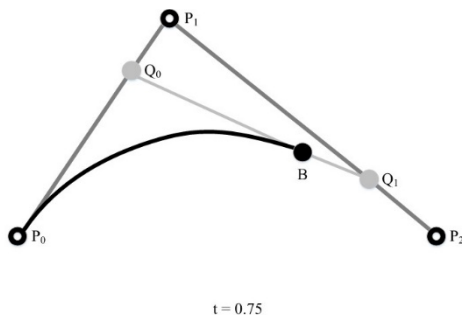


Рис. 2. Схема побудови квадратичної кривої Безьє при $t=0.75$

Структура системи, що базується на квадратичних кривих Безьє. Реалізація системи потребує використання трьох основних об'єктів:

- **target** – цільовий об'єкт пострілу із довільним положенням у просторі; може змінювати положення під час руху flying object;
- **flying object** – об'єкт, для якого імітується рух за параболічною траєкторією; до початку руху не може знаходитися у координатах, які відповідають положенню target; рухається прямолінійно у напрямку до supporting point;
- **supporting point** – допоміжна точка, що залишається невидимою для спостерігача при функціонуванні системи; до початку руху розташовується на проміжку між target та flying object; рухається прямолінійно у напрямку до target.

За допомогою прямолінійного руху flying object та supporting point, досягається параболічна траєкторія для flying object. Результатом роботи алгоритму є модифіковані координати для flying object та supporting point. Модифіковані координати положення отримуються шляхом використання інтегрованих у бібліотеку «Vector3» (Unity) функцій інтерполяції прямолінійного руху зі сталою швидкістю. Якщо V_1 – швидкість прямолінійного руху flying object, а V_2 – швидкість прямолінійного руху supporting point, то повинна виконуватися наступна умова: $V_1 \leq V_2$.

Аналіз функцій інтерполяції прямолінійного руху об'єкта. Функція Lerp [4, 7] приймає три параметри: a – початкові координати рухомого об'єкта; b – координати, до яких мусить рухатися об'єкт; t – числовий коефіцієнт, що відображає поточний етап шляху. Функція здійснює лінійну інтерполяцію між двома векторами a та b . Роль інтерполюючої функції виконує параметр t . Параметр t обмежено діапазоном $[0, 1]$. Функція повертає координати положення рухомого об'єкта для поточного значення параметра t . Однак, функція Lerp [4, 7] має істотний недолік – чутливість до зміни параметрів a та b у процесі інтерполяції. Подібні зміни призводять до зміщення положення об'єкта або його затримку при переміщенні через невідповідність початкової відстані шляху до поточної відстані шляху. Для усунення недоліку необхідно враховувати зміни положення a або b при обчисленні пройденої відстані шляху.

Функція MoveTowards [3, 7] приймає три параметри: **current** – поточні координати рухомого об'єкта; **target** – координати, до яких мусить рухатися об'єкт; **maxDistanceDelta** – відстань, на яку переміститься рухомий об'єкт упродовж одного кадру. Функція повертає нові координати положення рухомого об'єкта, після зміщення його поточних координат на **maxDistanceDelta**. Призначення функції – інтерполяція положення об'єкта між точками **current** та **target** для переміщення на відстань не більшу ніж **maxDistanceDelta**. Використання MoveTowards [3, 7] передбачає переміщення об'єкта кожен кадр за координатами, що обчислюються функцією. При застосуванні MoveTowards [3, 7] досягається плавне переміщення. Швидкість руху об'єкта задається через параметр **maxDistanceDelta**. Якщо поточна відстань до цілі менша ніж **maxDistanceDelta**, функція поверне позицію **target**. Переміщення не може продовжуватися після досягнення об'єктом **target**. При встановленні від'ємного значення для **maxDistanceDelta**, рух об'єкта відбуватиметься у напрямку до **current**.

Пошук та опрацювання виключних умов. Зміна положення **target**, під час руху flying object, потребує виконання наступної умови:

$$\sqrt{(X_{P_2} - X_{P_0})^2 + (Y_{P_2} - Y_{P_0})^2} \geq \sqrt{(X_{Q_2} - X_{P_0})^2 + (Y_{Q_2} - Y_{P_0})^2}, \quad (1)$$

де X_{P_0} та Y_{P_0} – координати початкової точки шляху;

X_{P_2} та Y_{P_2} – координати кінцевої точки шляху;

X_{Q_2} та Y_{Q_2} – координати проекції рухомого об'єкта на відрізок P_0P_2 .

При недотриманні умови алгоритм генерує траєкторію польоту, яка є неприпустимою при моделюванні польоту стріли. Необхідно відзначити, що розроблена система обробляє переміщення усіх задіяних об'єктів тільки за двома осями. Подібна особливість обумовлена ідентичними значеннями

координат, відносно третьої осі, для усіх задіяних об'єктів.

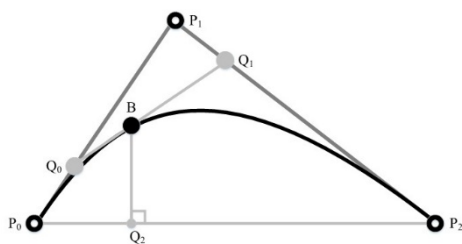


Рис. 3. Схема квадратичної кривої Безьє із проекцією рухомого об'єкта на відрізок P_0P_2

Для обчислення відстані між точками P_0 та Q_2 необхідні додаткові розрахунки. Принцип обчислення відстані базується на статті [6].

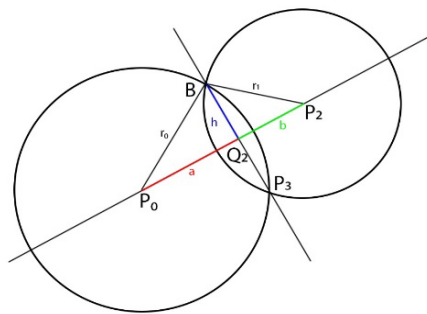


Рис. 4. Допоміжна схема із додатковими елементами

Спочатку розраховується відстань між центрами кіл:

$$d = \|P_2 - P_0\| \quad (2)$$

Якщо $d > r_0 + r_1$ рішень немає, кола відокремлені.

Якщо $d < |r_0 - r_1|$ рішень немає, бо одне з кіл включає інше.

Якщо $d = 0$ або $r_0 = r_1$ кола збігаються, безкінечна кількість рішень.

Розглянувши два трикутника: P_0Q_2B та P_2Q_2B виражаємо наступні формули:

$$r_0^2 = a^2 + h^2, \quad (3)$$

$$r_1^2 = b^2 + h^2. \quad (4)$$

Із рівності:

$$d = a + b \quad (5)$$

випливає:

$$a = \frac{(r_0^2 - r_1^2 + d^2)}{2} * d. \quad (6)$$

Прикладне використання функції LookRotation у системі. Функція LookRotation [5, 7] приймає два параметри: forward – напрям, в якому буде повернуто об'єкт; upwards – вектор, яким визначено напрямок «вгору». Функцією здійснюється обертання із заданими напрямками «вперед» та «вгору», а якщо вектори forward або upwards є нульовими або колінеарними функція не змінює значення оберту об'єкта.

Для відтворення прискорення або уповільнення стріли під час її руху, використовується множник f_0 . Поточна швидкість обчислюється шляхом добутку стандартного значення швидкості та множника. Значення множника визначається порівнянням висоти flying object (h_1) та supporting point (h_2):

$$h_1 \leq h_2 \Rightarrow 0 \leq f_0 < 1, \quad (7)$$

$$h_1 > h_2 \Rightarrow f_0 \geq 1. \quad (8)$$

Висновок. Розглянуто реалізацію повноцінної незалежної системи для моделювання польоту стріли. Описана система здатна переміщувати об'єкт (стрілу) за параболическою траєкторією, виявляти порушення при побудові траєкторії, надавати прискорення об'єкту при падінні та уповільнювати його під час збільшення висоти, а також здійснювати імітацію нахилу об'єкта впродовж його руху. Наведений варіант системи реалізовано у візуальному середовищі розробки Unity на мові C# та впроваджено у гру «Para Bellum».

Реалізована за пропонуванням підходом система, здатна імітувати політ стріли, використовуючи лише дві функції інтерполяції прямолінійного руху та незначну кількість супровідних обчислень. Також система надає функціонал налаштування траєкторії руху об'єкта за допомогою зміни розташування допоміжної точки перед початком руху об'єкта.

References

1. Mortenson M. Mathematics for computer graphics applications / Michael Mortenson. – Industrial Press Inc., 1999. – 338 p.
2. Handbook of computer aided geometric design / G. Farin, J. Hoschek, M.-S. Kim. – Elsevier, 2002. – 797 p.
3. Scripting API Vector3.MoveTowards [Internet source] // Unity Technologies. – 2020. – Retrieved from: <https://docs.unity3d.com/ScriptReference/Vector3.MoveTowards>.
4. Scripting API Vector3.Lerp [Internet source] // Unity Technologies. – 2020. – Retrieved from: <https://docs.unity3d.com/ScriptReference/Vector3.Lerp>.
5. Scripting API Quaternion.LookRotation [Internet source] // Unity Technologies. – 2020. – Retrieved from: <https://docs.unity3d.com/ScriptReference/Quaternion.LookRotation>.
6. Intersection of two circles [Internet source] // Paul Bourke. – 1997. – Retrieved from: <http://paulbourke.net/geometry/circlesphere>.

7. Unity 2020.1.0a21 C# reference source code [Internet source] // GitHub, Inc. – 2020. – Retrieved from: <https://github.com/Unity-Technologies/UnityCsReference>.
8. Makarov I. Modelling Human-like Behavior through Reward-based Approach in a First-Person Shooter Game / I. Makarov, P. Zyuzin, P. Polyakov, M. Tokmakov, O. Gerasimova, I. Guschenko-Cheverda, M. Uriev. – Proceedings of EEML, 2016. – 24-33 pp.
9. Botta M. Evolving the optimal racing line in a high-end racing game / M. Botta, V. Gautieri, D. Loiacono, P. L. Lanzi. – IEEE Conference on Computational Intelligence and Games, 2012. – 108-115 pp.
10. Wu J. A bezier curve-based approach for path planning in robot soccer / J. Wu, V. Snášel. – Innovations in Bio-Inspired Computing and Applications. Springer, Cham, 2014. – 105-113 pp.

Барбарук Л.В., Виноградов В.В., Ломакин С.О.
Система моделирования движения стрелы по параболической траектории.

Рассмотрена реализация системы моделирования полета объекта по параболической траектории без использования физических сил, влияющих на движущийся объект. Предложен вариант реализации системы, базирующейся на квадратичных кривых Безье. Выполнен сравнительный анализ функций интерполяции прямолинейного движения для визуальной среды разработки «Unity». Обоснована целесообразность использования предлагаемой системы для моделирования полета объекта по параболической траектории путем ее внедрения в игру «Para Bellum».

Ключевые слова: Unity, квадратичная кривая Безье, моделирование полета стрелы, Para Bellum.

Barbaruk L.V., Vynogradov V.V., Lomakin S.O.
System for simulating the movement of a projectile along a parabolic path.

The project involves the creation of a game in the genre of real-time strategy (RTS). Game development includes the implementation of a set of mechanics due to the genre of the game. The implementation of mechanics should be carried out using the developed algorithms in the form of separate systems. The design of all systems is planned with maximum attention to game optimization. This emphasis allows you to reduce the hardware requirements of the game and simplify the work during the porting phase. A system for modeling the flight of an object on a parabolic trajectory without the use of physical forces acting on a moving object has been intro-

duced. System based on quadratic Bezier curves. The main goal of the system is to simulate the flight of an object along a parabolic path. To achieve this goal, the use of physical factors influencing the simulated object and the design of an alternative system are abandoned. The functions of interpolation of rectilinear motion and accompanying calculations are used to construct the trajectory of the arrow in real time. The designed system must adjust the flight path. The system consists of three main objects: target, supporting point and flying object. Brief description of the algorithm: the target and the flying object are located at different points and have a distance between them; supporting point located in the space between the target and the initial position of the flying object; supporting point should be located higher than two other objects. Linear movement of the supporting point from the starting position to the target position and linear movement of the flying object from the starting position to the supporting point create a parabolic trajectory for the flying object. The system also implements acceleration / deceleration of the object's flight speed, rotation of the projectile during movement, and an algorithm for detecting an invalid trajectory. This solves the problem of avoiding the time-consuming process of texturing the object while maintaining its quality. To implement the gameplay component of the game, which requires the use of physical properties of the object, developed its own system that simulates the influence of physical factors on the object of modeling. A full-fledged independent boom flight simulation system and its modified version with related functionality have been implemented, which is implemented in the game "Para Bellum".

Keywords: Unity, quadratic Bezier curve, arrow flight simulation, Para Bellum.

Барбарук Ліна Вікторівна – старший викладач кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, e-mail: barbaruk.angelina@gmail.com

Виноградов Володимир Володимирович – студент гр. КН-16бд кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: vinog330@snu.edu.ua

Ломакін Семен Олегович – студент гр. КН-16бд кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: pchelozkyk@gmail.com

Стаття подана 12.02.2020 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-17-23>

УДК 53.09

ОСОБЛИВОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ КВАЗІКОНСЕРВАТИВНИХ СИСТЕМ ПІД ДІЄЮ СТОХАСТИЧНИХ ЗБУРЕНЬ

Довгополий А.С., Збруцький О.В., Білобородов О.О.

FEATURES OF THE STUDY OF QUASICONSERVATIVE SYSTEMS UNDER THE ACTION OF STOCHASTIC PERTURBATIONS

Dovhopoly A.S., Zbrutsky O.V., Biloborodov O.O.

Розроблений підхід до досліджень багатомірних нелінійних квазіконсервативних систем під дією стохастичних збурень, у спектрі яких відсутні частоти, що співпадають з власними частотами. Підінтегральні функції рішень таких систем, у яких практично відсутні дисипативні сили (тертя), мають полюси, що визначаються власними частотами і лежать на дійсній осі комплексної змінної. У цих точках підінтегральна функція втрачає аналітичність. Невласні інтеграли від таких функцій мають обмежені величини лише в особливих випадках, які розглядаються у статті. На прикладі нелінійної системи диференціальних рівнянь руху чутливого елемента гірокомпасу отримані формули дисперсії вимушених коливань від лінійних стохастичних збурень та математичні очікування девації від нелінійної правої частини системи.

Ключові слова: стохастичне збурення, переважаюча частота, дисипативна система, квазіконсервативна система, невластний інтеграл, теорема Коші, чутливий елемент.

Вступ. Ряд прецизійних вимірювальних систем, наприклад сейсмографи, наземні високочотні гіроскопи з торсіонним підвісом, радіотехнічні системи та інші [1; 2] мають дисипативні сили (тертя), що наближені до нуля. Найменші короткочасні мікрозбурення корпусу приладу збуджують незатухаючі коливання чутливого елемента (ЧЕ) з власними частотами. Як наслідок, навіть слабкі збурення з частотами, що дорівнюють власним, викликають практично необмежені амплітуди вимушених коливань ЧЕ і втрату можливості (здатності) виконувати вимірювання. Саме виходячи з цього для умов експлуатації виробники приладів окремо оговорюють, що у спектрі збурень повинні бути відсутні частоти, що дорівнюють власним частотам вимірювальних приладів.

Постановка проблеми. Відсутність у спектрі вхідного збурюючого впливу частот, які співпадають з власними частотами коливальної системи дозволяє суттєво спростити дослідження поведінки

квазіконсервативних систем під дією стохастичних збурень. Априорна невизначеність характеру збурень призводить до необхідності дослідження стохастичного впливу з широким спектром з переважаючою частотою, що найбільш часто зустрічається у реальному житті і в практичних додатках. Рішення такого класу задач призводить до необхідності обчислення невластних інтегралів та становить певну проблему математичного характеру.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методологічні основи визначення реакції лінійної коливальної системи на гармонійний вплив представляють собою рішення лінійного диференціального рівняння другого порядку [3; 4]. Для визначення конкретного рішення таких рівнянь у деяких роботах [5] пропонується розглядати сумарний вплив окремих гармонік, що отримуються за результатами розкладу функції впливу у ряд Фур'є. У той же час, для загального виду випадкової функції впливу рішення не формалізовано.

Мета статті – дослідження багатомірних нелінійних квазіконсервативних систем під дією стохастичних збурень, у спектрі яких відсутні частоти, що співпадають з власними.

Результати досліджень. Для досліджень системи рівнянь консервативної системи запишемо як

$$\sum_{k=1}^n (a_{km} \ddot{q}_k + b_{km} \dot{q}_k + C_{km} q_k) = X_{km}(t) + F_{km}(t). \quad (1)$$

У системі (1) $X_{km}(t)$ – праві частини системи рівнянь, що обумовлені збуреннями, F_{km} – нелінійні члени типу

$$F_{km} = f(q \cdot X_{km}, \dot{q}_k \cdot q_{k+1}, \ddot{q}_{k+1} \cdot q_k, \dots). \quad (2)$$

Спектральну щільність збурень запишемо у вигляді [6]:

$$S_k(\omega) = \frac{2\sigma^2\mu}{\pi} \cdot \frac{\omega^4(\lambda^2 + \mu^2)}{[\omega^2 - \lambda^2 - \mu^2]^2 + 4\mu^2\lambda^2}, \quad (3)$$

де σ^2 , μ , λ – відповідно дисперсія, показник нерегулярності і переважаюча кругова частота збурень, ω – кругова частота збурень.

Дисперсію стохастичних збурень ЧЕ запишемо [7] як:

$$D[q_k] = \int_{-\infty}^{\infty} S_{q_k}(\omega) d\omega, \quad (4)$$

де

$$S_{q_k}(\omega) = |L_{q_k}(j\omega)|^2 S_k(\omega),$$

$L_{q_k}(j\omega)$ – передатна функція системи по координаті q_k по відношенню до вхідної функції $X_{km}(t)$.

При дослідженні математичних очікувань систематичних похибок приладів від нелінійних складових F_{km} будемо вважати, що збурення задані у вигляді спектральних розкладів [8]

$$\begin{aligned} \ddot{X}_{km}(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\omega t} d\Phi(\omega); \\ \ddot{X}_{k+1,m}(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\omega t} d\Phi^*(\omega), \end{aligned} \quad (5)$$

де $\Phi(\omega)$ – випадкові амплітуди збурень, $\Phi^*(\omega)$ – комплексно-спряжені з $\Phi(\omega)$ випадкові амплітуди збурень.

Крім того, будемо вважати, що математичні очікування $M[\ddot{X}_{km}(t)]$, $M[\ddot{X}_{k+1,m}(t)]$ дорівнює нулю. Внаслідок стаціонарності збурень, вирази (5) відповідають умовам [7]:

$$\begin{aligned} M[d\Phi(\omega)] &= 0, \\ M[d\Phi^*(\omega_1)d\Phi(\omega_2)] &= \\ &= \delta(\omega_2 - \omega_1) S_{\ddot{X}_k \ddot{X}_{k+1}}(\omega) d\omega_1 d\omega_2, \end{aligned} \quad (6)$$

де $\delta(\omega_1 - \omega_2)$ – дельта функція;

$S_{\ddot{X}_k \ddot{X}_{k+1}}$ – взаємна спектральна щільність збурень:
 $S_{\ddot{X}_k \ddot{X}_{k+1}}(\omega) = S_k(\omega)$.

Математичне очікування від нелінійних членів F_{km} має вигляд [9]:

$$\begin{aligned} M[F_{km}] &= f_k \left[\int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 W_{q_k}(j\omega) e^{j\omega t} \times \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\omega t} d\Phi(\omega), \right. \\ &\quad \left. \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 W_{q_k}(j\omega) e^{j\omega t} d\Phi(\omega) \times \int_{-\infty}^{\infty} W_{q_{k+1}} e^{j\omega t} d\Phi(\omega), \dots \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Таким чином, обчислення залежностей дисперсії та математичних очікувань похибок приладів зводяться до обчислення невластних інтегралів для конкретних приладів.

Далі дослідимо поведінку ЧЕ прецизійного сейсмографа та наземного маятникового гірокомпаса з торсіонним підвісом при дії на них стохастичних збурень.

1. Дослідження поведінки ЧЕ сейсмографа при стохастичних збуреннях.

Запишемо диференціальне рівняння ЧЕ сейсмографа під дією стохастичних збурень у вигляді:

$$\ddot{x} + 2d_0\dot{x} + \omega_0^2 x = X(t), \quad (8)$$

де d_0 – показник затухання;

ω_0 – кругова частота власних коливань ЧЕ;

$X(t)$ – стаціонарне стохастичне збурення.

Виходячи з виразів (3) та (4) запишемо дисперсію процесу, яке описується рівнянням (8):

$$D[x] = I(\omega), \quad (9)$$

де

$$\begin{aligned} I(\omega) &= \frac{2\sigma^2\mu}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4d_0^2\omega^2 \right]^{-1} \times \\ &\quad \times \frac{\omega^4(\mu^2 + \lambda^2)}{(\omega^2 - \mu^2 - \lambda^2)^2 + 4\mu^2\lambda^2} d\omega. \end{aligned}$$

Подальша задача зводиться до взяття невластного інтеграла $I(\omega)$. Відповідно до роботи [10] розглянемо замість $I(\omega)$ інтеграл $I(z)$ комплексної змінної $z = j\omega$. Інтегрування виконуємо по контуру, який складається з відрізка дійсної частини осі та півкола, який знаходиться у верхній півплощині комплексної змінної. Відрізок, довжина якого дорівнює двом радіусам R півкола, симетричний відносно початку координат.

Вважаємо, що всі полюси підінтегральної функції, які знаходяться у верхній півплощині комплексної змінної не виходять за межі півкола радіусу $R \rightarrow \infty$. Тоді

$$I(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f(z) dz, \quad (10)$$

де

$$f(z) = \frac{z^4}{\left[(z^2 - \omega_0^2)^2 + 4d_0^2 z^2 \right] \left[(z^2 - \mu^2 - \lambda^2)^2 + 4\mu^2\lambda^2 \right]}.$$

Запишемо полюси $f(z)$: $z_{1,2} = -jd_0 \pm \omega_0$; $z_{3,4} = jd_0 \pm \omega_0$; $z_{5,6} = j\mu \pm \lambda$; $z_{7,8} = -j\mu \pm \lambda$; $\omega_0^2 = \omega_0^2 - d_0^2$.

Полюси z_3, z_4, z_5, z_6 лежать у верхній півплощині комплексної змінної, тому скориставшись теоремою Коші про лишки [7] та після відповідних перетворень запишемо дисперсію $D_1[x]$ у вигляді:

$$D_1[x] = \sigma^2(\mu^2 + \lambda^2) \left(\frac{\mu}{d_0} A_1 + A_2 \right); \quad (11)$$

$$A_1 = \frac{N_1(\omega_1^2 - 3d_0^2) + 2d_0^2 L_1(3\omega_1^2 - d_0^2)}{\prod_{i=1}^2 (a_i^2 + 4b_i^2 \omega_1^2)};$$

$$A_2 = \frac{N_2(\lambda^2 - 3\mu^2) + 2\mu^2 L_2(3\lambda^2 - \mu^2)}{\prod_{i=3}^4 (a_i^2 + 4b_i^2 \lambda^2)};$$

$$N_1 = a_1 a_2 - 4b_1 b_2 \omega_1^2; \quad N_2 = a_3 a_4 - 4\lambda^2 b_3 b_4;$$

$$L_1 = b_1 a_2 + b_2 a_1; \quad L_2 = b_4 a_3 + b_3 a_4;$$

$$a_1 = \omega_1^2 - \lambda^2 - (d_0 - \mu)^2, \quad a_2 = \omega_1^2 - \lambda^2 - (d_0 + \mu)^2;$$

$$a_3 = \lambda^2 - \omega_1^2 - (d_0 + \mu)^2, \quad a_4 = \lambda^2 - \omega_1^2 - (d_0 - \mu)^2;$$

$$b_1 = d_0 - \mu, \quad b_2 = b_3 = d_0 + \mu, \quad b_4 = -b_0 + \mu.$$

Слід зазначити, що складова $D_1[x]$, що пропорційна μ/d_0 , найбільше проявляється при $\omega \rightarrow \omega_0$ та при $d_0 \rightarrow 0$.

Оскільки система (8) близька до консервативної, практичний інтерес становить випадок при $d_0 = 0$, а у спектрі частот збурень відсутня частота $\omega = \omega_0$. Вираз дисперсії рішення (8) запишемо у вигляді:

$$D_2[x] = \frac{2\sigma^2 \mu}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2} \times \frac{\omega^4 (\mu^2 + \lambda^2)}{(\omega^2 - \mu^2 - \lambda^2)^2 + 4\mu^2 \lambda^2} d\omega. \quad (12)$$

В області комплексної змінної z полюси підінтегральної функції $f(z)$ запишемо у вигляді: $z_{1,2} = \pm \omega_0$, $z_{3,4} = \pm \omega_0$, $z_{5,6} = -j\mu \pm \lambda$, $z_{7,8} = j\mu \pm \lambda$.

У даному випадку полюси z_1, z_2, z_3, z_4 лежать на дійсній осі комплексної площини, полюси z_5, z_6 лежать у нижній півплощині, а полюси z_7, z_8 лежать у верхній півплощині. Слід відмітити, що перші 4 полюси – другого порядку. У точках $z_1, \dots, z_4$ підінтегральна функція втрачає аналітичність, точки $z_{1,2,3,4} = \pm \omega_0$ є ізольованими особливи-

ми точками, оскільки є таке дійсне число $\Delta\omega > 0$, що $0 < |z_{1,2,3,4} - \pm \omega_0| < \Delta\omega$, а поблизу точок $z_1 \dots z_4$ підінтегральна функція аналітична. Тому, вибираючи контур інтегрування так, щоб $R \rightarrow \infty$, а радіуси, які ізолюють особливі точки, $r_1 \rightarrow 0, \dots, r_4 \rightarrow 0$, отримуємо обмежене значення інтегралу $I(z)$ на всьому контурі інтегрування, за виключенням самих точок $z = \pm \omega_0$.

Виключення з контуру інтегрування особливих точок еквівалентно виключенню зі спектру збурень частоти, яка співпадає з власною частотою коливань ЧЕ.

Скориставшись ще раз теоремою Коші про лишки, запишемо вираз для дисперсії:

$$D_1[x] = \sigma^2(\mu^2 + \lambda^2) \times \frac{N_0(\lambda^2 - 3\mu^2) + 2\mu L_0(3\lambda^2 + \mu^2)}{(a^2 + 4\mu^2 \lambda^2)^2}, \quad (13)$$

$$\text{де } N_0 = a^2 - 4\mu^2 \lambda^2;$$

$$L_0 = 2\mu a;$$

$$a = \lambda^2 - \mu^2 - \omega_0^2.$$

Для фізичної інтерпретації отриманих результатів розглянемо випадок, коли за рахунок зменшення показника нерегулярності збурень $\mu = 0$ перейдемо до розгляду регулярних збурень. У результаті перетворень формули (11) та (13) при $\mu = 0$, $d_0 \neq 0$ запишемо у вигляді:

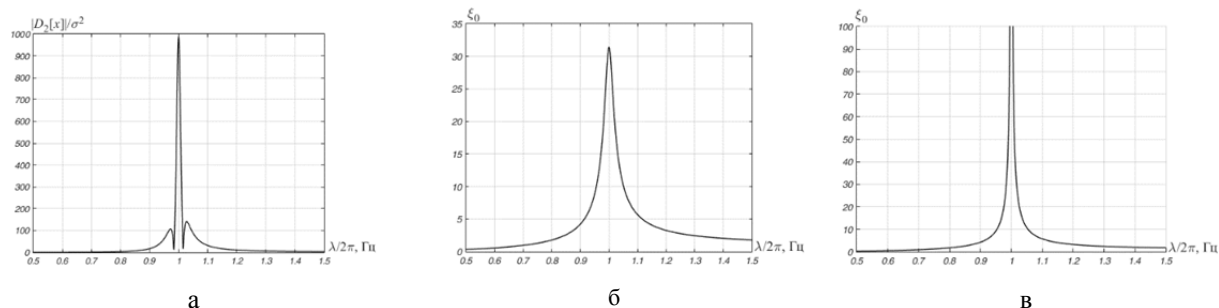
$$A_0 = \sqrt{D_1[x]} = \frac{\xi_0 \lambda^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \lambda^2)^2 + 4d_0^2 \lambda^2}}, \quad (14)$$

а при $d_0 = 0$:

$$A_0 = \sqrt{D_2[x]} = \frac{\xi_0 \lambda^2}{\omega_0^2 - \lambda^2},$$

де $\xi_0 = \sqrt{\sigma^2}$ – амплітуда періодичних збурень.

Надамо фізичну інтерпретацію отриманих результатів. Врахування тертя у системі ($d_0 \neq 0$) дозволяє дослідити вплив збурень з безперервним частотним діапазоном на поведінку системи (1), (8), у тому числі і при $\omega = \omega_0$, про що свідчить і випадок регулярних гармонічних збурень. Тертя і коефіцієнт нерегулярності μ дає зменшення дисперсії (11) при $\omega \rightarrow \omega_0$ та $\omega = \omega_0$. Якщо тертя відсутнє ($d_0 = 0$), формула (13) дозволяє вивчати дисперсію вимушених коливань ЧЕ під дією стохастичних збурень та амплітуду від дії гармонічних збурень у безперервному частотному діапазоні при частотах збурень ω , як завгодно близьких до частоти ω_0 за виключенням точки $\omega = \omega_0$ (рис. 1).

Рис. 1. Вигляд спектральної густини функції впливу для $\omega_0 = 2\pi = 1$ Гц:а – $d_0 = 0$, $\mu = 0,1$; б – $d_1 \neq 0$, $\mu = 0$ в – $d_1 = 0$, $\mu = 0$

Виходячи з цього, для спрощення досліджень багаточастотних квазіконсервативних систем дисипативні сили можна не враховувати.

2. Дослідження випадкових та систематичних похибок ЧЕ маятникового прецизійного ГК від стохастичних збурень.

Принцип дії наземного ГК з торсіонним підвісом полягає у взаємодії гіроскопічного моменту ЧЕ та горизонтальної проекції кутової швидкості обертання Землі з маятниковим моментом ЧЕ. ЧЕ наземного гірокомпаса коливається відносно площини меридіану практично без затухань. Середня лінія між максимальними відхиленнями ЧЕ та вертикаль місця вказують на площину меридіану (на Північ) з високою точністю.

Мікрозбурення корпусу гірокомпаса у горизонтальній площині викликають випадкові та систематичні похибки визначення площини меридіану, які залежать від параметрів збурень [10].

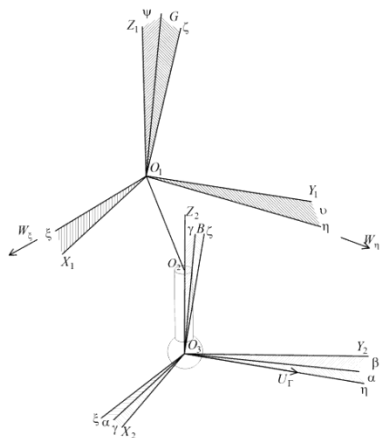


Рис. 2. Системи координат та кути відхилення чутливого елемента

Математичну модель збуреного руху ЧЕ гірокомпаса запозичимо з роботи [2]. Для чого на рис. 2 покажемо основні кути відхилення ЧЕ від горизонту та відхилення осі обертання гіроскопу від площини меридіану.

Системи координат $O_1\xi\eta\zeta$ та $O_2\xi^*\eta^*\zeta^*$ паралельні географічній системі координат, осі $O_1\xi$ та

$O_2\xi^*$ вказують на Схід, $O_1\eta$ та $O_2\eta^*$ – на Північ, $O_1\zeta$ та $O_2\zeta^*$ – співпадають з вертикаллю місця. Кути α відхилення ЧЕ (осі кінетичного моменту) від меридіану (Півночі), β – кут підняття осі кінетичного моменту гіроскопу. Кути ν та ψ показують відхилення лінії O_1O_2 (торсіону) від вертикалі місця.

Система диференціальних рівнянь руху ЧЕ під дією стохастичних збурень, як і в роботі [2] запишемо у вигляді:

$$\begin{cases} \theta_z \ddot{\alpha} + H\dot{\beta} + HU_{\Gamma}\alpha = m_{\alpha}^I + m_{\alpha}^{II}, \\ \theta_x^* \ddot{\beta} - H\dot{\alpha} + Mr_1 r_2 \ddot{\nu} + Mgr_2 \beta = m_{\beta}^I + m_{\beta}^{II}, \\ Mr_1^2 \ddot{\nu} + Mr_1 r_2 \ddot{\beta} + Mgr_1 \nu = m_{\nu}^I + m_{\nu}^{II}, \\ \theta_y^* \ddot{\gamma} + Mr_1 r_2 \ddot{\psi} + Mgr_2 \gamma = m_{\gamma}^I + m_{\gamma}^{II}, \\ Mr_1^2 \ddot{\psi} + Mr_1 r_2 \ddot{\gamma} + Mgr_1 \psi = m_{\psi}^I + m_{\psi}^{II}, \end{cases} \quad (15)$$

де $\theta_x^* = \theta_x + Mr_2^2$; $\theta_y^* = \theta_y + Mr_2^2$; θ_x , θ_y , θ_z – моменти інерції навколо відповідних осей; M – маса ЧЕ; r_1 – довжина торсіону; r_2 – відстань від точки підвісу до центру ваги ЧЕ; H – кінетичний момент гіроскопу; U_{Γ} – горизонтальна проекція вектору кутової швидкості обертання Землі. $m_{\alpha}^I = 0$, $m_{\alpha}^{II} = -Mr_2(W_{\xi} - r_1 \ddot{\psi})\beta - Mr_2(W_{\eta} + r_1 \ddot{\nu})\gamma$, $m_{\beta}^I = -Mr_2 W_{\eta}$, $m_{\nu}^I = -Mr_1 W_{\eta}$, $m_{\gamma}^I = Mr_2 W_{\xi}$, $m_{\psi}^I = Mr_1 W_{\xi}$; W_{ξ} , W_{η} – прискорення збурень точки торсіонного підвісу O_1 ; g – прискорення сил земного тяжіння; а m_{β}^{II} , m_{ν}^{II} , m_{γ}^{II} , m_{ψ}^{II} – не впливають на похибки гірокомпаса.

У роботі [2] показано, що власні частоти коливань визначаються виразами:

$$\omega_1^2 \approx \frac{Mgr_2}{HU_{\Gamma}}; \quad \omega_2^2 \approx \frac{g}{r_1}; \quad \omega_3^2 \approx \frac{H^2}{\theta_z \theta_x},$$

при $\omega_1 \ll \omega_2 \ll \omega_3$;

$$\omega_{4,2}^2 = \frac{1}{2\theta_y M r_1^2} \left[M g r_1 (\theta_y^* + M r_1 r_2) \pm \sqrt{[M g r_1 (\theta_y^* + M r_1 r_2)]^2 - 4(M g)^2 r_1 r_2 M r_1^2 \theta_y} \right] \quad (16)$$

Валідною координатою, за якою вимірюють та обчислюють площину меридіану є координата α . Стохастичні збурення W_ξ , W_η викликають завади у вихідному сигналі у вигляді дисперсії $D[\alpha]$ та так звану інтеркардинальну девіацію, у нашому випадку математичне очікування від нелінійної функції m_α'' (постійну похибку).

Виходячи з лінійної частини системи рівнянь (15), аналогічно виразу (4), запишемо вираз дисперсії вимушених коливань ЧЕ по координаті α , попередньо з нульовими початковими умовами:

$$D[\alpha] = \int_{-\infty}^{\infty} |L_\alpha(i\omega)|^2 \cdot S_\xi(\omega) d\omega, \quad (17)$$

де

$$L_\alpha(i\omega) = -\frac{H M^2 g r_1 r_2}{\Delta_1(\omega)} (j\omega)^3;$$

$S_\xi(\omega)$ – спектральна характеристика збурень (3);

$\Delta_1(\omega)$ – визначник перших трьох рівнянь системи (15).

Після перетворень дисперсію (16) представимо як:

$$D[\alpha] = \left(\frac{M g r_2}{H} \cdot \frac{\omega_3^2}{r_1} \right)^2 \frac{2\sigma^2 \mu (\mu^2 + \lambda^2)}{\pi} I_1(\omega), \quad (18)$$

де

$$I_1(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega^6}{\prod_{k=1}^3 (\omega_k^2 - \omega^2)^2} \cdot \frac{d\omega}{(\omega^2 - \mu^2 - \lambda^2)^2 + 4\mu^2 \lambda^2}.$$

Подальша задача обчислення невластного інтегралу, як і раніше (12), (13), зводиться до розгляду інтегралу $I(z)$ комплексної змінної $z = j\omega + \omega$

$$I_1(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(z) dz, \quad (19)$$

де

$$f_1(z) = \frac{\omega^6}{\prod_{k=1}^3 (\omega_k^2 - \omega^2)^2} \cdot \frac{1}{(\omega^2 - \mu^2 - \lambda^2)^2 + 4\mu^2 \lambda^2}.$$

Запишемо полюси $f_1(z)$ у вигляді: $z_{1,2} = \pm \omega_1$, $z_{3,4} = \pm \omega_2$, $z_{5,6} = \pm \omega_3$, $z_{7,8} = j\mu \pm \lambda$, $z_{9,10} = -j\mu \pm \lambda$.

Враховуючи всі зауваження щодо ізольованих точок при отриманні виразу (3), а також належність полюсів $z_{7,8}$ верхній півплощині комплексної змінної, використаємо теорему Коші. Після необхідних перетворень вираз для дисперсії буде мати вигляд:

$$D[\alpha] = \sigma^2 (\mu^2 + \lambda^2) \left(\frac{M g r_2}{H} \cdot \frac{\omega_3^2}{r_1} \right)^2 \times \frac{\Delta_0 G_0 + 2\mu S_0 \Gamma_0}{\lambda \prod_{i=1}^3 (a_i^2 + 4\mu^2 \lambda^2)^2}, \quad (20)$$

де

$$\Delta_0 = N_0^2 - 4\lambda^2 T_0, \quad \Gamma_0 = 2N_0 T_0,$$

$$G_0 = \lambda(\lambda^4 - 5\mu^4 - 10\mu^2 \lambda^2), \quad S_0 = \mu^4 + 5\lambda^4 - 10\mu^2 \lambda^2,$$

$$N_0 = a_1 a_2 a_3 - 4\mu^2 \lambda^2 (a_1 + a_2 + a_3),$$

$$T_0 = \mu(a_1 a_2 + a_1 a_3 + a_2 a_3 - 4\mu^2 \lambda^2),$$

$$a_i = \lambda^2 - \mu^2 - \omega_i^2.$$

Дисперсія коливань ЧЕ по координаті α , що обумовлена північною складовою збурень W_ξ , буде викликати випадкові похибки визначення площини меридіану.

Перейдемо до розгляду математичного очікування інтеркардинальної девіації, що зумовлена нелінійними членами функції m_α'' . Для рішення системи (15) скористаємося методом розділення змінних [9]. Рішення шукаємо у вигляді суми швидких $\tilde{q}$ та повільних q^o складових змінної:

$$q_i = q_i^o + \tilde{q}_i. \quad (21)$$

Частота швидких рухів $\tilde{q}_i$ співпадає з частотою збурень. Будемо вважати, що збурення задані спектральними розкладами (5), математичні очікування $M[W_\xi]$, $M[W_\eta]$ дорівнюють нулю. У силу стаціонарності збурень, вирази (5) відповідають умовам (6). Взаємну спектральну густину збурень запишемо у вигляді (3).

Використавши вираз математичного очікування (7), отримуємо формулу математичного очікування інтеркардинальної девіації маятникового ГК з торсіонним підвісом у вигляді:

$$M[\alpha_0] = \sigma^2 \mu (\mu^2 + \lambda^2) \frac{(M g r_2)^2 \omega_3^2}{\pi r_1^2 \theta_y H U_\Gamma} I_2(\omega), \quad (22)$$

де

$$I_2(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega^6}{\prod_{i=1}^5 (\omega_i^2 - \omega^2)^2} \cdot \frac{d\omega}{(\omega^2 - \mu^2 - \lambda^2)^2 + 4\mu^2 \lambda^2}.$$

Як і у випадку обчислення дисперсії (18), розглянемо замість $I_2(\omega)$ інтеграл $I(z)$ комплексної змінної $z = jy + \omega$:

$$I_2(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f_2(z) dz, \quad (23)$$

де

$$f_2(z) = \frac{z^6}{\prod_{i=1}^5 (z_i^2 - z^2)} \cdot \frac{1}{(z^2 - \mu^2 - \lambda^2)^2 + 4\mu^2\lambda^2}.$$

Як і раніше, при обчисленні $I_1(z)$ у (19), враховуємо всі зауваження щодо ізольованих точок, а також належність полюсів $z_{11,12}$ верхній півплощині комплексної змінної. Після застосування теореми Коші, після необхідних перетворень, вираз для математичного очікування інтеркардинальної девіації буде мати вигляд:

$$M[\alpha_0] = \sigma^2 (\mu^2 + \lambda^2) \frac{(Mgr_2)^2 \omega_3^2}{2HU_{\Gamma} \theta_y r_1^2} \times \frac{\Delta_1 G_1 + \Gamma_1 S_1}{\prod_{i=1}^5 (a_i^2 + 4\mu^2\lambda^2)}, \quad (24)$$

де

$$\Delta_1 = a_5 (N_1 N_2 - 4\mu^2\lambda^2 T_1 T_2) - 4\mu^2\lambda^2 (N_1 T_2 + N_2 T_1);$$

$$\Gamma_1 = 2\mu\lambda (N_1 N_2 - 4\mu^2\lambda^2 T_1 T_2) + a_5 (N_1 T_2 + N_2 T_1);$$

$$N_1 = a_1 a_2 - 4\mu^2\lambda^2; \quad N_2 = a_3 a_4 - 4\mu^2\lambda^2;$$

$$T_1 = a_1 + a_2; \quad T_2 = a_3 + a_4;$$

$$G_1 = \lambda^2 - 10\mu^2\lambda^2 + 5\mu^4; \quad S_1 = \mu(5\lambda^4 - 10\mu^2\lambda^2 + \mu^4);$$

$$a_i = \lambda^2 - \mu^2 - \omega_i^2.$$

Для переходу до випадку регулярних збурень, аналогічно отриманню виразу (14), будемо вважати, що коефіцієнт нерегулярності стохастичних збурень $\mu = 0$. Тоді з (20) отримаємо вираз вимушених коливань ЧЕ гірокомпаса під дією гармонійних збурень у вигляді:

$$A_{\alpha} = \sqrt{D[\alpha]} = \frac{Mgr_2}{H} \cdot \frac{\omega_3^2}{r_1} \cdot \frac{\sigma\lambda^2}{\prod_{i=1}^3 (\lambda^2 - \omega_i^2)}, \quad (25)$$

Середнє значення інтеркардинальної девіації гірокомпаса від гармонійних збурень отримаємо з (24) при $\mu = 0$:

$$\langle \alpha_0 \rangle = \frac{\sigma^2}{HU_{\Gamma}} \cdot \frac{(Mgr_2)^2}{2\theta_y r_1^2} \cdot \frac{\omega_3^2 \lambda^6}{\prod_{i=1}^5 (\omega_i^2 - \lambda^2)}. \quad (26)$$

У виразах (25), (26) σ – означає амплітуду збурень на частоті λ .

Вирази (25), (26) співпадають з відомими, що отримані у роботі [2], тому отримані результати (20) та (24) можна використовувати як для досліджень впливу на консервативну коливальну систему стохастичних збурень, так і для досліджень збурень від стаціонарних гармонійних коливань.

Висновки. У роботі розроблений підхід до досліджень багатомірних нелінійних квазіконсервативних систем під дією стохастичних збурень, у спектрі яких відсутні частоти, що співпадають з власними частотами.

Специфіка досліджень полягала у тому, що підінтегральні функції рішень таких систем, у яких практично відсутні дисипативні сили (тертя), мають полюси, що визначаються власними частотами і лежать на дійсній осі комплексної змінної, так звані особливі точки. У цих точках підінтегральна функція втрачає аналітичність. Невласні інтеграли від таких функцій мають обмежені величини тільки у тому випадку, коли контур обирається таким чином, щоб радіуси, які ізолюють особливі точки, наближалися до нуля. Тоді значення невластного інтегралу має обмежені величини на всьому контурі інтегрування за виключенням самих особливих точок (що еквівалентно виключенню зі спектру збурень частот, що співпадають з власною частотою коливань системи).

На прикладі нелінійної системи п'яти диференціальних рівнянь руху ЧЕ ГК отримані формули дисперсії вимушених коливань ЧЕ від лінійних стохастичних збурень та математичні очікування девіації від нелінійної правої частини системи. При дослідженні виходили з того, що у системі відсутні дисипативні сили, а у спектрі збурень відсутні частоти, що дорівнюють власним частотам.

Література

1. Гик, Л. Д. Контроль параметров сейсмоприемников без нарушения их механической связи с исследуемым объектом [Текст] // Автометрия, 2000. – № 2. – С. 91-103.
2. Гірокомпаси для навігації та наведення: монографія / О. В. Збруцький, А. С. Довгополий, О. І. Нестеренко, В. М. Григор'єв // К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во "Політехніка", 2017. – 200 с.
3. Камке, Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям [Текст] / Э. Камке; пер. с нем. – 4-е изд., испр. // М. : Наука: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1971. – 576 с.
4. Зайцев, В. Ф. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям [Текст] / В. Ф. Зайцев, А. Д. Полянин // М. : Физматлит, 2001. – 576 с.
5. Гавриков, А. В. Механические колебания. Учебно-методическое пособие [Текст] / А. В. Гавриков, Н. А. Ворона // М. : МФТИ, 2011. – 36 с.
6. Свешников, А. А. Вероятностные методы в прикладной теории гироскопов [Текст] / А. А. Свешников, С. С. Ривкин // М. : Наука. 1974. – 536 с.
7. Свешников, А. Г. Теория функций комплексной переменной [Текст] / А. Г. Свешников, А. Н. Тихонов; 3-е изд. // М.: Наука, 1974. – 319 с.

8. Диментберг, М. Ф. Нелинейные стохастические задачи механических колебаний [Текст] // М. : Наука, 1980. – 368 с.
9. Боголюбов, Н. Н. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний [Текст] / Н. Н. Боголюбов, Ю. А. Митропольский // М. : Гос. изд-во физико-мат. лит., 1958. – 408 с.
10. Dovgopoly, A. S. Theory of Precision Gyrocompasses with Digital Information Processing / A. S. Dovgopoly, V. I. Busanov // Symposium Giro Technology. – Stuttgart, Germany, 1991. – pp. 3.0-3.24.

References

1. Gik, L. D. Kontrol parametrov sejsmopriemnikov bez narusheniya ikh mekhanicheskoy svyazi s issleduemym obektom [Text] // Avtometriya, 2000. – № 2. – pp. 91-103.
2. Hirokompasy dlia navihatsii ta navedennia: monohrafiia / O. V. Zbrutsky, A. S. Dovhopoly, O. I. Nesterenko, V. M. Hryhoriev // K. : KPI im. Ihoria Sikorskoho, Vyd-vo "Politekhnik", 2017. – 200 p.
3. Kamke, E. Spravochnik po obyknovennym differentsialnym uravneniyam [Text] / E. Kamke; per. s nem. – 4-e izd., ispr. // M. : Nauka: Gl. red. fiz.-mat. lit., 1971. – 576 p.
4. Zaytsev, V. F. Spravochnik po obyknovennym differentsialnym uravneniyam [Text] / V. F. Zaytsev, A. D. Polyagin // M. : Fizmatlit, 2001. – 576 p.
5. Gavrikov, A. V. Mehanicheskie kolebaniya. Uchebno-metodicheskoe posobie [Text] / A. V. Gavrikov, N. A. Vorona // M. : MFTI, 2011. – 36 p.
6. Sveshnikov, A. A. Veroyatnostnyie metodyi v prikladnoy teorii giroskopov [Text] / A. A. Sveshnikov, S. S. Rivkin // M. : Nauka, 1974. – 536 p.
7. Sveshnikov, A. G. Teoriya funktsiy kompleksnoy peremennoy [Text] / A. G. Sveshnikov, A.N. Tihonov; 3-e izd. // M.: Nauka, 1974. – 319 p.
8. Dimentberg, M. F. Nelineynyie stohasticheskie zadachi mehanicheskikh kolebaniy [Text] // M. : Nauka, 1980. – 368 p.
9. Bogolyubov, N. N. Asimptoticheskie metodyi v teorii nelineynykh kolebaniy [Text] / N. N. Bogolyubov, Yu. A. Mitropolskiy // M. : Gos. izd-vo fiziko-mat. lit., 1958. – 408 p.
10. Dovgopoly, A. S. Theory of Precision Gyrocompasses with Digital Information Processing / A. S. Dovgopoly, V. I. Busanov // Symposium Giro Technology. – Stuttgart, Germany, 1991. – pp. 3.0-3.24.

Довгополь А.С., Збруцкий А. В., Белобородов О.А. Особенности исследования квазиконсервативных систем под действием стохастических возмущений.

Разработан подход к исследованиям многомерных нелинейных квазиконсервативных систем под действием стохастических возмущений, в спектре которых отсутствуют частоты, совпадающие с собственными частотами. Подынтегральные функции решений таких систем, в которых практически отсутствуют диссипативные силы (трение), имеют полюса, определяющиеся собственными частотами и лежащие на действительной оси комплексной переменной. В этих точках подынтегральная функция теряет аналитичность. Несобственные интегралы от таких функций имеют ограниченные величины только в особых случаях, которые рассматри-

ваются в статье. На примере нелинейной системы дифференциальных уравнений движения чувствительного элемента гироскопаса получены формулы дисперсии вынужденных колебаний от линейных стохастических возмущений и математические ожидания девиации от нелинейной правой части системы.

Ключевые слова: *стохастическое возмущение, преобладающая частота, диссипативная система, квазиконсервативная система, несобственный интеграл, теорема Коши, чувствительный элемент.*

Dovhopoly A.S., Zbrutsky O.V., Biloborodov O.O. Features of the study of quasiconservative systems under the action of stochastic perturbations.

A number of precision measuring systems, for example, seismographs, ground-based high-precision gyroscopes with torsion suspension, radio engineering systems and others have dissipative forces (friction) close to zero. Small short-term perturbations of the device body excite undamped oscillations of the sensitive element with natural frequencies. As a result, even weak perturbations with frequencies equal to their own cause practically unlimited amplitudes of forced oscillations and the loss of ability (ability) to take measurements. The article has developed an approach to the study of multidimensional nonlinear quasiconservative systems under the influence of stochastic disturbances, in the spectrum of which there are no frequencies coinciding with the natural frequencies. The differential equation of a sensitive element under the influence of stochastic disturbances is studied, which is specified in the form of a dispersion with a predominant frequency. Then the transfer function is taken and the need arises for solving the improper integral. The integrands of the solutions of such systems in which there are practically no dissipative forces (friction) have poles determined by natural frequencies and lying on the real axis of the complex variable. At these points, the integrand loses analyticity. The improper integrals of such functions have limited values only in special cases, which are considered in the article. In the process of solving, the Cauchy conditions are checked and the method of deductions is used. The exclusion of frequencies equal to the eigenvalues is carried out by eliminating these frequencies from the integration loop. A study was made of the errors of the sensitive element of accurate gyroscopes depending on the parameters of stochastic disturbances. Using an example of a nonlinear system of differential equations of motion of a gyrocompass sensitive element, formulas for the dispersion of forced oscillations from linear stochastic disturbances and mathematical expectations of deviation from the nonlinear right-hand side of the system are obtained.

Keywords: *stochastic perturbation, predominant frequency, dissipative system, quasiconservative system, improper integral, Cauchy theorem, sensitive element.*

Довгополь Анатолій Степанович – д.т.н., професор, головний науковий співробітник військової частини А4566

Збруцький Олександр Васильович – д.т.н., професор, декан факультету авіаційних і космічних систем Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

Білобородов Олег Олександрович – к.т.н., докторант військової частини А4566, e-mail: 22bredly@gmail.com

Стаття подана 21.02.2020 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-24-28>

УДК 629.4.015:656.2.08

ОЦІНКА ЗАСОБАМИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ БЕЗПЕКИ РУХУ ВАГОНІВ-ПЛАТФОРМ

Дьомін Ю.В., Дьомін Р.Ю., Черняк Г.Ю.

EVALUATION BY MEANS OF COMPUTER SIMULATION OF THE DYNAMIC INDICATORS OF TRAFFIC SAFETY OF FLAT CARS

Domin Yu.V., Domin R.Yu., Cherniak G.Yu.

В статті представлено загальну характеристику комп'ютерної моделі динаміки руху вантажного вагона на візках моделі 18-100, яку застосовано для оцінки стійкості від сходження з рейок вагона-платформи універсального типу. Розглянуто розрахункові варіанти, що відповідають технічному стану механічних частин як за проектом, так і з урахуванням змін, які отримуються в процесі експлуатації. З аналізу результатів комп'ютерного моделювання встановлено розбіжності оцінок безпеки руху за рамними силами і коефіцієнтами запасу стійкості колісної пари від сходження з рейок. Доведено необхідність уточнення умов стійкості рухомого складу в рейковій колії оцінкою можливостей розвантаження колісних пар у резонансних режимах руху.

Ключові слова: універсальна вагон-платформа, комп'ютерне моделювання, показники безпеки руху.

Вступ. Як відомо, більшість транспортних подій на залізницях пов'язана з випадками сходжень з рейок вантажних вагонів. При цьому значна частина сходжень викликана незадовільною динамікою як поїзда в цілому, так і окремих вагонів. Внаслідок комбінованої дії значної кількості чинників, що призводять до сходження вагонів з рейок, за результатами їх розслідування не завжди вдається виявити й пояснити провідні причини сходу.

Разом з тим, залучення сучасного наукового інструментарію, застосовуваному в галузі динаміки рухомого складу, дозволяє аналізувати процеси, що призвели до сходження рухомого складу з рейок [1 - 4]. До таких засобів аналізу належать технології комп'ютерного експерименту з використанням моделей динаміки рейкових екіпажів [5].

Досвід численних досліджень з безпеки руху, поїздів, показує, що можливості, які надаються засобами моделювання, дозволяють користувачам максимально оперативно і з високим ступенем досто-

вірності аналізувати проблеми, що виникають на практиці [6].

З аналізу результатів попередніх досліджень актуальних проблем забезпечення безпеки технічної експлуатації рухомого складу впливає завдання подальшого розвитку методів оцінки умов стійкості від сходжень з рейок вантажних вагонів шляхом залучення сучасних засобів оцінки динамічних безпечного функціонування технічних систем.

Мета статті полягає у прогнозуванні за результатами дослідження засобами комп'ютерного моделювання динаміки рухомого складу порушень умов стійкості вантажних вагонів від сходження з рейок.

Виклад основного матеріалу дослідження. За результатами чисельних досліджень і розслідувань транспортних подій виходить, що об'єктами аварійних ситуацій все частіше стають вантажні вагони у порожньому стані [7]. Найбільш схильними до втрати стійкості в рейковій колії є порожні вагони з високим центром мас (вагони бункерного типу, вагони-цистерни, тощо). Разом з тим, останнім часом відмічаються випадки сходження з рейок порожніх вагонів-платформ.

У цьому дослідженні оцінено умови стійкості від сходження з рейок вантажних вагонів на прикладі найбільш поширеної у вагонному парку універсальної чотирирівнісної платформи моделі 13-4012. При цьому поряд з вихідним варіантом, що за параметрами механічних частин відповідає технічній документації, розглянуто варіанти технічного стану, які мали місце у випадку сходження з рейок однієї з платформ цього типу.

Для дослідження динамічних показників і оцінювання ризиків сходження з рейок платформи використано імітаційну модель динаміки її руху. Ця модель побудована на базі підходу системи багатьох

тіл, за яким механічна система представляється набором твердих тіл, зв'язаних за допомогою шарнірних і силових елементів. Розробку комп'ютерної моделі виконано в програмному комплексі UM [5].

Твердотільна модель динаміки платформи, як і будь-якого вантажного вагона на візках моделі 18-100, включає 19 твердих тіл: кузов, 2 надресорні балки, 4 бокові рами візків, 8 клинів, 4 колісні пари. Ця модель має 114 ступенів вільності, містить 100 силових елементів: 12 узагальнених пружних, 86 контактних і 2 спеціальних силових елементів.

Структурне представлення моделі засноване на використанні методу підсистем з деревом підсистем, як це показано на рис. 1.

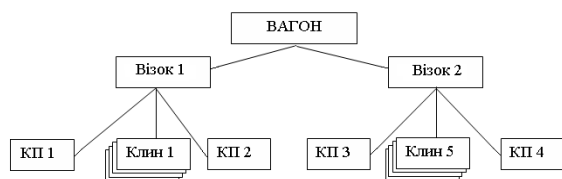


Рис. 1. Структура підсистем моделі

Підсистема «Візок» утворена двома включеними підсистемами «Колісна пара» (КП), чотирма підсистемами «Клин», надресорною балкою, двома боковими рамами, чотирма підклиновими пружинами, двома комплектами пружин ресорного підвішування. Фрикційні клинові гасителі представлено в якості окремих тіл, які володіють шістьма степенями вільності кожне та перебувають в контактній взаємодії з боковими рамами й надресорними балками. Розроблена модель динаміки платформи відбиває основні конструктивні особливості механічної частини вантажного вагона.

При розробці імітаційної моделі передбачено можливість відображення технічного стану платформи як такого, що відповідає проєктній документації, так і фактичного технічного стану досліджуваного об'єкту. Для завдання технічного стану платформи в загальну динамічну модель включено 10 ознак, за якими визначаються: маса кузова; інерційні параметри колісної пари; профілі поверхонь кочення і радіуси коліс; завищення/заниження клинів; висоти пружин ресорного підвішування; зазори в буксових проїмах у поздовжньому і поперечному напрямках; зазори між ковзунами кузова й візка; діаметри п'ятників і підп'ятників. Графічний вигляд цієї моделі показано на рис. 2.

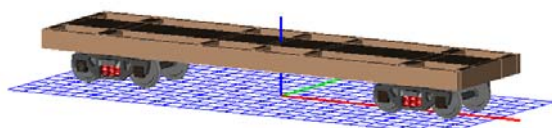


Рис. 2. Графічний вигляд моделі динаміки руху платформи моделі 13-4012

Для оцінки умов безпеки руху та ходових якостей вагонів колії 1520 мм прийнято систему показників, які визначаються за розрахунковими та експериментальними методами [8]. Відповідно до нормативних вимог визначені розрахункові значення наступних динамічних показників безпеки руху вантажних вагонів: вертикальних $\ddot{z}_k$ та горизонтальних поперечних $\ddot{y}_k$ прискорень кузова в шворневому перерізі над першим візком; рамних сил в долях статичного навантаження колісної пари на рейки H_r ; коефіцієнтів запасу стійкості колісної пари від сходження з рейок за умови вкочування гребеня колеса на голівку рейки kz_n .

Підтвердження адекватності розробленої моделі динаміки платформи здійснено шляхом порівняння результатів моделювання з експериментальними даними на підставі аналізу вертикальних і горизонтальних прискорень кузова, отриманих при випробуваннях дослідної платформи. Оцінки середньоквадратичних відхилень прискорень кузова платформи у вертикальному й горизонтальному поперечному напрямках приведено на рис. 3 і 4 (експериментальні дані представлено кривими 1 червоного кольору, розрахункові показники – синього). Порівняння оцінюваних показників отриманих за результатами моделювання й експериментально свідчить про адекватність розробленої моделі динаміки платформи, що надає підстави для достовірності подальшої оцінки динамічних показників платформи.

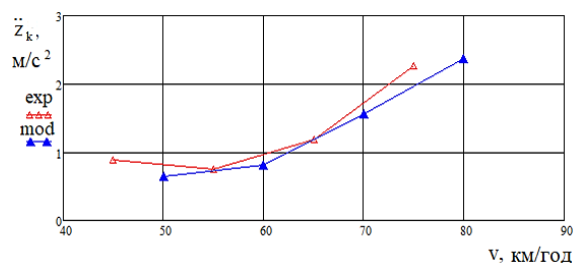


Рис. 3. Середньоквадратичні відхилення прискорень кузова платформи у вертикальному напрямку

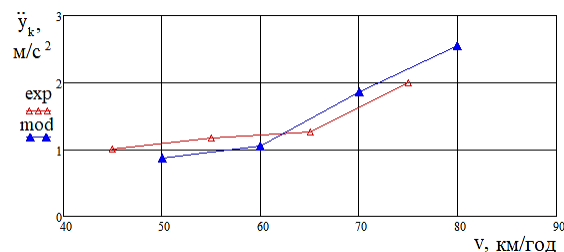


Рис. 4. Середньоквадратичні відхилення прискорень кузова платформи в горизонтальному поперечному напрямку

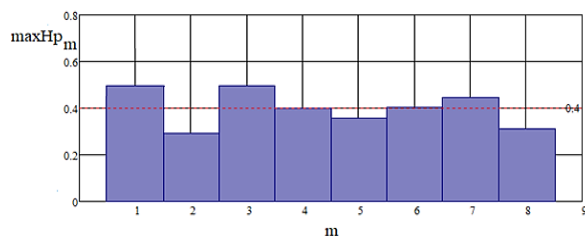
За планом обчислювального експерименту розглянуто 8 розрахункових варіантів, зміст яких представлено в табл. Слід зазначити, що, крім 8-го варіанту, стан колії відповідав фактично

встановленому на ділянці сходження. Розрахунки виконано при швидкості руху 68 км/год.

Таблиця

Розрахункові варіанти	
Варіант	Зміст варіанта
1	Вихідні параметри платформи, що відповідають технічній документації
2	Інерційні параметри зменшені до реальних значень
3	Геометричні характеристики поверхонь кочення та радіуси коліс з урахуванням зносів
4	Фактичне положення клинів в ресорному підвішуванні
5	Фактичні зноси в буксових напрямних
6	Фактичні величини зазорів між ковзунами візків і кузова
7	Параметри платформи, визначені за фактичними значеннями,
8	Параметри платформи такі самі, як за варіантом 7, але покращено стан колії.

На рис. 5 представлено максимальні рамні сили $\max H_{r_m}$ (m – номер варіанта) в долях статичного навантаження колісної пари на рейки, розраховані для кожного з розглянутих варіантів. За нормативними вимогами гранично допустимий рівень рамних сил для порожніх вантажних вагонів становить 0,4.

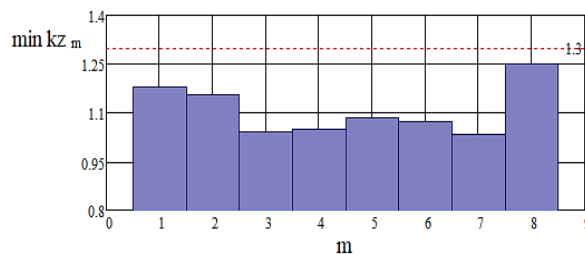
Рис. 5. Максимальні рамні сили $\max H_{r_m}$

З отриманих результатів видно, що для платформи, яка перебуває в номінальному стані (варіант 1), і у випадку зносу коліс (варіант 3) максимальні рамні сили $\max H_{r_l}$ в долях статичного навантаження досягають значення 0,5, що перевищує допустимий рівень цього показника в 1,25 рази. Найменший рівень рамних сил отримано для варіантів 2 та 8, що обумовлено в першому випадку зменшенням маси кузова, а в другому випадку зменшенням нерівностей колії, тобто покращенням стану колії.

Мінімальні значення коефіцієнтів запасу стійкості колісної пари $\min k_{z_m}$ від сходження з рейок за умови вкочування гребеня колеса на голівку рейки наведені на рис. 6. Тут позначено гранично допустиме значення для коефіцієнтів k_{z_m} , що становить 1,3.

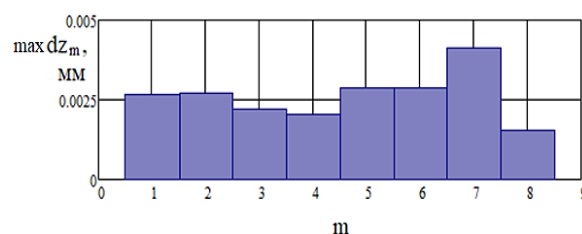
За розрахунковою оцінкою виходить, що мінімальні значення коефіцієнта запасу стійкості колісної пари від сходження з рейок отримані при всіх

варіантах з плану експерименту нижче допустимого рівня. Таким чином можна констатувати, що для всіх розглянутих розрахункових варіантів умови стійкості платформи від сходження з рейок не забезпечуються.

Рис. 6. Мінімальні значення коефіцієнтів запасу стійкості колісної пари $\min k_{z_m}$

Співставлення отриманих значень показників $\max H_{r_m}$ і $\min k_{z_m}$ вказує на їх невідповідність. Відсутність кореляції між оціночними даними цих показників свідчить про недосконалість існуючих підходів щодо оцінки умов безпеки руху вантажних вагонів.

З точки зору удосконалення системи оцінки стійкості колісних пар рухомого складу від сходження з рейок представляє інтерес визначення випадків відриву коліс від голівок рейок. З цією метою розраховано значення підйому колеса над рейкою dz_n . Максимальні значення величини $\max dz_m$ наведено на рис. 7.

Рис. 7. Максимальні значення підйомів колеса над рейкою $\max dz_m$

Дані, представлені на рис. 7, свідчать про те, що за всіма варіантами моделювання мають місце випадки підйому коліс над рейками. Таким чином, явище розвантаження коліс є свідченням незадовільної вертикальної динаміки платформи. Ймовірно відповідна поведінка є наслідком прояву резонансних режимів руху платформи [9]. В резонансних режимах в моменти повного розвантаження коліс при дії поперечних горизонтальних сил з'являється реальна загроза сходження колісних пар з рейок.

Збурення, які викликають резонансні режими рухомого складу, пов'язані як з періодичними нерівностями колії, так і з наявними дефектами коліс типу нерівномірний прокат, повзуни, вибої, навари тощо. В умовах експлуатації такі дефекти часто трапляються на поверхнях кочення вагонних коліс. Тому в спектрі збурень, які діють на вагон, що руха-

ється, завжди присутні складові з частотою обертів колісних пар. Ці складові, навіть при допустимих дефектах коліс, достатні для розвитку резонансних явищ, коли швидкість руху вагона досягає критичної величини при збігу частоти обертів колісної пари f_k з однією з власних частот f_i .

Графіки, наведені на рис. 8, ілюструють визначення резонансних швидкостей при фактичних значеннях інерційних параметрів платформи і зміні радіусу коліс r . Лінії 1, 2, 3 відповідають значенням частот коливань підскакування f_n , бічної хитавиці $f_{\delta x}$ та галопування f_z . Лінії 4, 5, 6 – це залежності частот обертів колісних пар за повною $f_1(v)$, фактичною $f_2(v)$ та граничною $f_3(v)$ товщинами ободів коліс, що відповідають радіусам коліс 0,475, 0,443 і 0,425 м.

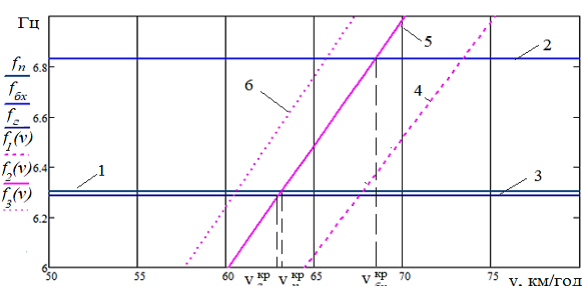


Рис. 8. Резонансні швидкості для порожньої платформи моделі 13-4012

Значення резонансних швидкостей v_n^{kp} , $v_{\delta x}^{kp}$ і v_z^{kp} знаходяться за точками перетину горизонтальних ліній, що відповідають власним частотам коливань підскакування f_n , бічної хитавиці $f_{\delta x}$ та галопування f_z , з лініями 4, 5 і 6 при зазначених радіусах коліс. В залежності від товщин ободів коліс діапазони критичних швидкостей досліджуваної платформи становлять: за коливаннями підскакування – $60,8 \leq v_n^{kp} \leq 67,8$ км/год; за коливаннями бічної хитавиці – $65,8 \leq v_{\delta x}^{kp} \leq 73,5$ км/год; за коливаннями галопування – $60,5 \leq v_z^{kp} \leq 67,5$ км/год. Таким чином, резонансні швидкості порожньої платформи моделі 13-4012 охоплюються робочими швидкостями руху вантажних поїздів, що негативно позначається на умовах безпеки руху.

Висновки. За результатами параметричного дослідження шляхом комп'ютерного моделювання динаміки руху універсальної платформи у порожньому стані визначено відповідні показники безпеки руху і ходових якостей. З аналізу отриманих результатів дослідження визначено, що умови безпеки руху платформи порушуються за всіма розглянутими розрахунковими варіантами. Кількісними даними доведено, що суттєвий вплив на рівень показників безпеки руху здійснює технічний стан ходових частин, зокрема коліс, та колії.

Дослідженням резонансних режимів руху встановлено, що критичні (резонансні) швидкості, при яких виникають випадки повного розвантаження коліс платформи, знаходяться в діапазоні робочих швидкостей руху вантажних поїздів. Ця обставина

свідчить про створення реальної загрози безпеці руху. Тому рекомендується доповнити систему динамічних показників безпеки руху величиною підйому колеса над головною рейки.

Література

1. Chudzikiewicz A. The influence of wheel and rail rolling surfaces wear on railway vehicle dynamics / A. Chudzikiewicz, J. Drożdziel, B. Sowiński // Proc. of CSME Forum, 2004. The University of Western Ontario, Canada, June 1-4, 2004. – P. 945-954.
2. Kardas-Cinal E. Selected problems in railway vehicle dynamics related to running safety / E.Kardas-Cinal // Archives of Transport. – 2013. – Vol. 31, Iss. 3. – P. 37-45.
3. Molatefi H. On the investigation of wheel flange climb derailment. Mechanism and methods to control it / H. Molatefi, A. Mazraeh // Journal of Theoretical and Applied Mechanics. – 2016. – Vol. 54, Iss. 2. – P. 541-550.
4. Domin R. Estimation of Dynamic Performances of the Safe Operation of High-Speed Electric Train / R. Domin, Iu. Domin, G. Cherniak // Archives of Transport. – 2017. – Vol. 41, Iss. 1. – P. 7-16.
5. 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.
6. Черняк А.Ю. Компьютерная модель для оперативного определения вероятных причин схода с рельсов грузовых вагонов / А.Ю. Черняк // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В.Даля : наук. журнал. – 2010. – № 5 (147). – Ч. 1. – С. 40-46.
7. Ермаков В.М. О сходах порожних вагонов / В.М. Ермаков, В.О. Певзнер // Железнодорожный транспорт. – 2002. – №3. – С. 29-33.
8. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 154 с.
9. Дьомін Ю.В. Динаміка порожнього вагона і безпека руху поїзда / Ю.В. Дьомін, Г.Ю. Черняк // Залізничний трансп. України. – 2007. – №3. – С. 50-52.

References

1. Chudzikiewicz A. The influence of wheel and rail rolling surfaces wear on railway vehicle dynamics / A. Chudzikiewicz, J. Drożdziel, B. Sowiński // Proc. of CSME Forum, 2004. The University of Western Ontario, Canada, June 1-4, 2004. – P. 945-954.
2. Kardas-Cinal E. Selected problems in railway vehicle dynamics related to running safety / E.Kardas-Cinal // Archives of Transport. – 2013. – Vol. 31, Iss. 3. – P. 37-45.
3. Molatefi H. On the investigation of wheel flange climb derailment. Mechanism and methods to control it / H. Molatefi, A. Mazraeh // Journal of Theoretical and Applied Mechanics. – 2016. – Vol. 54, Iss. 2. – P. 541-550.
4. Domin R. Estimation of Dynamic Performances of the Safe Operation of High-Speed Electric Train / R. Domin, Iu. Domin, G. Cherniak // Archives of Transport. – 2017. – Vol. 41, Iss. 1. – P. 7-16.
5. 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.
6. Cherniak A.Yu. Komp'yuternaya model' dlya operativnogo opredeleniya veroyatnykh prichin skhoda s rel'sov gruzovykh vagonov [A computer model for the op-

- erational determination of the probable causes of the derailment of freight cars] / A.Yu. Cherniak // Visnik Skhidnoukr. nats. un-tu im. V.Dalya : nauk. zhurnal. – 2010. – № 5 (147). – CH. 1. – S. 40-46.
7. Ermakov V.M. O skhodakh porozhnykh vagonov [About the descent of empty cars] / V.M. Ermakov, V.O. Pevzner // Railway transport. – 2002. – No. 3. – S. 29-33.
 8. Normy dlya rascheta i proyektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh) [Standards for the calculation and design of railroad cars of railways of the Ministry of Railways of 1520 mm gauge (non-self-propelled)]. – M.: GosNII-VNIIZHT, 1996. – 154 s.
 9. Domin Yu.V. Dynamika porozhn'oho vagona i bezpeka rukhu poyizda [Dynamics of an empty car and safety of train movement] / Yu.V. Domin, H.Yu. Cherniak // Zaliznychnyy transp. Ukrainy. – 2007. – №3. – S. 50–52.

Демин Ю.В., Демин Р.Ю., Черняк А.Ю. Оценка средствами компьютерного моделирования динамических показателей безопасности движения вагона-платформы

В статье представлена общая характеристика компьютерной модели динамики движения грузового вагона на тележках модели 18-100, примененная для оценки устойчивости от схода с рельсов вагона-платформы универсального типа. Рассмотрены расчетные варианты, соответствующие техническому состоянию механических частей как по проекту, так и с учетом изменений, которые получают в процессе эксплуатации. Из анализа результатов компьютерного моделирования установлены расхождения оценок безопасности движения по разным силам и коэффициентам запаса устойчивости колесной пары от схода с рельсов. Доказана необходимость уточнения условий устойчивости подвижного состава в рельсовой колее оценкой возможной разгрузки колесных пар в резонансных режимах движения.

Ключевые слова: универсальная вагон-платформа, компьютерное моделирование, показатели безопасности движения.

Domin Yu., Domin R., Cherniak G. Evaluation by Means of Computer Simulation of the Dynamic Indicators of Traffic Safety of Flat Cars

This study evaluates the conditions of stability from the derailment of freight cars on the example of the most common in the fleet of universal four-axle platform. A simulation model of the dynamics of the platform of its movement was used to study the dynamic indicators and assess the risks of derailment. This model is based on a multi-body system approach,

in which a mechanical system is a set of solid bogies connected by hinges and force elements. Confirmation of the adequacy of the developed model of platform dynamics is carried out by comparing the simulation results with experimental data based on the analysis of vertical and horizontal body accelerations obtained during tests of the experimental platform. From the analysis of the obtained results of the research it is determined that the conditions of traffic safety of the platform are violated according to all considered calculation options. The quantitative data show that the technical conditions of the running gear, in particular wheels, and track, has a significant influence on the level of traffic safety indicators. The necessity of clarifying the stability conditions of the rolling stock in the rail track by assessing the possible unloading of wheelsets in resonant driving modes is proved. Disturbances caused by resonant modes of rolling stock are associated with both periodic irregularities of the track and the existing defects of the wheels. Under operating conditions such defects often occur on the rolling surfaces of car wheels. Therefore, in the spectrum of perturbations acting on a moving car, there are always components with the speed of rotation of the wheel pairs. These components, even with permissible wheel defects, are sufficient for the development of resonant phenomena, when the speed of the car reaches a critical value when the speed of the wheel pair coincides with one of the natural frequencies. The study of resonant modes of movement found that the critical (resonant) speeds, at which there are cases of complete unloading of the platform wheels, are in the range of operating speeds of freight trains. This fact indicates the creation of a real threat to traffic safety. Therefore, it is recommended to supplement the system of dynamic indicators of traffic safety with the amount of wheel lift above the rail head.

Key words: universal flat car, computer simulation, traffic safety indicators.

Дьомін Юрій Васильович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Залізничний, автомобільний транспорт та підйомно-транспортні машини» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля E-mail: domin1520.1435mm@gmail.com

Дьомін Ростислав Юрійович – доктор технічних наук, член правління компанії Domin Rail Sp. z o.o. E-mail: r.domin@1520mm.com

Черняк Ганна Юрійвна – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник кафедри «Залізничний, автомобільний транспорт та підйомно-транспортні машини» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля E-mail: anchernyak1520mm@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-29-33>

УДК 004.92[621:744]

COMPUTER PRACTICE IN ENGINEERING GRAPHICS

Karpyuk L.V., Davydenko N.A.

КОМП'ЮТЕРНА ПРАКТИКА В ІНЖЕНЕРНІЙ ГРАФІЦІ

Карпюк Л.В., Давіденко Н.О.

The article discusses the problems of teaching students engineering and computer graphics in a single course based on a computer-aided design (CAD) system. Examples of training tasks for acquiring knowledge, skills and abilities in the environment of the drawing and graphic editor of the AutoCAD system are given. They are necessary when performing drawings on engineering graphics, as well as the graphic part of course projects for students of mechanical specialties. Examples of exercises for self-study of the material are considered for a deeper study of the drawing-graphic module structure of the system and the acquisition of skills to work with its tools. The article also discusses several topics for studying the graphical editor AutoCAD, it reveals their contents and provides methods for completing practical tasks. A comprehensive training program extends the ability of teachers to submit material, increases students' interest in graphic disciplines, so it can achieve better results in their development. However, there are a number of problems with this approach. Different levels of basic knowledge of students in the field of computer technology require greater individualization in the organization of the educational process. An additional burden for the teacher is to check the electronic drawings and to control the independence of students' work when performing graphic works using CAD. Combining engineering and computer graphics requires more intensive work from students.

It is noted that the implementation of the proposed set of tasks is only the first stage of training students in computer technologies for creating design documentation. The acquired knowledge, skills and working skills in the environment of the AutoCAD system will be in demand when studying modern means of three-dimensional modeling. The execution of drawings using computer tools is undoubtedly more attractive to students, compared to traditional drawing.

It is also important to create conditions for actualizing the intellectual potential of students, as well as the formation of positive motivation. Enthusiastic students independently master the functions of the system that are not intended for study by the curriculum. They participate with pleasure in Olympiads in engineering and computer graphics.

Ways of improving the verification of graphic works by a teacher are developed. A partial solution to the problem of checking the graphic part of course projects using preliminary drawings in a draft version and intermediate printouts of their electronic versions are proposed.

Key words: *engineering and computer graphics, graphic editor of the AutoCAD, design documentation, modern means of three-dimensional modeling.*

Introduction. The development of computer aided design, the gradual transition from paper documentation to electronic causes the need to modify the study of disciplines of the engineering-graphic cycle. In accordance with the curricula of preparation of bachelors in such specialties as 133 «Branch of mechanical engineering», 161 «Chemical technologies and engineering», the study of computer technologies of creation of design documentation begins from the first year of study of students within the course of engineering graphics. In this regard, the working curricula of the disciplines «Engineering Graphics» and «Engineering and Computer Graphics» include sections for learning the rules and mastering the rules of design documents in the environment of the automated system of design AutoCAD.

Statement of basic materials A comprehensive training program extends the ability of teachers to submit material, increases students' interest in graphic disciplines, so it can achieve better results in their development. However, there are a number of problems with this approach. Different levels of basic knowledge of students in the field of computer technology require greater individualization in the organization of the educational process. An additional burden for the teacher is to check the electronic drawings and to control the independence of students' work when performing graphic works using CAD. Combining engineering and computer graphics requires more intensive work from students. For this purpose, two classes of graphics equipped with computers, an interactive whiteboard, and a plotter were created at the Department of Mechanical Engineering and Equipment of Industrial Enterprises of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University named after.

The interactive whiteboard allows you to present the material clearly, accessible and in full. Students find

the material easier and more interesting. Experience shows that the introduction of interactive whiteboard training brings positive results in the study of such graphic editors as AutoCAD, SolidWorks and other programs. Automated methods of working with the drawing and other documents do not exclude the need for knowledge and understanding of the theoretical foundations and provisions of the course.

So, in the first semester, students study descriptive geometry as the basis for the construction of the drawing, the elements of its design [1]. In the second semester, the discipline program provides for the implementation of sketches and drawings of parts, the study of the rules for applying dimensions, surface roughness, thread designation, images of detachable joints, welded joints, design of assembly drawings and specifications [2,3].

Computer technologies for the development of design documentation are used by students in carrying out a number of individual graphic assignments and the graphic part of course projects in the disciplines «Machine Details» and «Theory of Mechanisms and Machines», while being an independent object for study. Thus, the skills are acquired to perform drawing and graphic work in a traditional and modern, computer way. For independent study of all sections of the discipline, students are provided with various reference materials and manuals [3, 4, 5], both in print and in electronic form. Further, in the course design, students develop a set of design documentation for the assembly unit completely in an automated environment.

In the context of a comprehensive training program, practical classroom studies are aimed at solving two problems simultaneously: studying the rules for designing and developing design documentation, as well as the basic principles for performing electronic drawing in AutoCAD, a system drawing and graphics editor. Various methods of supplying educational material are used. These are lectures prepared on the basis of demonstration computer systems, posters and full-scale samples, as well as exercises to study the AutoCAD system, performed by students simultaneously with the teacher in the master class mode.

In addition to intensive classroom work, the solution to the problem of assuming the planned amount of information is the active and competent use of the capabilities of the AutoCAD complex when performing individual graphic works. Its settings and numerous applications are based on the standards of the Unified Design Documentation System (UDDS) [5]. The use of the system as a tool for obtaining high-quality graphic documentation allows to reduce labor costs and, in general, significantly improve the design training of students.

For a deeper study of the structure of the drawing and graphic module of the system and the acquisition of the skill to work with its tools, students are invited to perform a number of exercises on their own. For these purposes, teachers of the Department of Mechanical Engineering and Equipment of Industrial Enterprises of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

developed methodological guidelines and teaching aids, which, along with a brief description of the program's capabilities and recommendations for their practical application, include exercises that are step-by-step instructions for completing training tasks that contain typical elements graphic and text design documents [3, 4].

The theme of the study of the system "Basic concepts of the graphical editor AutoCAD. Building primitives «includes exercises aimed at studying the system interface, toolbars, various system settings, for mastering the basic system commands and methods for creating detail drawings, saving and printing documents. We study ways to enter commands for building primitives. A number of fundamental differences between the algorithm for creating a drawing on a computer and traditional drawing on a culmination are considered [3, 4, 6]. Images 1 and 2 contain fragments of exercises on this topic.

Task. Construct a rectangle by specifying points in absolute coordinates.

Command: Line
from point: 30,70 (from point 1)
to point: 30,90 (to point 2)
to point: 80,90 (to point 2)
to point: 80,70 (to point 2)
to point: C (lock up)

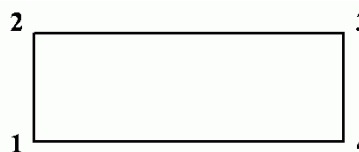


Fig. 1. Construction of a rectangle

Task. Construct a cam according to the specified dimensions. Circle the polyline.

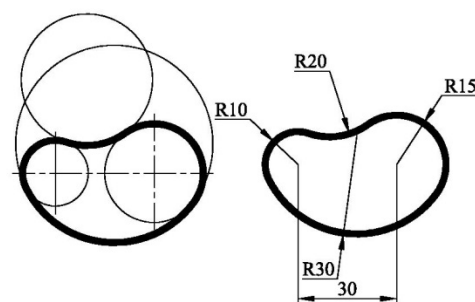


Fig. 2. Construction of a cam

The topic of Editing Drawing Elements includes exercises that allow you to learn the commands of editing primitives and created drawings. It considers editing methods, object binding, text creation and modification [3, 4, 6]. Performing these exercises, students practice various methods of obtaining images, get acquainted with the commands of the AutoCAD system and the principles of working with them. The following are fragments of exercises (image 3, image 4). The form of exercises allows you to independently learn

step by step the structure of the system and acquire the skill of working in its environment.

Task. Construct two arcs by tying their end points.

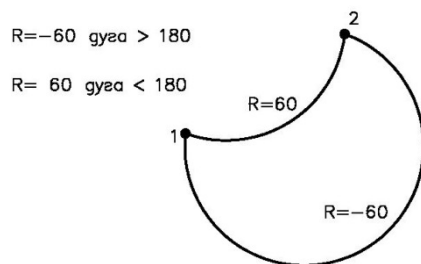


Fig. 3. Construction of arcs

Task. Draw an equidistant (similar primitives at a distance of 5 mm).

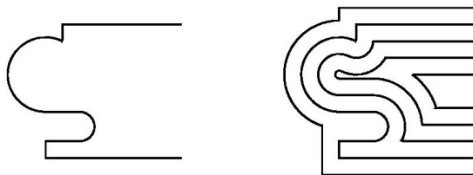


Fig. 4. Construction of equidistant

The next topic for the study of AutoCAD graphical editor «Instructions for the design of drawings» allows you to study the settings of dimensional styles, text styles, zooming, hatching, working with utilities (control variables), applying tolerances, deviations, surface roughness of the part, material designation [3, 4, 6]. The following are fragments from exercises (image 5, image 6).

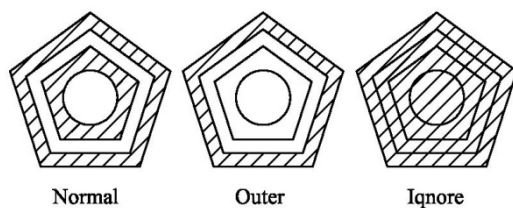


Fig. 5. Hatching

The Theme «Properties of primitives. Creating Blocks» contains instructions for using such service capabilities of the system as layer-by-layer product design, the use of fragments in the formation of a drawing. It introduces techniques for creating parametric objects and the features of working with them, allows you to understand the essence of library elements of the system and, in the future, the formation of models for your own libraries. Using blocks, you can create your own database, which can be used to create drawings. The following is a fragment of the exercise (Image 7)

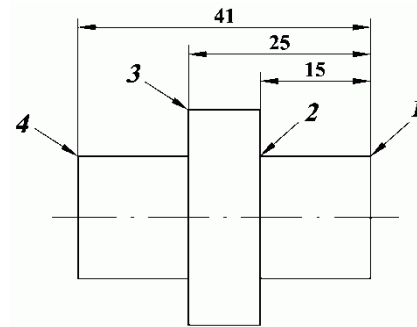


Fig. 6. Layout of the base size

After completing these exercises, students will learn how to develop assembly drawings using the capabilities of the AutoCAD system design library when displaying standard fasteners. In the process of performing such exercises, students not only get acquainted with the structure and contents of the library, but also acquire initial design skills by «collecting» standard compounds from their components in a certain sequence [3, 4, 6].

Task. Perform the drawings at the specified sizes using layer-by-layer distribution.

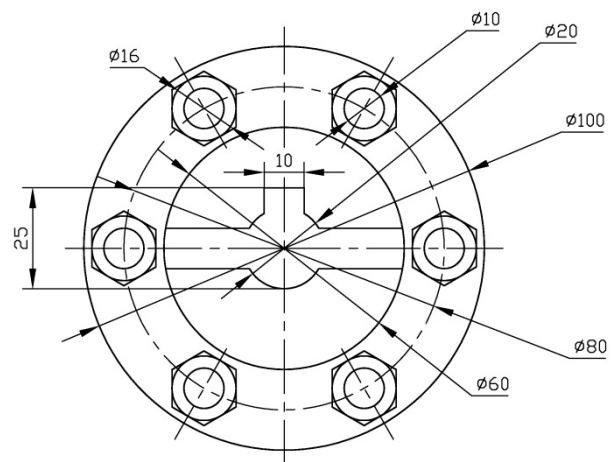


Fig. 7. Drawings using layer distribution

The next stage in the study of the AutoCAD graphic editor is the theme «The most comfortable parts to the UDDS». Using the previously acquired knowledge, the student must create a drawing of the part in the sequence that is proposed in this topic, draw up the drawing in accordance with the requirements of the Unified Design Documentation System (UDDS) [5]. Image 8 shows an example of one of the exercises on this topic.

On the topic «Specifications», there are exercises that are designed to acquire the skill of drawing up specifications, both in manual and automated mode [3, 4]. The acquired skills are used in the development of assembly drawings and directly in the course project on the discipline «Machine parts». An intermediate control is provided for students to master the system's functionality considered in exercises. To successfully complete the tasks you need not only knowledge of the AutoCAD

system and the skills to work in it (methods for constructing a part outline, setting system elements, the ability to control image scale and drawing scaling, using text templates), but also the basics of descriptive geometry. Thus, the interconnection of the sections of the engineering graphics course is maintained.

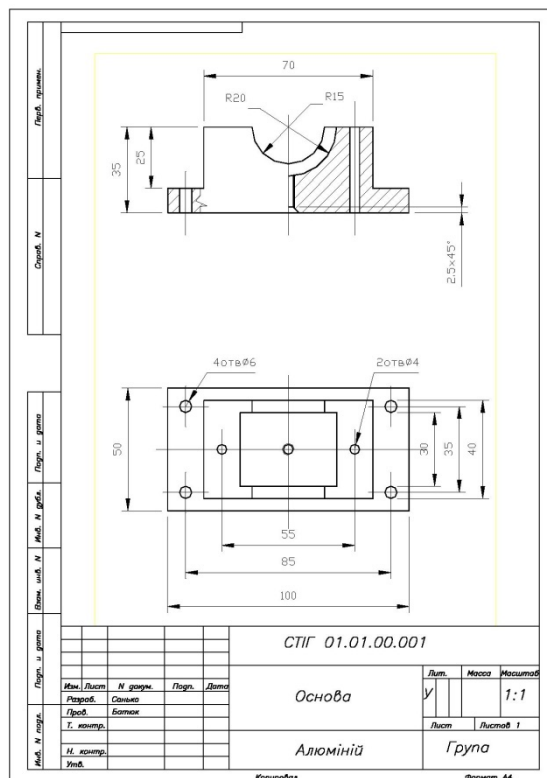


Fig. 8. Drawing of parts in accordance with UDDS requirements

Results. The implementation of the proposed set of tasks is only the first stage of training students in computer technologies for creating design documentation. The acquired knowledge, skills and working skills in the environment of the AutoCAD system will be in demand when studying modern means of three-dimensional modeling. The execution of drawings using computer tools is undoubtedly more attractive to students, compared with traditional drawing. It is also important to create conditions for actualizing the intellectual potential of students, as well as the formation of positive motivation [6]. Enthusiastic students independently master the functions of the system that are not intended for study by the curriculum, and with pleasure participate in Olympiads in engineering and computer graphics. They are held annually at the Department of Mechanical Engineering and Equipment of Industrial Enterprises of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University.

The experience gained will allow students to quickly master more complex graphic software products used in enterprises of various industries, in research and development organizations.

Conclusions. In conclusion, it is noted that a feature of the educational process in the discipline «Engi-

neering Graphics» has always been a high degree of individualization of training, due to the personal nature of graphic tasks, as well as the significant complexity of the implementation and verification of these tasks.

The problem of the complexity of checking graphic works and controlling knowledge becomes even more relevant with an integrated approach to training students in engineering and computer graphics. Checking the electronic drawing significantly increases the load on the eyesight. The inability to often see the entire drawing on the monitor screen at a scale convenient for work increases the time to check the drawing. Finally, there are the difficulties when checking the remarks of a teacher in an electronic document. And, as a consequence, untimely correction of errors increase the number of students' requests for advice several times. This problem is partially solved by preliminary execution of the sketch drawing and intermediate printouts of its electronic version. The implementation of the preliminary design of the assembly drawing layout is an obligatory stage of work on the project in the course design. This allows the teacher to evaluate the independence of the student's work at the first stage of design and to reduce the likelihood of duplication of ready-made assignments. An analysis of the problems in the educational process when studying the discipline «Engineering and computer graphics» allows us to recommend in the standards for calculating the academic load to limit the number of students in the group per teacher and to increase the number of hours allocated for consultations.

References

1. V. L. Tkachenko *Narysna geometrija* / V. L. Tkachenko, Ju. A. Tyshhenko, V. K. Suhoverhov. Navchalnyj posibnyk. – Lugans'k: Vyd-vo Shidnoukrai'ns'kogo nacional'nogo universytetu imeni Volodymyra Dalja, 2004. -192 s.
2. Myhajlenko V. E. *Ynzhenernaja grafyka* / V. E. Myhajlenko, A. M. Ponomarev – K.: Vyshha shkola, 1990. – 303 s.
3. L. V. Karpjuk *Komp'juterna grafika v mashynobudivnyh kreslennjah*:/ Ukl. L. V. Karpjuk, M. I. Gulida, S. A. Revenko. Navch. posibnyk. – Lugans'k: Vyd-vo Shidnouk-rai'ns'kogo nacional'nogo universytetu imeni Volodymyra Dalja, 2007. -132 s.
4. *Komp'juterna grafika v himichnomu aparatobuduvanni*:/ S. A. Revenko, L. V. Karpjuk, M. I. Gulida, O. G. Arhypov. Navch. posibnyk. – Lugans'k: Vyd-vo Shidnoukra-i'ns'kogo nacional'nogo universytetu imeni Volodymyra Dalja, 2012. - 400 s.
5. *Edynaja systema konstruktorskoj dokumentacyy. Obshhye pravyla vypolnennyja chertezhej: Sbornyk.* – M.: Yzdatel'stvo standartov, 2001. – 384 s.
6. T. Ju. Sokolova *AutoCAD 2012 na 100%*. / Sokolova T. Ju. Spravochnyk. Praktycheskoe rukovodstvo - Yzdatel'stvo: Pyter, 2012. – 576 s.

Література

1. В. Л. Ткаченко *Нарисна геометрія* / В. Л. Ткаченко, Ю. А. Тищенко, В. К. Суховерхов. Навчальний посібник. – Луганськ: Вид-во Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 2004. -192 с.
2. Михайленко В. Е. *Инженерная графика* / В. Е. Михайленко, А. М. Пономарев – К.: Вища школа, 1990. – 303 с.
3. Л. В. Карпюк *Комп'ютерна графіка в машинобудівних кресленнях*:/ Укл. Л. В. Карпюк, М. І. Гуліда, С. А. Ревенко. Навч. посібник. – Луганськ: Вид-во Східноук-

- раїнського національного університету імені Володимира Даля, 2007. -132 с.
4. Комп'ютерна графіка в хімічному апаратуробудуванні./ С. А. Ревенко, Л. В. Карпюк, М. І. Гуліда., О. Г. Архипов. Навч. посібник. – Луганськ: Вид-во Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 2012. - 400 с.
 5. Единая система конструкторской документации. Общие правила выполнения чертежей: Сборник. – М.: Издательство стандартов, 2001. – 384 с.
 6. Т. Ю. Соколова AutoCAD 2012 на 100%. / Соколова Т. Ю. Справочник. Практическое руководство - Издательство: Питер, 2012. – 576 с.

Карпюк Л. В., Давиденко Н. О. Комп'ютерна практика в інженерній графіці

У статті розглядаються проблеми навчання студентів інженерній та комп'ютерній графіці в рамках єдиного курсу на базі системи автоматизованого проектування (САПР). Наводяться приклади тренувальних завдань для придбання знань, умінь і навичок роботи в середовищі креслярсько-графічного редактора системи AutoCAD, необхідних при виконанні креслень з інженерної графіки, а також графічної частини курсових проектів для студентів механічних спеціальностей. Для більш глибокого вивчення структури креслярсько-графічного модуля системи і придбання навичок роботи з його інструментами розглядаються приклади виконання вправ для самостійного вивчення матеріалу. Також розглядаються кілька тем з вивчення графічного редактора AutoCAD, розкривається їх зміст і наводяться методи виконання практичних завдань.

Комплексна програма навчання розширює можливості викладачів в подачі матеріалу, підвищує інтерес студентів до графічних дисциплін, таким чином дозволяє домогтися кращих результатів в їх освоєнні. Однак при такому підході виникає ряд проблем. Різний рівень базових знань студентів в області комп'ютерних технологій вимагає більшої індивідуалізації в організації навчального процесу. Додатковим навантаженням для викладача є перевірка електронних креслень і здійснення контролю самостійності роботи студентів при виконанні графічних робіт з використанням САПР. Об'єднання інженерної та комп'ютерної графіки вимагає більш інтенсивної роботи від студентів.

Відзначено, що виконання запропонованого комплексу завдань - лише перший етап навчання студентів комп'ютерним технологіям створення конструкторської документації. Набуті знання, вміння і навички роботи в середовищі системи AutoCAD будуть затребувані при вивченні сучасних засобів тривимірного моделювання. Виконання креслень з використанням комп'ютерних засобів, безсумнівно, більш привабливе для студентів, в порівнянні з традиційним кресленням. Важливе й створення умов для актуалізації інтелектуального потенціалу студентів, а також формування позитивної мотивації. Захоплені студенти самостійно освоюють функції системи, які не передбачені для вивчення програми курсу, і з задоволенням беруть участь в олімпіадах з інженерної та комп'ютерної графіки.

Пропонуються шляхи удосконалення перевірки графічних робіт викладачем і часткове вирішення проблеми перевірки графічної частини курсових проектів за допомогою попереднього виконання креслень в ескізованому варіанті і проміжними роздруковками їх електронних версій.

Ключові слова: інженерна та комп'ютерна графіка, графічний редактор AutoCAD, примітив, конструкторська документація.

Карпюк Л. В., Давиденко Н. А. Компьютерная практика в инженерной графике

В статье рассматриваются проблемы обучения студентов инженерной и компьютерной графике в рамках единого курса на базе системы автоматизированного проектирования (САПР). Приводятся примеры тренировочных заданий для приобретения знаний, умений и навыков работы в среде чертежно-графического редактора системы AutoCAD, необходимых при выполнении чертежей по инженерной графике, а также графической части курсовых проектов для студентов механических специальностей. Для более глубокого изучения структуры чертежно-графического модуля системы и приобретения навыков работы с его инструментами рассматриваются примеры выполнения упражнений для самостоятельного изучения материала. Также рассматриваются несколько тем по изучению графического редактора AutoCAD, раскрывается их содержание и приводятся методы выполнения практических заданий.

Комплексная программа обучения расширяет возможности преподавателей в подаче материала, повышает интерес студентов к графическим дисциплинам, поэтому позволяет добиться лучших результатов в их освоении. Однако при таком подходе возникает ряд проблем. Различный уровень базовых знаний студентов в области компьютерных технологий требует большей индивидуализации в организации учебного процесса. Дополнительной нагрузкой для преподавателя является проверка электронных чертежей и осуществление контроля самостоятельности работы студентов при выполнении графических работ с использованием САПР. Объединение инженерной и компьютерной графики требует более интенсивной работы от студентов.

Отмечено, что выполнение предложенного комплекса заданий – лишь первый этап обучения студентов компьютерным технологиям создания конструкторской документации. Приобретенные знания, умения и навыки работы в среде системы AutoCAD будут востребованы при изучении современных средств трехмерного моделирования. Выполнение чертежей с использованием компьютерных средств, несомненно, более привлекательно для студентов, по сравнению с традиционным черчением. Немаловажно и создание условий для актуализации интеллектуального потенциала студентов, а также формирование положительной мотивации. Увлеченные студенты самостоятельно осваивают функции системы, не предусмотренные для изучения программой курса, и с удовольствием участвуют в олимпиадах по инженерной и компьютерной графике.

Предлагаются пути усовершенствования проверки графических работ преподавателем и частичное решение проблемы проверки графической части курсовых проектов с помощью предварительного выполнения чертежей в эскизном варианте и промежуточными распечатками их электронных версий.

Ключевые слова: инженерная и компьютерная графика, графический редактор AutoCAD, примитив, конструкторская документация.

Карпюк Людмила Вікторівна – старший викладач кафедри машинознавства та обладнання промислових підприємств СНУ імені В. Даля.

Давиденко Наталія Олександрівна – старший викладач кафедри іноземних мов та професійної комунікації СНУ імені В. Даля.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-34-39>

УДК 621.9.025.11

ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТА ПОБУДОВА ПАРАМЕТРИЧНИХ І 3D-МОДЕЛЕЙ ЗУБОРІЗАЛЬНОЇ ФРЕЗИ З ФЛАНКОМ

Кроль О.С.

RESEARCH OF THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF PARAMETRIC AND 3D MODELS OF GEAR CUTTING MILLS WITH FLANK

Krol O.S.

Запропоновано інструментарій параметричного моделювання в додатку до завдань проектування і моделювання зуборізних інструментів, що працюють за методом обкатки. Розроблено спеціалізовані програми побудови параметризованих профілів черв'ячних зуборізних фрез для обробки зубчастих коліс. Запропоновано процедури побудови спеціалізованих графічних примітивів для моделювання рейкового контуру, модифікованого евольвентного профілю, перехідної кривої бічної поверхні зуба фрези з фланком. До складу програми параметричного моделювання введений спосіб верифікації допустимих варіантів контурів неробочої частини профілю зуба фрези. Розглянуто особливості взаємодії параметричних профілів в 2D-графічному редакторі APM Graph з подальшим експортом в 3D-редактор APM Studio. Побудовано тривимірні твердотільні моделі черв'ячної зуборізної фрези в редакторі APM Studio на основі параметризованих графічних примітивів. Проведено дослідження напружено-деформованого стану зуба фрези методом кінцевих елементів.

Ключові слова: параметрична модель, черв'ячна зуборізна фреза, модифікація профіля зуба, 3D модель, напружено-деформований стан.

Постановка проблеми. Задачі розробки зуборізальних інструментів мають багатоваріантну природу. Для їхнього рішення слід визначити рівень граничних значень таких конструктивних та геометричних параметрів, які забезпечують найкращі умови технологічного процесу виготовлення зубчастих коліс різноманітної конструкції в широкому діапазоні розмірів.

Для виконання різноманітних розрахунків і повноцінного інженерного аналізу проєктованих різальних інструментів призначені інтегровані системи КОМПАС-3D та APM WinMachine [1-5]. Ці системи є відкритими й дозволяють створювати користувацькі бібліотеки для рішення різних завдань конструювання різального інструменту. Такі мож-

ливості представляє «Менеджер бібліотек», складовою частиною якого є модуль САПР ФРЕЗ. У цьому модулі реалізується процес проектування черв'ячних зуборізальних і шлицьових фрез, інструментів для нарізування зірочок і зуборізальних довбачив.

Різнорозмірна номенклатура інструментів [6-9] для нарізування циліндричних коліс з одного боку і наявність уніфікованих елементів конструкцій з іншого, робить актуальним побудову параметричних моделей черв'ячних зуборізних фрез. Реальний процес конструювання характеризується тим, що остаточні значення розмірів деталей, як правило, заздалегідь невідомі і підлягають додатковому уточненню. Звідси впливає необхідність редагування параметричних розмірів. Але формалізованих процедур побудови параметричних моделей основних функціональних елементів зуборізних фрез (робочого модифікованого евольвентного профілю зуба з фланком у ніжці зуба) з наступною побудовою 3D моделі в арсеналі конструктора відсутня.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Параметрична САПР дозволить створити один або кілька узагальнених параметричних проєктів, за допомогою яких можна згодом в найкоротші терміни спроектувати будь-який з можливих варіантів черв'ячних фрез. При цьому потрібна менша кількість проєктувальників і забезпечується висока якість результату. Як геометричного ядра САПР, як правило, використовується або Parasolid, або ACIS [10]. Разом з тим, практично у всіх системах, таких як Autodesk Mechanical Desktop, Unigraphics, CATIA, I-DEAS і т.д. використовується один параметризатор англійської фірми D-CUBED. Параметризатор D-CUBED включає в себе два компоненти: скетчер, призначений для побудови параметричного профілю, на основі якого буде створено 3D операція, і математичну бібліотеку, що дозволяє пов'язувати окремі деталі в складальні конструкції. К того ж па-

аметризатор D-CUBED, орієнтований на 3D моделювання, виявляється неефективним в 2D кресленні. Та математика, яка успішно працює на десятках ліній профілю в Скетчер 3D системи, не справляється з тисячами взаємопов'язаних елементів креслень. А необхідність повного образмерівання параметричної моделі у D-CUBED, перетворює процес параметризації навіть нескладного креслення в практично нереальне завдання. Певною САПР T-FLEX CAD [11, 12] одночасно розроблялися і розвивалися обидва напрямки - параметричне креслення і параметричне твердотільне моделювання. Таким чином, вдалося уникнути недоліків "чистих" 3D систем. У тих, хто розробляє креслення в T-FLEX CAD, немає ніяких проблем зі створенням на основі цих креслень тривимірних моделей. У свою чергу по 3D моделі можна легко отримати проекцію і оформити необхідний чертеж. В тих ситуаціях, коли в конструкції є обмежена кількість уніфікованих елементів, що змінюються в межах єдиної номенклатури виробів, доцільним є часткова параметризація цих елементів.

Мета статті. Виконати розробку комбінованої проектної процедури параметричного моделювання модифікованого евольвентного профілю та одно- та двократно затилованого зуба фрези, як основи подальшого 3D-моделювання

Матеріали та результати дослідження. Ефективним бачиться поєднання параметричних профілів в 2-D графічних редакторах з подальшим експортом в 3 D редактор. Такий компромісний варіант можна реалізувати в відомій САПР APM «WinMachine», розробленої в НТЦ АПМ [5, 13-17].

У даній роботі запропонована процедура параметризації:

- вихідного контуру зубчастого колеса, що нарізується;
- вихідного генеруючого контуру черв'ячної зуборізної фрези (без модифікації і з модифікацією типу фланк);
- затилювання зуба з одноразовим і подвійним використанням архімедової спіралі.

Як відомо генеруючий контур фрези відрізняється від вихідного контуру зубчастого колеса розмірами: висоти головки h_a (на розмір радіального зазору в зачепленні); товщини зуба S_{n0} (збільшений на величину обов'язкового бічного зазору) і розташуванням фланки (α_f і h_{f0}) на ніжці зуба. На рис.1 представлені параметричні моделі вихідного контуру і генеруючого контуру з фланкуванням ніжки зуба.

Затилована задня поверхня фрези найчастіше окреслюється архімедовою спіраллю [6, 8], з огляду на спрощення технології виготовлення (простота виготовлення кулачків для затилювання і використання широкої гами верстатів з узгодженими обертальним і поступальним рухами). Крім того, кожна крива затилювання забезпечує достатні задні кути для всіх точок різальних крайок (з урахуванням можливих переточувань). У модулі APM Graph побудовані параметричні моделі одноразово і двократно затилованих поверхонь фрез (рис.2), окреслених архімедовою спіраллю (величина приросту радіуса вектора прямо пропорційна величині приросту полярного кута) [2, 18-20].

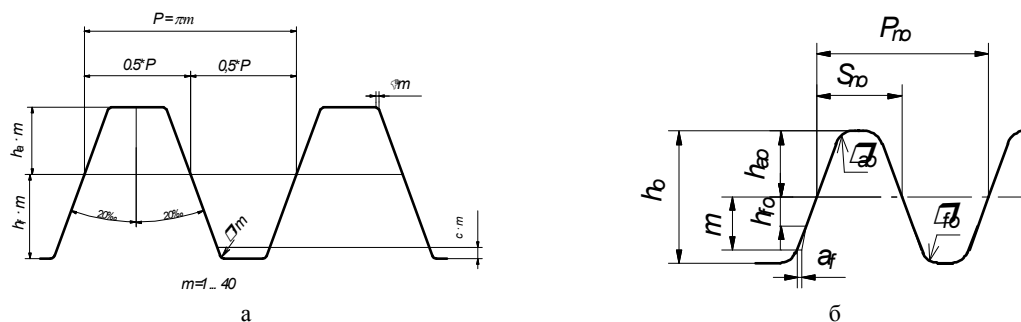


Рис. 1. Параметризовані вихідний (а) та генеруючий модифікований (б) контури

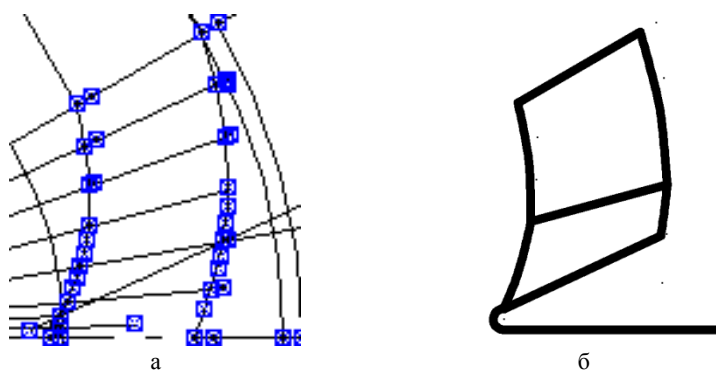


Рис. 2. Параметрична модель (а) та ескіз затилованого зуба (б)

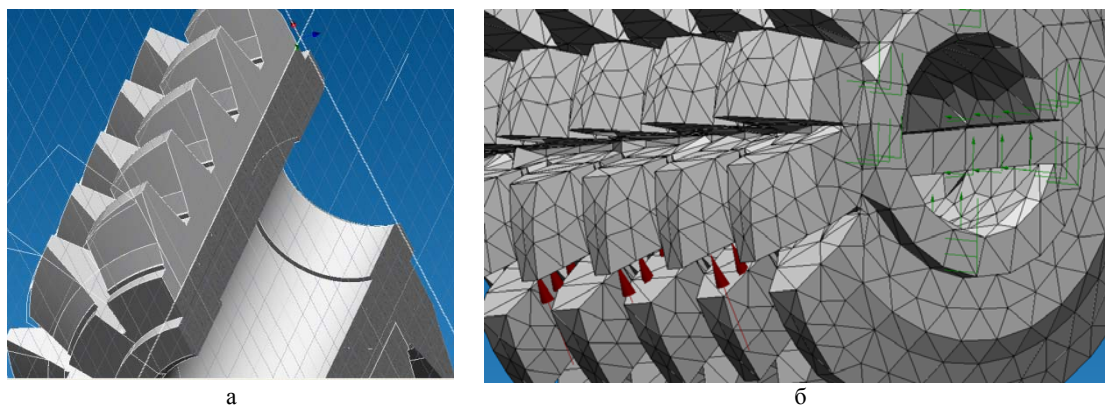


Рис. 3. Твердотільна модель фрези (а) і її кінцвоелементне уявлення (б)

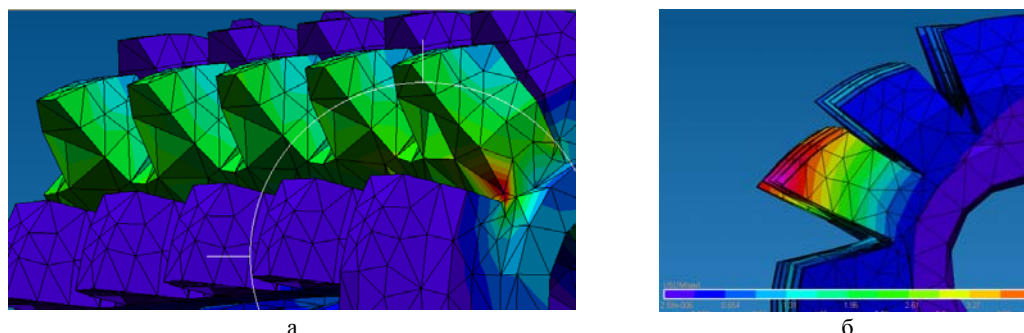


Рис.4. Результати розрахунку: поля напружень (а) та поля переміщень (б)

В основі організації комп'ютерної технології створення складних виробів машинобудування лежить формування повного електронного макету виробу, так як саме створення тривимірних електронних моделей, адекватних реально проектуваному виробу, відкриває можливості для створення більш якісної продукції (особливо складною, наукомісткої продукції) і в більш стислі терміни [21-24]. Тривимірне моделювання необхідно в якості надійного гнучкого та простого в застосуванні засобу для оптимізації процесу проектування складнопрофільних інструментів і, нарешті, об'єднання завдань CAD / CAM в одному середовищі.

У середовищі модуля APM Studio побудована тривимірна модель черв'ячної зуборізної фрези (рис.3, а) і згенерована кінцвоелементна сітка з певним кроком розбиття (рис.3, б). У режимі кінцвоелементного аналізу встановлюються закріплення (фіксуються переміщення по осях X, Y, Z) і прикладаються сили (рис.3, б).

В рамках модуля APM Studio [25-28] здійснений статичний розрахунок конструкції, результати якого можна візуалізувати в графічному і числовому вигляді (рис.4).

В результаті 3D-моделювання побудовані поля напруг та переміщень у разі розгляду технологічного процесу нарізання зубчастого колеса, виготовленого із легірованої сталі 40X. Зубонарізання проводиться цільними черв'ячними фрезами діаметром 76

мм і довжиною, 102 мм, швидкість різання 62 м/хв. Під час різання черв'ячна фреза безперервно переміщається уздовж своєї осі на величину 76 мм. Зазор в ходовому гвинті шпинделя черв'ячної фрези вибирається за допомогою двох регулюючих гайок. Максимальна напруга спостерігається в ніжці зуба, що відповідає традиційній картині зубонарізання, а максимальне переміщення спостерігається в голівці зуба.

Висновки. Виконано розробку формалізованої процедури параметризації основних функціональних елементів зуборізних фрез, включаючи вхідний та генеруючий профілі, на основі котрих здійснюється побудова робочого модифікованого евольвентного профілю зуба з фланком у його ніжки. За рахунок параметичних рішень наступна побудова 3D моделі черв'ячної фрези є ефективніше ніж у разі традиційного процесу тривимірного моделювання. Більш того це особливо зменшує час роботи конструктора-інструментальщика при вирішенні задачі проектування гами сучасного складнопрофільних фасонного інструменту. Запропоновано тривимірну модель черв'ячної зуборізної фрези у середовищі модуля APM Studio та згенерована кінцвоелементна сітка. У режимі кінцвоелементного аналізу проведено аналіз пружно-деформованого стану та побудовані поля напруг та переміщень, а також визначені найбільш небезпечні перерізи в зоні западин та виступів модифікованого профілю зуба з фланком.

Література

1. Кріль О.С., Шумакова Т.О., Соколов В.І. Проектування зуборізних інструментів за допомогою системи КОМПАС. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2013. – 144 с.
2. Krol O., Sokolov V.: Parametric Modeling of Gear Cutting Tools. In: Advances in Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 4, pp. 3-11. Springer, Cham (2019).
3. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). – Спб.: Питер, 2004. – 560 с.
4. Киричек А.В., Афонин А.Н. Проектирование металлообрабатывающих инструментов и технологической оснастки в T-FLEX CAD: Учеб. Пособие. – М.: Машиностроение, 2007. – 158 с.
5. Шелофаст В.В., Чугунова Т.Б. Основы проектирования машин. Примеры решения задач. – М.: Изд-во АПМ, 2004. – 240 с.
6. Kunderák, J., Mitsyk, A., Fedorovich, V., Morgan, M., Markopoulos, A.: 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 12(19), 3054 (2019).
7. Романченко О.В. Вибір системи синхронізації електропривода довгомірних вібраційних верстатів / Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – 2015. – № 52(1162). – С. 13–22.
8. Романов В.Ф. Расчет зубчатых инструментов. – М.: Машиностроение, 1969. – 201 с.
9. Мелконов Г., Ветряк С. Удосконалення токарного верстата 1A62 (16K20) шляхом заміни стандартного вузла встановлення взаємо пересувного різцетримача для обробки деталей з малим діаметром при відрізних операціях / Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, № 1(249), 2019, с. 23-25.
10. Кріль О.С. Параметрическое моделирование металлорежущих станков и инструментов. Монография. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2012. – 116 с.
11. T-FLEX CAD 7.0 - Российская САПР нового поколения на ядре Parasolid/ КомпьютерПресс, № 7, 2000. – С 31-37.
12. Шустиков И. Параметризация в T-FLEX CAD 3D 8.0/ САПР и графика, №10, 2003. – с.56-64.
13. Замрий А.А. Практический учебный курс CAD/CAE APM WinMachine. Учебно-методическое пособие. – М.: Изд-во АПМ, 2007. – 144 с.
14. Krol O., Sokolov V.: Parametric Modeling of Transverse Layout for Machine Tool Gearboxes. In: Advances in Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 4, pp. 122-130. Springer, Cham (2019).
15. Кріль О.С., Кріль А.А. Параметризация поперечных компоновок привода главного движения // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ: вип.24, 2009. – С. 164 – 168.
16. Krol O., Tsankov P., Sokolov V. Rational choice of two support spindles for machining centers with lubrication system // EUREKA: Physics and Engineering. – N. 3. – 2018. – P. 52–58.
17. Krol O., Sokolov V. Rational choice of machining tools using prediction procedures // EUREKA: Physics and Engineering. – N 4. – 2018. – P. 15–20.
18. Krol O.S., Sokolov V.I. Parametric Modeling Of Machine Tools For Designers. – Sofia: Prof. Marin Drinov Academy Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. – 112 p.
19. Кріль О.С. Построение параметрических моделей ременных передач с использованием системы APM WINMACHINE / Восточноєвропейський журнал передових технологій. – Харків, 2012. № 2/7(62). – С. 61 – 63.
20. Krol O., Osipov V. Modeling of construction spindle's node machining centre / TEKA Comission of Motorization and Power Industry of Agriculture. – OL PAN, 2013, Vol.13, № 3, Lublin, Poland. – P. 108 – 114.
21. Krol O., Sokolov V. Modelling of spindle nodes for machining centers // Journal of Physics: Conference Series. – Vol. 1084, 012007 (2018).
22. Krol, O., Sokolov, V.: 3D modelling of angular spindle's head for machining centre. Journal of Physics: Conference Series. – Vol.1278, 012002 (2019).
23. 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.
24. 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. – Х: НТУ «ХПІ» – № 16(989), 2013. – С. 14 – 18.
25. Кріль О.С. Методы и процедуры 3D-моделирования металлорежущих станков и инструментов – Северодонецк: изд-во ВНУ им. В.Даля, 2015. – 120 с.
26. Кріль О.С. Методы и процедуры оптимизации режимов резания: монография. – Луганск: ВНУ им. В.Даля, 2013. – 260 с.
27. Кріль О.С., Хмеловский Г.Л. Оптимизация и управление процессом резания: учебное пособие. – К: УМК ВО, 1991. – 140 с.
28. Krol, O., Sokolov, V. (2018). Modeling Carrier System Dynamics for Metal-Cutting Machines. 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), IEEE. – P. 1–5.

References

1. Krol O., Shumakova T., Sokolov V. Design metal cutting instruments by dint of system of KOMPAS. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2013. – 144 p.
2. Krol O., Sokolov V.: Parametric Modeling of Gear Cutting Tools. In: Advances in Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 4, pp. 3-11. Springer, Cham (2019).
3. Li K. Osnovyi SAPR (CAD/CAM/CAE). – Spb.: Piter, 2004. – 560 s.
4. Kirichek A.V., Afonin A.N. Proektirovanie metalloobrabatyvayuschih instrumentov i tehnologicheskoy osnastki v T-FLEX CAD: Ucheb. Posobie. – M.: Mashinostroenie, 2007. – 158 s.
5. Shelofast V.V., Chugunova T.B. Osnovyi proektirovaniya mashin. Primeryi resheniya zadach. – M.: Izd-vo APM, 2004. – 240 s.
6. Kunderák, J., Mitsyk, A., Fedorovich, V., Morgan, M., Markopoulos, A.: 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 12(19), 3054 (2019).
7. Romanchenko O.V. Vibir sistemi sinhronizatsiyi elektroprivoda dovgomirnih vibratsiyniy verstativ / Visnik NTU "HPI". Seriya: Mehaniko-tehnologichni sistemi ta kompleksi. – 2015. – No 52(1162). – S. 13–22.
8. Romanov V.F. Raschet zubchatyih instrumentov. – M.: Mashinostroenie, 1969. – 201 s.

9. Melkonov G., Vetryak E. Udoskonalennya tokarnogo verstata 1A62 (16K20) shlyahom zamini standartnogo vuzla vstanovlenniam vzaemo peresuvnogo riztsetrimacha dlya obrobki detaley z malim diametrom pri vidriznih operatsiyah / Visnik Shidnoukrayinskogo natsionalnogo universitetu imeni Volodimira Dalya, No 1(249), 2019. – S. 23–25.
10. Krol O.S. Parametricheskoe modelirovanie metallovezhushchih stankov i instrumentov. Monografiya. Lugansk: SNU im. V. Dalya, 2012. – 116 s.
11. T-FLEX CAD 7.0 - Rossiyskaya SAPR novogo pokoleniya na yadre Parasolid/ KompyuterPress, No 7, 2000. – S. 31–37.
12. Shustikov I. Parametrizatsiya v T-FLEX CAD 3D 8.0/ SAPR i grafika, No. 10, 2003. – S.56–64.
13. Zamriy A.A. Prakticheskiy uchebnyiy kurs SAD/CAE APM WinMachine. Uchebno-metodicheskoe posobie. – M.: Izd-vo APM, 2007. – 144 s.
14. Krol O., Sokolov V.: Parametric Modeling of Transverse Layout for Machine Tool Gearboxes. In: Advances in Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 4, pp. 122–130. Springer, Cham (2019).
15. Krol O.S., Krol A.A. Parametrizatsiya poperechnih komponovok privoda glavnogo dvizheniya // Nadlynst Instrumentu ta optimizatsiya tehnologichnih sistem. Zbirnik naukovih prats. – Kramatorsk: vip.24, 2009. – S. 164 – 168.
16. Krol O., Tsankov P., Sokolov V. Rational choice of two support spindles for machining centers with lubrication system // EUREKA: Physics and Engineering. – N. 3. – 2018. – P. 52–58.
17. Krol O., Sokolov V. Rational choice of machining tools using prediction procedures // EUREKA: Physics and Engineering. – N 4. – 2018. – P. 15–20.
18. Krol O.S., Sokolov V.I. Parametric Modeling Of Machine Tools For Designers. – Sofia: Prof. Marin Drinov Academy Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. – 112 p.
19. Krol O.S. Postroenie parametricheskikh modeley remennyih peredach s ispolzovaniem sistemyi ARM WINMACHINE / Vostochnoevropeyskiy zhurnal peredoviyh tehnologiy. – Harkov, 2012. No. 2/7(62). – S. 61 – 63.
20. Krol O., Osipov V. Modeling of construction spindle's node machining centre / TEKA Comission of Motorization and Power Industry of Agriculture. – OL PAN, 2013, Vol.13, № 3, Lublin, Poland. – P. 108 – 114.
21. Krol O., Sokolov V. Modelling of spindle nodes for machining centers // Journal of Physics: Conference Series. – Vol. 1084, 012007 (2018).
22. Krol, O., Sokolov, V.: 3D modelling of angular spindle's head for machining centre. Journal of Physics: Conference Series. – Vol.1278, 012002 (2019).
23. 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.
24. Krol O.S., Krol A.A., Burlakov E.I. Tverdotelnoe modelirovanie i issledovanie shpindel'nogo uzla obrabatyvayushchego tsentra / Visnik Natsionalnogo tehnicnogo universitetu «HPI». Seriya: Novi rishennya v suchasnihih tehnologiyah. – H: NTU «HPI» – No. 16(989), 2013. – S. 14 – 18.
25. Krol O.S. Metody i protsedury 3D-modelirovaniya metallorезhushchih stankov i instrumentov – Severodonetsk: izd-vo VNU im. V.Dalya, 2015. – 120 s.
26. Krol O.S. Metody i protsedury optimizatsii rezhimov rezaniya: monografiya. – Lugansk: VNU im. V.Dalya, 2013. – 260 s.
27. Krol O.S., Hmelovskiy G.L. Optimizatsiya i upravlenie protsessom rezaniya: uchebnoe posobie. – K: UMK VO, 1991. – 140 s.
28. Krol, O., Sokolov, V. (2018). Modeling Carrier System Dynamics for Metal-Cutting Machines. 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), IEEE. – P. 1–5.

Кроль О.С. Исследование конструкции и построение параметрических и 3D моделей зубонарезной фрезы с фланком

Предложен инструментальный параметрического моделирования в приложении к задачам проектирования и моделирования зуборезного инструмента, работающего по методу обкатки. Разработаны специализированные программы построения параметризованных профилей червячных зуборезных фрез для обработки зубчатых колес. Предложены процедуры построения специализированных графических примитивов для моделирования режущего контура, модифицированного эвольвентного профиля, переходной кривой боковой поверхности зуба фрезы с фланцем. В состав программы параметрического моделирования введен способ верификации допустимых вариантов контуров нерабочей части профиля зуба фрезы. Рассмотрены особенности взаимодействия параметрических профилей в 2D-графическом редакторе APM Graph с последующим экспортом в 3D-редактор APM Studio. Построены трехмерные твердотельные модели червячной зуборезной фрезы в редакторе APM Studio на основе параметризованных графических примитивов. Проведено исследование напряженно-деформированного состояния зуба фрезы методом конечных элементов

Ключевые слова: параметрическая модель, червячная зуборезная фреза, 3D модель, модификация профиля зуба, напряженно-деформированное состояние.

Krol O.S. Research of the design and construction of parametric and 3d models of gear cutting mills with flank

The problem of constructing parametric models of milling gear cutting tools with a modified profile in the form of a flank at the tooth leg is considered. Software for the implementation of the procedure for constructing such unified elements of the tooth profile as the involute profile, as well as once and twice backed posterior surfaces in an Archimedean spiral has been created. The main components of the profile in the form of corresponding graphic primitives for modeling a rack contour, a modified involute profile, a transition curve of the side surface of the cutter tooth with a flange are presented. An algorithm for the interaction of parametric profiles in the two-dimensional graphics editor APM Graph is proposed, followed by implementation in the 3D-editor APM Studio. In the process of parametric description of the complex working profile of the cutter tooth, the syntax of the APM WinMachine system in the shell of the "friendly" interface of this system is used. A particularly effective tool is the ability to create a parameterized database of gear cutting tools with stereotypical elements: an involute profile, a once-backed curve, a twice-backed curve, a transition surface. An algorithm for determining the position of the interface point of the active profile with the transition curve in a parametric form is proposed. A minimum of input parameters has been identified, which allows to accelerate the process of

multivariate design of worm gear cutting mills when changing the designs of machined gear wheels with various modules. 3D models of worm gear cutting mills in the APM Studio editor based on parameterized graphic primitives were developed. In the environment of the three-dimensional editor APM Studio, a finite element mesh was generated with a certain split step. A feature of this generation of the finite element mesh of the working surface of the tooth is the use of an uneven mesh to more accurately fit the finite elements into a complex cross section. The designed structure of the cutter was checked for connectivity before calculation, which allowed to implement the construction of a solid model and perform a complex calculation of a worm gear cutting

mills. The analysis of the stress-strain state of the cutter tooth by the finite element method is presented.

Keywords: *parametric model, worm gear cutting mill, 3D model, modification of the tooth profile, stress-strain state.*

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

Стаття подана 11.02.2020 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-40-45>

УДК 621.9.025.11

ОЦІНКА ПІДДАТЛИВОСТІ ПРУЖНОЇ ЛАНКИ ШПИНДЕЛЬ-РОЗТОЧНА ОПРАВКА В СЕРЕДОВИЩІ APM WINMACHINE

Кроль О.С., Замковець Д.М.

ASSESSMENT OF ELASTIC LINK SPINDLE-BORING ARBOR IN THE APM WINMACHINE ENVIRONMENT

Krol O.S., Zamkovets D.M.

Викладена проблема аналізу конструкції і побудови моделей шпиндельного вузла на основі критерію жорсткості в середовищі тривимірного графічного редактора. Побудовано універсальне рівняння пружної лінії, для двоопорних розрахункових схем конструкції шпиндельних вузлів, оснащених різноманітним розточним технологічним оснащенням за допомогою метода початкових параметрів. Виконано повний цикл проектування шпинделя, починаючи від розробки конструкції і завершуючи статичним та динамічним розрахунком в середовищі APM WinMachine. Виявлено вплив лінійної та кулової піддатливості опор шпинделя, у вигляді здвоєних радіально-упорних підшипників на характер деформованого стану цього вузла. Використана особливість завдання опор у вигляді жорсткого та пружного закріплення в модулі APM Structure-3D. Дана оцінка пружно-деформованого стану шпинделя та побудовані поля переміщень та напруг в довільних перетинах.

Ключові слова: 3D модель, шпиндельний вузол, розточна оправка, пружно-деформований стан, метод початкових параметрів.

Постановка проблеми. Забезпечення певного рівня точності та вібростійкості верстатів пов'язано з аналізом і визначенням їх жорсткості і податливості. Оцінка раціонального балансу піддатливості верстата є актуальним завданням і може виступати як критерій оптимізації при визначенні статичної жорсткості базових деталей і конструкції в цілому. Вирішальним чином на жорсткість надають формоутворюючі шпиндельні вузли. Так деформації рухомих шпиндельних бабок фрезерних і багатоопераційних верстатів можуть становити до 70% загальної.

Ускладнення розрахунків шпиндельних вузлів на жорсткість і опір пластичних деформацій з урахуванням розподілу та режимів зміни напружень, розмірів і перетинів вимагає застосування розвинених систем автоматизованого проектування. Одним з ефективних засобів вирішення трудомістких проє-

ктних завдань по створенню оптимальних машинобудівних конструкцій є CAD/CAM/CAE/PDM САПР APM WinMachine [1-5]. Найпоширеніше уявлення шпиндельного вузла [6-10], що використовують наближені і уточнені методи розрахунку, розглядає його як лінійно-деформується систему (без урахування кутових піддатливостей опор), в якій переміщення вузлів шпинделя виражається у вигляді лінійної функції прикладених сил не дозволяє вирішити комплексно цю задачу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Ефективність процесу створення металорізальних верстатів залежить від рівня якості формоутворюючих вузлів [11-14]. Вузол Шпинделя (ШВ) є виконавчим органом несучої системи багатоопераційного верстата, робить вирішальний вплив на жорсткість, вібростійкість і продуктивність верстата в цілому [6, 7]. Все більше робіт розглядають шпиндель разом з технологічним оснащенням, формують так звані пружні ланки, наприклад шпиндель-оправка. Оцінка точності шпиндельного вузла з різноманітним технологічним оснащенням здійснюється з урахуванням тієї частини, яку вносить ШВ в сумарну похибку обробки [11]. Ці дослідження показали, що у формуванні показників точності взаємного розташування поверхонь і точності форми вплив шпиндельного вузла становить відповідно 50 ... 80% і 60 ... 90 % в загальному розподілі точності верстата.

Відомі роботи [9, 15], присвячені розгляду формоутворюючих вузлів верстатів як складних механічних систем за допомогою комплексу моделей, що включають:

- упругодеформаційної, визначальну навантаження, деформації та жорсткості ШУ;
- динамічну, визначальну власні частоти і передавальні функції системи;
- вібраційну, визначальну амплітудний спектр швидкостей і переміщень.

Але всі ці моделі розглядали ШВ в 2D- форматі і не надавали повного уявлення про розподіл напружень і переміщень в 3D-просторі і не припускали використання методу Метода Кінцевих Елементів (МКЕ). З іншого боку роботи [16, 17] використовують технології та інструментарій 3D-моделювання без розгляду суттєвого впливу таких розповсюджених опор (які монтується на здвоєних радіально-упорних підшипниках кочення) на загальну піддатливість шпиндельних вузлів. Особливо це торкається впливу кутової жорсткості опор.

Мета статті. Виконати розробку комбінованої проектної процедури оцінювання піддатливості упругої ланки шпиндель-розточна оправка на базі побудови 3D-моделей та оцінки напружено-деформаційного стану в середовищі САПР APM WinMachine

Матеріали та результати дослідження. Розглянемо задачу розрахунку податливості конструкції шпиндельного вузла (шпиндель - розточна оправка) приводу головного руху багатооперційного фрезерно-свердильно-розточувального верстата моделі СФ68ВФ4, яку представляють у вигляді балки постійного перетину на двох шарнірних опорах, розрахункова схема якого приведена на рис.1.

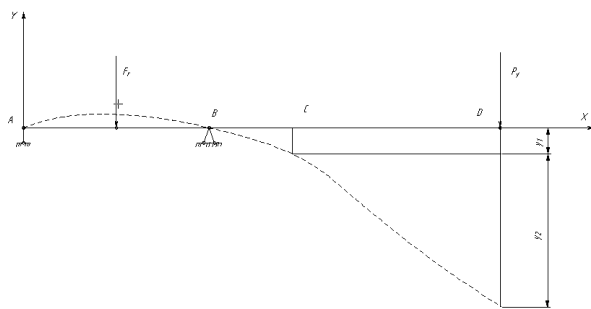


Рис. 1. Розрахункова схема шпинделя (первинне уявлення)

Оцінка деформацій за допомогою методу безпосереднього інтегрування диференціального рівняння пружної лінії шпиндельного вузла є дуже трудомісткою вже при наявності трьох ділянок даної конструкції. Більш ефективний в обчислювальному відношенні метод початкових параметрів [18-20] дозволяє побудувати універсальне рівняння пружної лінії (1), що застосовується для будь-яких розрахункових схем конструкції (характеризується модулем пружності E і осьовим моментом інерції поперечно-го перерізу I).

$$y(x) = \frac{0,34 \cdot 10^7 \cdot x}{E \cdot I} + \frac{297 \cdot (x-148)^3 - 151,67 \cdot x^3 - 36,83 \cdot (x-74)^3}{E \cdot I} \quad (1)$$

На основі універсального рівняння побудовані епюри кутів повороту перерізів і прогинів, що дають уявлення про жорсткість проекрованої конструкції.

Разом з тим розглянута конструкція шпиндель - розточна оправка (шпиндель-консоль) може бути

вирішена в припущенні, що вона є статично невизначеною балкою, яка монтується на двох опорах, що володіють лінійними податливим і кутовими твердостями.

Розглянемо рішення такого завдання в середовищі спеціалізованого модуля APM SHAFT [2, 3], який дозволяє виконати весь цикл проектування валів і осей, починаючи від розробки конструкції і закінчуючи статичним і динамічним розрахунком. У цьому модулі деформований стан вала описується методом Мора, а розкриття статичної невизначеності здійснюється методом сил. На рис. 2 зображені розрахункова схема шпиндель – консоль (представлена в спеціалізованому графічному редакторі APM SHAFT) і результати деформаційного розрахунку – епюри прогинів і кутів повороту (рис. 3).

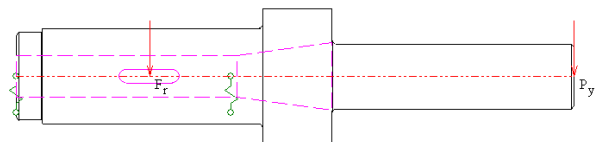


Рис. 2. Розрахункова схема пружної ланки Шпиндель-консоль

Аналіз отриманих результатів, показує наявність значного запасу жорсткості (максимальний прогин на консолі BD (рис. 1) становить $y_{max} = f = 0,0066$ мм, а кут повороту консольного перетину становить $0,000185$ рад). При цьому стріла прогину на міжопорної частини при $[f] = 0,0003 \cdot l$ не повинна перевищувати $y_{max} = 0,0444$ мм. Допустимий кут повороту кінця шпинделя не повинен перевищувати $[\theta] = 0,001$ рад.

Облік лінійної податливості опори (здвоєні радіально-упорні підшипники 4-46112 ГОСТ 831-75 змонтовані за схемою «тандем») $\Delta = 0,25 \cdot 10^{-5}$ мм/Н дозволило уточнити характеристики деформаційного стану: $y_{max} = -0,0537$ мм; $\theta_{max} = 0,000337$ рад.

Разом з тим в модулі APM SHAFT відсутня можливість обліку кутової податливості шпиндельного вузла, що виявляє вплив на деформаційні показники проекрованої конструкції [2].

Для ефективного моделювання, розрахунку напружено-деформованого стану з урахуванням кутової податливості опор використовуємо модуль комплексного аналізу тривимірних конструкцій APM Structure3D [2, 21-24].

В процесі моделювання в середовищі APM Structure 3D створюється «каркасна» модель конструкції (рис. 4), в якій кордон стрижневих 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.

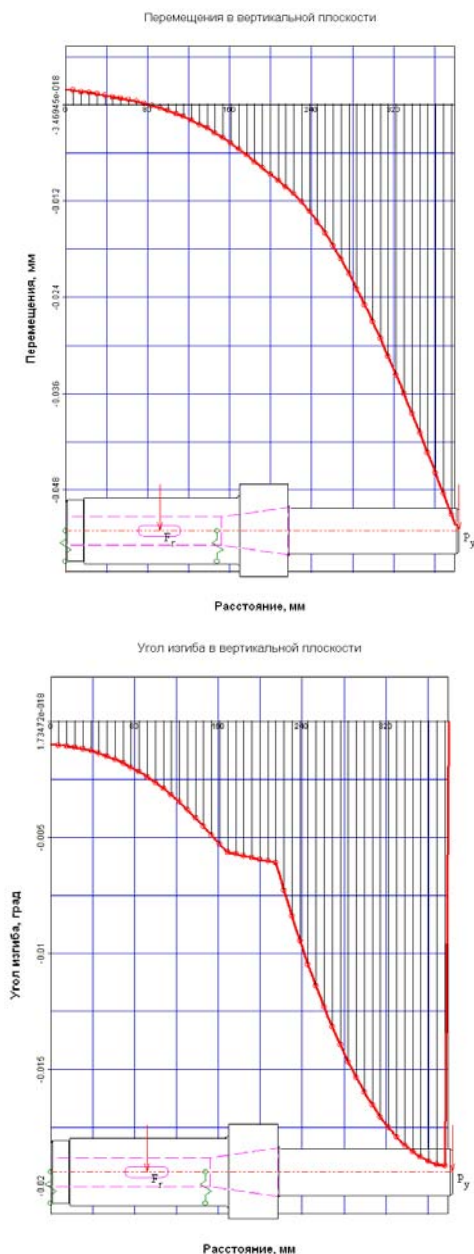


Рис. 3. Деформаційний розрахунок шпиндельного вузла в APM SHAFT

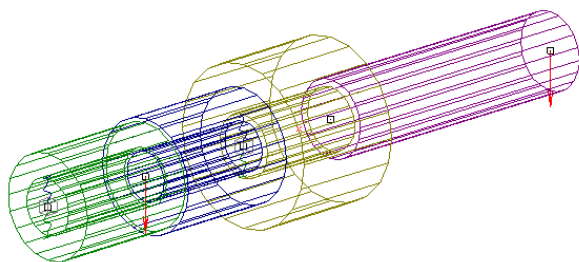


Рис. 4. Каркасна модель конструкції шпинделя

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 абсолютно різними об'єктами. Вони будуть функціонувати разом в тому випадку, коли діють за різними напрямками системи координат в вузлі. Для конструкції, що проектується, дозволені переміщення по напрямку дії сил: P_y (вісь Z), F_r (пружне закріплення), а також поворот навколо осі Z . У режимі завдання жорсткого закріплення, включенням прапорців в полях переміщення в напрямку осі слід задати обмеження по переміщенню у напрямку осей X і Y , а також повороти навколо цих же осей.

Розрахунок в середовищі APM Structure3D [25-28] 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». На рис. 5. представлено поле переміщень, характерне для типової операції розточування, виробленої на багатооперативному верстаті СФ68ВФ4.

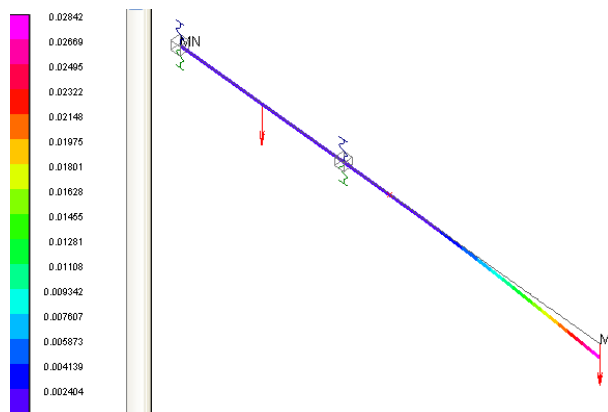


Рис. 5. Елюра переміщень шпиндельного вузла

Максимальні переміщення в консольній частині вузла з урахуванням кутових переміщень складають $y_{\max} = -0,0285$ mm; $\theta_{\max} = 0,000337$ рад.

Висновки. Розроблена комплексна проектна процедура оцінювання напружено-деформаційного стану шпиндельного вузла багатооперативного верстату, що дозволяє надати оцінку балансу піддатливості в різних перетинах конструкції, що досліджується. На аналітичному рівні отримано універсальне рівняння пружної лінії шпинделя методом початкових параметрів, що дозволяє проводити аналіз деформованого стану будь-яких розрахункових схем конструкції. Побудовані 3D-моделі пружної ланки шпиндель-консоль та використан метод кінцевих елементів для оцінки його напружено-деформаційного стану в середовищі САПР APM WinMachine. Аналіз отриманих результатів дозволяє

вибрати найкращі конструктивні рішення, працюючи з різними навантаженими і їх комбінаціями. При цьому з'являється можливість проектувати конструкції близькі до рівномірним за критерієм жорсткості.

Література

1. Кроль О.С., Шевченко С.В., Соколов В.І. Проектування металорізальних верстатів у середовищі APM WinMachine. – Луганськ: ЧНУ ім. В. Даля, 2011. – 388 с.
2. Шелофаст В.В., Чугунова Т.Б. Основы проектирования машин. Примеры решения задач. – М.: Изд-во АПМ, 2004. – 240 с.
3. Замрий А.А. Проектирование и расчет методом конечных элементов трехмерных конструкций в среде APM Structure3D. – М.: Изд-во АПМ, 2006. – 288 с.
4. Krol O., Sokolov V.: Parametric Modeling of Transverse Layout for Machine Tool Gearboxes. In: Advances in Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 4, pp. 122-130. Springer, Cham (2019)
5. Кроль О.С. Параметрическое моделирование металлорежущих станков и инструментов. Монография. – Луганськ: ЧНУ ім. В. Даля, 2012. – 116 с.
6. Kundrák, J., Mitsyk, A., Fedorovich, V., Morgan, M., Markopoulos, A.: 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 12(19), 3054 (2019).
7. Пуш А.В., Зверев И.А. Шпиндельные узлы. Проектирование и исследование. – М.: СТАНКИН, 2000. – 197 с.
8. 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
9. Мелконов Г., Ветряк С. Удосконалення токарного верстата 1A62 (16K20) шляхом заміни стандартного вузла встановленням взаємно пересувного різцетримача для обробки деталей з малим діаметром при відрізних операціях / Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, № 1(249), 2019, с. 23-25.
10. Кроль О.С. Методы и процедуры оптимизации режимов резания: монография. – Луганск: ВНУ им. В.Даля, 2013. – 260 с.
11. Проников А. С., Борисов Е. И., Бушуев В. В. и др. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: Справочник-учебник. В 3-х т. Т. 2. Ч. 1. Расчет и конструирование узлов и элементов станков. – М.: Машиностроение, 1995. – 371 с.
12. Krol O.S., Sokolov V.I. Parametric Modeling Of Machine Tools For Designers. – Sofia: Prof. Marin Drinov Academy Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. – 112 p.
13. Krol O., Osipov V. Modeling of construction spindle's node machining centre / TEKA Commission of Motorization and Power Industry of Agriculture. – OL PAN, 2013, Vol.13, No 3, Lublin, Poland. – P. 108 – 114.
14. Krol, O., Sokolov, V. (2018). Modeling Carrier System Dynamics for Metal-Cutting Machines. 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), IEEE. – P. 1–5.
15. Бушуев В.В. Основы конструирования станков. – М.: Станкин, 1992. – 520 с.
16. Магомедов А., Алехин А. Интегрированный конечно-элементный анализ в КОМПАС-3D / CAD/CAM/CAE observer, 2010. No. 8(60). – С. 1-5.
17. Хомяков В.С., Кочинев Н.А., Сабиров Ф. С. Моделирование и экспериментальное исследование динамики характеристик шпиндельного узла / Известия Тульского Государственного университета. Технические науки, 2011, вып.3. – с. 251-258.
18. 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).
19. Krol, O., Sokolov, V.: 3D modelling of angular spindle's head for machining centre. Journal of Physics: Conference Series 1278, 012002 (2019).
20. Krol O., Sokolov V. Modelling of spindle nodes for machining centers // Journal of Physics: Conference Series. 1084, 012007 (2018).
21. Krol O., Sokolov V.: Parametric Modeling of Gear Cutting Tools. In: Advances in Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 4, pp. 3-11. Springer, Cham (2019).
22. Кроль О.С., Соколов В.І. Тривимірне моделювання металорізальних верстатів та інструментального оснащення. – Северодонецьк: ЧНУ ім. В. Даля, 2016. – 160 с.
23. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Automatic Control System for Electrohydraulic Drive of Production Equipment / 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE. – 2018.
24. Krol O., Osipov V. Modeling of construction spindle's node machining centre / TEKA Commission of Motorization and Power Industry of Agriculture. – OL PAN, 2013, Vol.13, No 3, Lublin, Poland. – P. 108 – 114.
25. Кроль О.С., Кроль А.А., Бурлаков Е.И. Твердотельное моделирование и исследование шпиндельного узла обрабатывающего центра / Вісник Національного технічного університету «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХП» – № 16(989), 2013. – С. 14 – 18.
26. Krol O., Tsankov P., Sokolov V. Rational choice of two support spindles for machining centers with lubrication system // EUREKA: Physics and Engineering. – N. 3. – 2018. – P. 52–58.
27. Krol O., Sokolov V. Rational choice of machining tools using prediction procedures // EUREKA: Physics and Engineering. – N 4. – 2018. – P. 15–20.
28. Кроль О.С., Шумакова Т.О., Соколов В.І. Проектування зуборізних інструментів за допомогою системи КОМПАС. – Луганськ: ЧНУ ім. В. Даля, 2013. – 144 с

References

1. Krol O., Shevchenko S.V., Sokolov V. Design machine tools in environment APM WinMachine. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2011
2. Shelofast V.V., Chugunova T.B. Osnovyi proektirovaniya mashin. Primeryi resheniya zadach. – M.: Izd-vo APM, 2004. – 240 s.
3. Zamriy A.A. Prakticheskiy uchebnyiy kurs SAD/CAE APM WinMachine. Uchebno-metodicheskoe posobie. – M.: Izd-vo APM, 2007. – 144 s.
4. Krol O., Sokolov V.: Parametric Modeling of Transverse Layout for Machine Tool Gearboxes. In: Advances in Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 4, pp. 122-130. Springer, Cham (2019).

5. Krol O.S. Parametricheskoe modelirovanie metallorezhuschih stankov i instrumentov. Monografiya. Lugansk: SNU im. V. Dalya, 2012. – 116 s.
6. Kunderák, J., Mitsyk, A., Fedorovich, V., Morgan, M., Markopoulos, A.: 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* 12(19), 3054 (2019).
7. Push A.V., Zverev I.A. Shpindelnyie uzlyi. Proektirovanie i issledovanie. – M: STANKIN, 2000. – 197 s.
8. 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
9. Melkonov G., Vetryak E. Udoskonalennya tokarnogo verstata 1A62 (16K20) shlyahom zamini standartnogo vuzla vstanovlenniam vzaemo peresuvnogo riztsetrimacha dlya obrobki detaley z malim diametrom pri vidriznih operatsiyah / *Visnik Shidnoukrayinskogo natsionalnogo universitetu imeni Volodimira Dallya*, No 1(249), 2019. – S. 23–25.
10. Krol O.S. Metody i protseduryi optimizatsii rezhimov rezaniya: monografiya. – Lugansk: VNU im. V.Dalya, 2013. – 260 s.
11. Pronikov A. S., Borisov E. I., Bushuev V. V. i dr. Proektirovanie metallorezhuschih stankov i stanochnyih sistem: Spravochnik-uchebnik. V 3-h t. T. 2. Ch. 1. Raschet i konstruirovaniye uzlov i elementov stankov. – M.: Mashinostroenie, 1995. – 371 s.
12. Krol O.S., Sokolov V.I. Parametric Modeling Of Machine Tools For Designers. – Sofia: Prof. Marin Drinov Academy Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. – 112 p.
13. Krol O., Osipov V. Modeling of construction spindle's node machining centre / TEKA Comission of Motorization and Power Industry of Agriculture. – OL PAN, 2013, Vol.13, № 3, Lublin, Poland. – P. 108 – 114.
14. Krol, O., Sokolov, V. (2018). Modeling Carrier System Dynamics for Metal-Cutting Machines. 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), IEEE. – P. 1–5.
15. Bushuev V.V. Osnovyi konstruirovaniya stankov. – M.: Stankin, 1992. – 520 s.
16. Magomedov A., Alehin A. Integrirovannyiy konechno-elementnyiy analiz v KOMPAS-3D / CAD/CAM/CAE observer, 2010. No. 8(60). – C. 1-5.
17. Homiyakov V.S., Kochinev N.A., Sabirov F. S. Modelirovanie i eksperimentalnoe issledovanie dinamiki harakteristik shpindel'nogo uzla / *Izvestiya Tuls'kogo Gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki*, 2011, vyip.3. – s. 251-258.
18. 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).
19. Krol, O., Sokolov, V.: 3D modelling of angular spindle's head for machining centre. *Journal of Physics: Conference Series* 1278, 012002 (2019).
20. Krol O., Sokolov V. Modelling of spindle nodes for machining centers // *Journal of Physics: Conference Series* 1084, 012007 (2018).
21. Krol O., Sokolov V.: Parametric Modeling of Gear Cutting Tools. In: *Advances in Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, vol. 4, pp. 3-11. Springer, Cham (2019).
22. Krol O.S., Sokolov V.I. Trivimirne modelyuvannya metalorizalnih verstativ ta instrumentalnogo osnaschennya. – Severodonetsk: SNU im. V. Dallya, 2016. – 160 s.
23. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Automatic Control System for Electrohydraulic Drive of Production Equipment / 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE. – 2018.
24. Krol O., Osipov V. Modeling of construction spindle's node machining centre / TEKA Comission of Motorization and Power Industry of Agriculture. – OL PAN, 2013, Vol.13, № 3, Lublin, Poland. – P. 108 – 114.
25. Krol O.S., Krol A.A., Burlakov E.I. Tverdotelnoe modelirovanie i issledovanie shpindel'nogo uzla obrabatyvayuschego tsentra / *Visnik Natsionalnogo tehnicnogo universitetu «HPI»*. Seriya: Novi rishennya v suchasnihih tehnologiyah. – H: NTU «HPI» – No 16(989), 2013. – S. 14 – 18.
26. Krol O., Tsankov P., Sokolov V. Rational choice of two support spindles for machining centers with lubrication system // *EUREKA: Physics and Engineering*. – N. 3. – 2018. – P. 52–58.
27. Krol O., Sokolov V. Rational choice of machining tools using prediction procedures // *EUREKA: Physics and Engineering*. – N 4. – 2018. – P. 15–20.
28. Krol O., Shumakova T., Sokolov V. Design metal cutting instruments by dint of system of KOMPAS. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2013. – 144 p.

Кроль О.С., Замковец Д.М. Оценка податливости упругого звена шпиндель-расточная оправка в среде APM WinMachine

Изложена проблема анализа конструкции и построения моделей шпиндельного узла на основе критерия жесткости в среде трехмерного графического редактора. Построено универсальное уравнение упругой линии для двухопорных расчетных схем конструкции шпиндельных узлов, оснащенных разнообразным расточным технологическим оснащением с помощью метода начальных параметров. Выполнен полный цикл проектирования шпинделя, начиная от разработки конструкции и заканчивая статическим и динамическим расчетом в среде APM WinMachine. Выявлено влияние линейной и угловой податливости опор шпинделя, в виде соосных радиально-упорных подшипников на характер деформированного состояния этого узла. Использована особенность задания опор в виде жесткого и упругого закрепления в модуле APM Structure-3D. Дана оценка напряженно-деформированного состояния шпинделя и построены поля перемещений и напряжений в произвольных сечениях.

Keywords: 3D модель, шпиндельный узел, расточная оправка, упруго-деформированное состояние, метод начальных параметров.

Krol O.S., Zamkovets D.M. Assessment of elastic link spindle-boring arbor in the APM WinMachine environment

The rigidity of the spindle assembly design in the environment of the multifunctional three-dimensional graphic editor APM Structure3D was evaluated. When modeling the forming spindle assembly of a multifunctional drilling, milling and boring machine, the assumption of the static indeterminacy of the elastic spindle-boring arbor system is used. In the environment of the specialized APM SHAFT module based on the Mohr method, statistical uncertainty was disclosed, which made it possible to form an adequate model of the designed structure. The design scheme of the spindle of a multifunctional machine in the form of a beam on two elastic supports is formed. The design scheme of the spindle of a multifunctional machine in the form of a beam on two elastic supports is

formed. The APM SHAFT module implements a complex calculation of a two-bearing spindle unit based on angular contact ball bearings. Plots of transverse forces and bending moments in the vertical and horizontal planes are constructed. The level of stresses in various sections of the simulated structure is determined and an estimate of the safety factor is obtained. The matrix method of initial parameters is used to determine the equation of the elastic line for the case of spindle assemblies that are mounted on two supports. A variant of the modification of the proposed dependencies associated with a change in the technological equipment used is proposed. A comprehensive design of the spindle, including design and research phases, focused on the analysis of the static and dynamic characteristics of the spindle units. The effect of linear and angular flexibility of the spindle bearings in the form of double angular contact bearings on the nature of the deformed state of this assembly is revealed. The deformation level based on the stress distribution in arbitrary spindle sections is estimated. An analysis of the results showed the operability of the designed construction of the spindle unit and the presence of a

significant margin of rigidity, both in terms of displacements and in the angles of rotation. Accounting for angular compliance clarified the picture of performance, but did not change the main conclusion about performance

Keywords: 3D model, spindle assembly, boring arbor, elastically deformed state, initial parameter 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

Замковець Данило Михайлович – студент групи ПМЕ-19дм, факультет інженерії, кафедра машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк) zamkovets@gmail.com

Стаття подана 11.02.2020 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-46-49>

УДК 004.896

ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ВИВЧЕННІ КУРСУ ПРОГРАМУВАННЯ ВЕРСТАТІВ З ЧПК

Логунів О.М.

USE OF MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES IN STUDY OF CNC MACHINE PROGRAMMING COURSE

Lohunov O.M.

У статті розглядаються питання й проблеми викладання програмування верстатів з ЧПК в умовах економічної та промислової кризи на сході України. Розглянуто сфери застосування такого обладнання. Показаний напрямок його розвитку – розширення областей використання та зниження вартості. Описані основні проблеми – висока вартість і велика різноманітність обладнання та програмного забезпечення. Запропоновані вирішення проблем. Обґрунтоване використання програмування в g-кодах, які підтримує більшість існуючого обладнання. Запропоноване використання програм – емуляторів для перевірки коду без обладнання. Запропоноване використання 3D-принтерів і програм-слайсерів для початкового знайомства з САМ системами та автоматичною генерацією коду. Перераховані особливості, подібності й відмінності найбільш розповсюджених САМ систем. Позначений напрямок розвитку – поглинання одними виробниками інших і інтеграція CAD і САМ систем. Показані основні вимоги до вивчення САМ систем – володіння технікою створення й зміни тривимірних моделей і знання технології машинобудування для завдання технологічних операцій і їх параметрів.

Ключові слова: програмування верстатів з ЧПК, САМ система, слайсер, бекплот.

Постановка проблеми. При загальному кризовому стані промислового виробництва в Україні в цілому і в Луганській області особливо, обладнання з числовим програмним керуванням (ЧПК) і його програмування залишаються затребуваним в самих різних галузях – від виробництва нестандартного обладнання до побутових і декоративних виробів [1-5]. З'явився цілий клас дешевих верстатів різного призначення, що роблять устаткування з ЧПК доступним для все більш широкого кола фахівців, підприємців і аматорів. Разом з тим при вивченні нових технологій програмування цього обладнання виникає ряд проблем, пов'язаних з наявністю великої кількості різних типів верстатів, систем ЧПК, мов програмування, програмних комплексів, призначе-

них для полегшення роботи і розширення можливості програміста. Виробник устаткування, так само як і розробник САМ, рекламує саме свою систему, програма навчання включає саме її і коштує досить дорого. Незважаючи на це, курси від виробника програмного забезпечення найчастіше носять описовий характер, численні можливості пунктів меню програми перераховуються без пояснення того, де і для чого вони застосовуються і без практичного закріплення отриманих навичок. Роботодавець часто бажає найняти навченого фахівця, але не готовий оплачувати навчання. Доступ учнів до дорогого та чутливого до програмних помилок обладнання теж утруднений. Керівництво навчальних закладів бачить труднощі у вигляді високої вартості обладнання і програмного забезпечення.

Поріг входження в розуміння процесів програмування обладнання з ЧПК досить високий, причому потрібне початкове знання не стільки програмування, скільки технології машинобудування та тривимірного моделювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В кінці ХХ століття конкурентна боротьба виробників пристроїв ЧПК привела до того, що закордонні фірми стали проектувати і виробляти свої пристрої з використанням власної спеціалізованої елементної бази, а маленькі фірми були не в змозі конкурувати з такими гігантами, як "Siemens" і "Fanuc" через відсутність на ринку комплектуючих для своїх розробок. В останні роки з розвитком електронної промисловості з'явилася можливість використання надійних уніфікованих промислових модулів, таких як мікрокомп'ютери, датчики, приводи, блоки живлення, силові елементи конструкції і інші частини, що дозволяють використовувати їх у власних розробках. Застосування цих модулів і блоків на порядок підвищило надійність пристроїв ЧПК. Намітилася тенденція до уніфікації, мінімізації, збільшення швидкодії апаратних засобів при збереженні надій-

ності, яка триватиме і в майбутньому. Якщо раніше в основному прості верстатів були викликані виходом з ладу пристроїв ЧПК, то в останні роки таких скарг практично немає.

Програмування в g-кодах. Традиційно викладання програмування ЧПК починається з введення в g-коди стандарту ISO[6-7]. Ці коди не змінювалися з 70 років XX століття та підтримуються більшістю існуючих систем ЧПК.

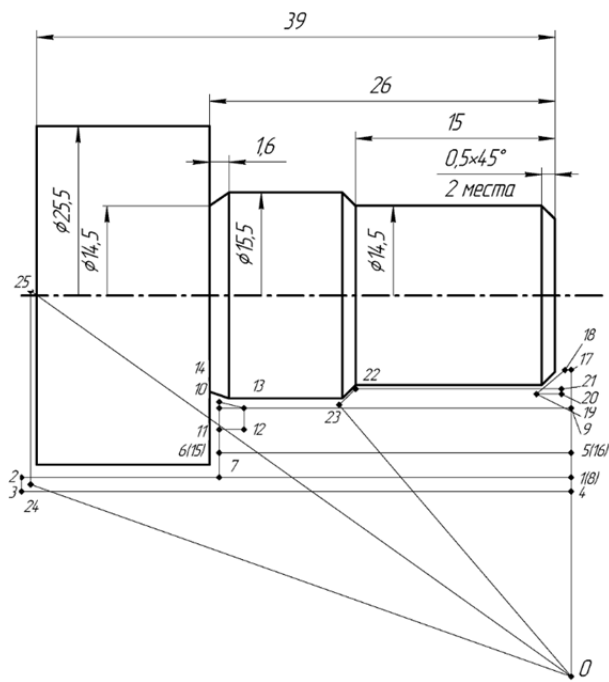


Рис.1. Схема для складання програми токарної обробки вала

Виконана за схемою невелика (кілька десятків рядків коду) програма може бути перевірена без доступу до обладнання. Численні програмні засоби дозволяють як візуалізувати тільки траєкторію переміщення центральної точки інструменту, так званий бекплот, так і провести моделювання обробки з урахуванням реальної геометрії інструменту.

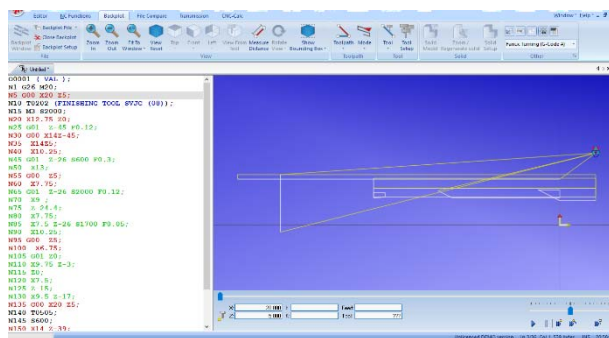


Рис.2. Програма токарної обробки вала та її бекплот, побудований в демо-версії програми SIMCO Edit

Програмування з використанням САМ-систем. Для отримання програми обробки більш

складних деталей використовуються САМ-системи[8]. Програми для 3D принтера отримують тільки за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення - програм слайсерів. Слайсер будує програму в автоматичному режимі, користувач має задати характеристики матеріалу, обладнання, якості друку. Для роботи слайсера необхідна наявність тривимірної моделі об'єкта.

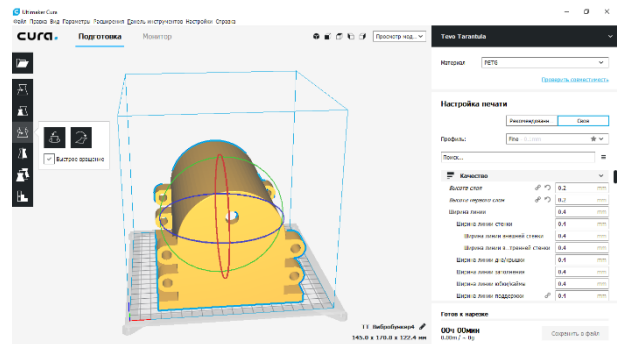


Рис.3. Тривимірна модель віброконтейнера, відкрита у вільному слайсері CURA

Програми для токарних і фрезерних верстатів вимагають від користувача набагато більше дій. Незважаючи на відмінності в інтерфейсі, вартості ліцензії, можливості та переважному призначенні, в САМ системі повинна бути завантажена тривимірна модель виробу, задані інструменти (вручну або з вбудованою бібліотекою інструментів), технологічні операції і їх параметри (глибини і швидкості різання та ін.), стратегії обробки.

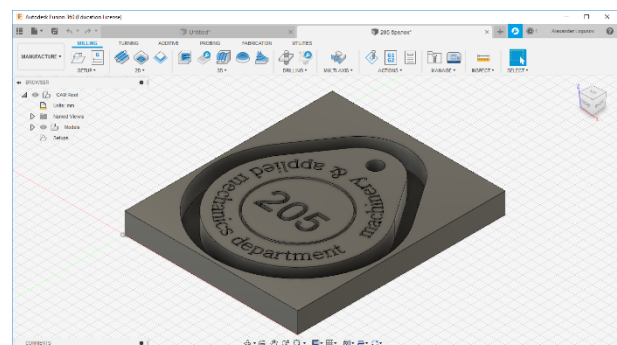


Рис. 4. Тривимірна модель брелка, завантажена в САМ-модуль програми Autodesk Fusion 360 з освітньою ліцензією

В області розробки програмного забезпечення спостерігається ситуація, зворотна ситуації на ринку обладнання, - тобто централізація, поглинання одними виробниками інших і інтеграція CAD, CAM і CAE. Так, компанія Delcam, яка розробила найпопулярніші продукти PowerMill для фрезерної обробки і Artcam для програмування художнього гравірування, була поглинена корпорацією Autodesk, при цьому розробка і підтримка системи Artcam були припинені. Зараз всі популярні сімейства САПР середнього (Autodesk, SolidWorks, Kompas) і важкого (Creo, Catia, Siemens NX) класу включають в себе

CAM-систему, причому вбудовані CAM-системи стають все більш простими у використанні.

Autodesk Fusion 360 надає безкоштовну освітню ліцензію. Для перевірки програми можуть бути використані як вбудовані в CAM-модуль механізми, так і сторонні засоби.

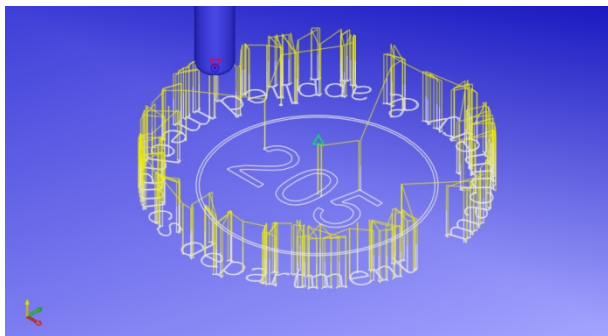


Рис.5. Бекплот гравірувальної операції, побудований в демо-версії програми SIMCO Edit.

Висновки. Вивчення предмета можливо без доступу до дорогого обладнання, тому що призначені для перевірки програм численні засоби імітації, візуалізації і моделювання можуть бути використані в навчанні.

Вивчення програмування верстатів із ЧПК вимагає попереднього знання не програмування взагалі, а технології машинобудування та тривимірного моделювання.

Використання тривимірного моделювання робить вивчення програмування верстатів із ЧПК наглядним та ефективним, дозволяє зацікавити студентів та ознайомити їх з новими технологіями.

Немає особливого значення, яку саме CAD та CAM систему буде використано, тому що найпоширеніші з них мають подібний і більш ніж достатній для використання при вивченні програмування верстатів із ЧПК, функціонал, а модель завжди може бути передана з одного пакету в інший - прямо або через нейтральні файли.

Використання CAD та CAM систем без порушення авторських прав цілком можливе, тому що деякі правовласники надають безкоштовні студентські версії, а інші - пробні версії з достатнім для використання терміном роботи та функціоналом.

Л і т е р а т у р а

1. Krol O., Sokolov V.: Parametric Modeling of Gear Cutting Tools. In: *Advances in Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, vol. 4, pp. 3-11. Springer, Cham (2019).
2. Т.В. Кузнецова.: Моделювання технологічних процесів у Feature Cam на лабораторному практикумі. *Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві*, 2015, вип. 4(11) с.287-290.
3. Калашніков Д. В., Король Д. М., Тончева К. Д., Кіндій Д. Д., Зубченко С. Г.: Переваги та недоліки 3-d моде-

лювання в стоматології. *Вісник проблем біології і медицини* - 2019 - Вип. 3 (152) с.257-260.

4. С.І. Шаповалова, О.М. Бараніченко.: Вдосконалення CAM-систем для невеликих виробництв. *Міжвідомчий науково-технічний збірник «Адаптивні системи автоматичного управління»* № 1 (30) 2017 с.189-197.
5. Повстяной О.Ю.: Застосування CALS-технології для комплексного виготовлення корпусів вододілильників з використанням програмного комплексу Delcam // *Lviv Polytechnic National University Institutional Repository* <http://ena.lp.edu.ua/> 2013. – С. 148-153.
6. Raikovska H., Solovyov A., Melnyk O. The Paradigm Of Training Bachelors In Mechanical Engineering Using Plm-Technologies Of Cad Software // *Physical and Mathematical Education : scientific journal*. - 2017. - Issue 4(14). - P. 78-81.
7. Невлюдов И.Ш., Великодний С.С., Омаров М.А. Использование CAD/CAM/CAE/CAPP при формировании управляющих программ для станков с ЧПУ // *Вост.-Европ. журнал передовых технологий*. - 2010. - № 2/2 (44). -С.37-44.
8. О. Ф. Тарасов.: Автоматизоване проектування і виготовлення виробів із застосуванням CAO/CAM/CAE-систем : монографія / О. Ф. Тарасов, О. В. Алтухов, П. І. Сагайда, Л. В. Васильєва, В. Л. Аносов. - Краматорськ : ЦТPI «Друкарський дім», 2017. - 239 с.

References

1. Krol O., Sokolov V.: Parametric Modeling of Gear Cutting Tools. In: *Advances in Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, vol. 4, pp. 3-11. Springer, Cham (2019).
2. Kuznetsova T.: Modeling of technological processes in Feature Cam in a laboratory workshop. *Informational technologies in education, science and production*, 2015, no. 4 (11) с.287-290.
3. Kalashnikov D., Korol D., Toncheva K., Kindy D., Zubchenko S.: Advantages and disadvantages of 3-d modeling in dentistry. *Bulletin of the Problems of Biology and Medicine* - 2019 - Iss. 3 (152) p.257-260.
4. Shapovalova S., Baranichenko O.: Improvement of CAM systems for small industries. *Interagency Scientific and Technical Collection "Adaptive Automatic Control Systems"* № 1 (30) 2017 p.189-197.
5. Povstyanov O.: Application of CALS-technology for complex manufacturing of water meter housings using Delcam software // *Lviv Polytechnic National University Institutional Repository* <http://ena.lp.edu.ua/> 2013. - P. 148-153 .
6. Raikovska H., Solovyov A., Melnyk O. The Paradigm of Bachelors Training in Mechanical Engineering Using Plm-Technologies Of Cad Software // *Physical and Mathematical Education: A Scientific Journal*. - 2017 - Issue 4 (14). - R. 78-81.
7. Nevlyudov I., Easter S., Omarov M. The use of CAD / CAM / CAE / CAPP in the formation of control programs for CNC machine tools // *East-Europe. advanced technology magazine*. - 2010. - № 2/2 (44). -P.37-44.
8. Tarasov O.: Automated design and manufacturing of products using CAO / SAM / SAE systems: monograph / AF Tarasov O., Altukhov O., Sagaida P., Vasilyeva L., Anosov V. -Kramatorsk: Printing House Center, 2017. - 239 p.

Логунов А.Н. Использование современных информационных технологий при изучении курса программирования станков с ЧПУ

В статье рассматриваются вопросы и проблемы преподавания программирования станков с ЧПУ в условиях экономического и промышленного кризиса на востоке Украины. Перечислены сферы применения такого оборудования. Показано направление его развития – расширение сфер применения и снижение стоимости. Описаны основные проблемы – высокая стоимость и большое разнообразие оборудования и программного обеспечения. Предложены и описаны решения проблем. Обосновано использование программирования в g-кодах, поддерживаемых большинством существующего оборудования. Предложено использование программ – эмуляторов для проверки кода без оборудования. Предложено использование 3d-принтеров и программ-слайсеров для первоначального знакомства с САМ-системами и автоматической генерацией кода. Перечислены особенности, сходства и различия наиболее распространенных САМ-систем. Обозначено направления развития – поглощение одними производителями других и интеграция CAD и САМ систем. Показаны основные требования к изучению САМ систем – владение техникой создания и изменения трехмерных моделей и знание технологии машиностроения для задания технологических операций и их параметров.

Ключевые слова: программирование станков с ЧПУ, САМ система, слайсер, бэкплот.

Lohunov O. Use of modern information technologies in study of CNC machine programming course

The article discusses the issues and problems of teaching the programming of CNC mills in the context of the economic and industrial crisis in eastern Ukraine. The scope of such equipment is listed. The direction of its development is shown - the expansion of applications and cost reduction. The main problems are described - high cost and a wide variety of hardware and software. Proposed and described solutions to problems. The use of programming in g-codes supported by most existing equipment is justified. The use of emulator programs for code verification without equipment is proposed.

The use of 3D printers and slicer programs for the initial acquaintance with CAM systems and automatic code generation is proposed. The features, similarities and differences of the most common CAM systems are listed. The development directions are indicated - absorption by some manufacturers of others and integration of CAD and CAM systems. The basic requirements for the study of CAM systems are shown — proficiency in the technique of creating and modifying three-dimensional models and knowledge of mechanical engineering technology for setting technological operations and their parameters.

The following conclusions are made:

Studying the programming of CNC machines requires an initial knowledge of not so much programming as mechanical engineering and three-dimensional modeling.

The use of three-dimensional modeling makes the study of programming of CNC machines visual and efficient, allows you to interest the student and familiarize him with the latest technologies.

The choice of a specific product of three-dimensional modeling does not really matter, since the most common professional packages have similar and more than sufficient functionality for studying programming of CNC machines, and the model can always be transferred from one package to another - directly or via neutral files.

The use of software products in the study of programming of CNC machines without copyright infringement is quite possible, because some packages provide free student versions, while others provide trial versions with a useful life even for a term project.

Keywords: CNC programming, CAM system, slicer program, backplot.

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

Стаття подана 29.02.2020 р

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-50-54>

УДК 621.9

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ В ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ COMSOL MULTIPHYSICS

Мелконов Г.Л., Мелконова І.В.

MODELING FEATURES OF MECHANICAL PROCESSES BY USING THE FINITE ELEMENT METHOD IN A PROGRAMMER COMSOL MULTIPHYSICS

Melkonov H.L., Melkonova I.V.

У статті наводиться огляд проблем, що зустрічаються при моделюванні механічних процесів. Так само проведено аналіз застосування модуля «Механіка конструкцій» в програмному середовищі COMSOL Multiphysics для вирішення механічних завдань на прикладі моделі яка представляє собою тонкий металевий лист, який вдавлюється в штамп за допомогою пуансона. При прокаті листового металу явище деформації – є важливим етапом в технологічному процесі. Тому в роботі показана можливість застосування моделювання механічних процесів, як можливість проводити експериментальні дослідження за допомогою COMSOL Multiphysics. Також в роботі проведено аналіз літературних джерел, в яких розглядається питання моделювання механічних і фізичних процесів не тільки в програмному середовищі COMSOL Multiphysics., але і в інших програмних продуктах.

Ключові слова: моделювання механічних процесів, метод скінченних елементів, деформація, пуансон.

Постановка проблеми. Етап технологічної підготовки деталей у виробництві є трудомістким процесом. Якість проведення цього етапу багато в чому визначає витрати самого виробництва, пов'язані безпосередньо з виготовленням деталей, а також з відпрацюванням і доведенням розроблених технологічних процесів. У зв'язку з цим на етапі технологічної підготовки необхідно виявити і усунути всі можливі неточності і помилки, які можуть виникнути при виготовленні деталей. Це можливо за допомогою комп'ютерного моделювання механічних процесів.

Комп'ютерне моделювання посідає провідне місце серед інших методів досліджень, особливо завдяки наявності сучасних обчислювально-інформаційних комплексів та систем. Такі дослідження дозволяють розрахувати оптимальні вели-

чини геометричних параметрів як різального інструменту так і верстату в цілому.

Під комп'ютерним моделюванням розуміється розробка моделей як в двовимірних так і трьох вимірних, які дозволяють ставити комп'ютерний експеримент із динамічним представленням результатів моделювання на монітор безпосередньо в процесі розрахунку.

Комп'ютерне моделювання - метод вирішення задачі аналізу або синтезу складної системи на основі використання її комп'ютерної моделі. Суть комп'ютерного моделювання укладена в отриманні кількісних і якісних результатів за наявною моделлю. Якісні висновки, одержувані за результатами аналізу, дозволяють виявити невідомі раніше властивості складної системи: її структуру, динаміку розвитку, стійкість, цілісність та ін. Кількісні висновки в основному носять характер прогнозу деяких майбутніх або пояснення минулих значень змінних, що характеризують систему [1].

Існує три основні методи дискретизації математичної моделі при чисельному рішенні поставленої крайової задачі. У ролі крайової задачі виступає система диференціальних рівнянь з заданими умовами на кордоні розрахункової області і з заданими початковими значеннями залежних змінних [2]. найбільш поширеними методами є:

- МКР - метод кінцевих різниць;
- МКО - метод кінцевих обсягів;
- МСЕ - метод скінченних елементів.

Найбільш загальним і досить ефективним методом чисельного моделювання складних систем є метод скінченних елементів (МСЕ) [3].

Основна ідея методу скінченних елементів полягає в тому, що безперервна величина, тобто величина, що визначена нескінченним числом значень,

на розглянутій області апроксимується дискретною моделлю.

На даний час існує багато програмних продуктів заснованих на методі скінченних елементів, наприклад: COMSOL, ANSYS, ABACUS, Elmer та інші.

Але лідером серед усіх є програмний продукт COMSOL Multiphysics.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Результати роботи [4] стосуються холодильної установки рефрижераторного контейнера і спрямовані на розв'язання задачі конвективного теплообміну навколо трубчатого випарника із вентилятором примусового обдування, які розташовано в металевому кожусі. Постановку задачі та її моделювання виконано для двовірної системи координат, а для її вирішення застосовано програмне середовище COMSOL Multiphysics, Femlab 3.0, Fluid Dynamics - Incompressible Navier - Stokes - Convection and Conduction. В роботі [5] розглянуто особливості використання в навчальному процесі технологій з створення комплексних моделей динамічних систем на основі використання пакету COMSOL. В роботі [6] викладено основи проектування деталей і вузлів металорізальних верстатів з використанням сучасного програмного продукту APM WinMachine. Показано можливість спільного застосування модулів APM WinMachine з іншими програмними розробками для твердотільного й параметричного моделювання основних елементів конструкцій металорізальних верстатів. Робота [7] містить відомості про методику й процедури 3D- моделювання верстатних систем фрезерувально-свердильно-розточного типу та інструментального забезпечення машинобудівного виробництва. Розглянути базові прийоми розробки ескізів та тривимірних операцій, які задіяні в інтегрованих системах автоматизованого виробництва КОМПАС-3D та APM WinMachine. Використані основні бібліотеки стандартних виробів, валів та механічних передач, скінчено-елементного аналізу (модуль APM FEM), які прискорюють роботу конструктора та значно зменшують термін процесу.

Мета статті. Метою роботи є дослідження модуля «Механіка конструкцій» в програмному середовищі COMSOL Multiphysics, для можливості отримання відповідей на питання, що стосуються, наприклад, рівнів напруги і деформації, жорсткості і податливості, власних коливань, відгуку на динамічні навантаження і нестійкості конструкції.

Матеріали і результати дослідження. Програмний комплекс COMSOL Multiphysics – це потужний засіб для вирішення складних завдань, супроводжуваних великими обсягами обчислень. Можливість вирішувати той чи інший клас задач реалізована у вигляді спеціальних прикладних режимів, при завантаженні яких автоматично вибирається потрібна система рівнянь, в якій необхідно тільки задати коефіцієнти і граничні умови. В COMSOL Multiphysics доступні для вирішення класи задач

електростатики, електродинаміки, електромагнетизму, акустики, теплопереносу, теорії пружності, гідродинаміки, а також класичні диференціальні рівняння, такі як рівняння Шредінгера, рівняння Гельмгольца, рівняння теплопровідності, хвильове рівняння і інші. У вищевказаних класах завдань допускається вирішувати, стаціонарні, тимчасові завдання, завдання на власні значення, а також параметричні завдання [1].

Модуль «Механіка конструкцій» є розширенням платформи COMSOL Multiphysics, яке містить інструменти і функції моделювання, призначені для аналізу механічних процесів у твердих конструкціях. Даний модуль використовується в різних областях, до яких відноситься машинобудування, будівництво, геомеханіка, біомеханіка і мікроелектромеханічні пристрої [1-3].

Для прикладу [8] розглянемо модель представлену на рис. 1. Тонкий металевий лист вдавлюється в штамп за допомогою пуансона. Як зміщення при стисненні, так і звільнення пуансона моделюються для обчислення кута формування (при максимальному зміщенні пуансона) і кута після звільнення пуансона.

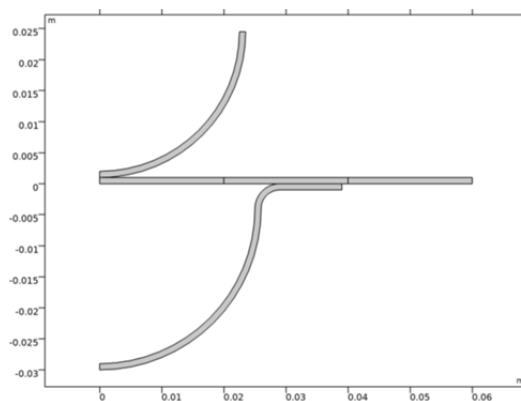


Рис. 1. Геометрія моделі: пуансон зверху, тонкий лист посередині і штамп в нижньому положенні.

Геометрія складається зі збірки, що складається з трьох частин: пуансона, матриці і 1 мм. листа металу. Через симетрії представлена тільки одна половина геометрії. Фігура 1 показує геометрію, яка використовується в моделі.

Допущення плоскої деформації тут справедливе, так як товщина листа поза площиною велика. Заготівля, використовувана в експериментах, являє собою алюмінієвий сплав 6111-T4, має ізотропний модуль Юнга 70,5·10³ МПа і коефіцієнт Пуассона 0,342. Початкова напруга матеріалу становить 194 МПа, а для підвищення міцності використовується функція зміцнення Холломоуна.

Функція зміцнення Холломоуна є двухфакторною і описується формулою:

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad (1)$$

Тут $K=550,4$ МПа, а $n=0,223$. Для підвищення точності умов контакту і сил, використовується розширений метод Лагранжа.

Тертя між тонким листом і інструментами визначається за допомогою коефіцієнта тертя 0,1342.

У табл. представлені розрахункові дані в програмному комплексі COMSOL, дані для кута формування і кута після випуску.

Таблиця

Вихідний кут після навантаження

Формуючий кут (градуси)	Кут після виходу (градуси)
19.6–21.0	53.4–55.8

На рис. 3 видно, що максимальне значення пластичної деформації становить близько 2%, що підтверджує припущення про малої деформації.

На рис. 4.а показано положення заготовки в матриці для вирішення проблеми тертя. З лівого боку, навантаження передається в штамп (зверху вниз). З правого боку можна побачити стадію вивільнення, коли пуансон поза матриці.

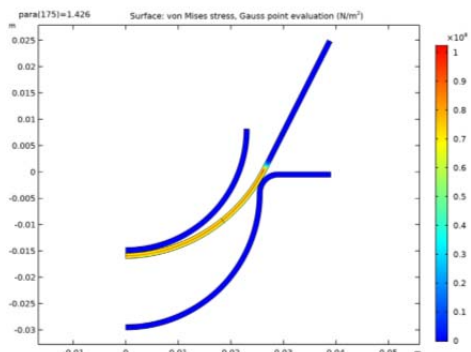


Рис. 2. Розподіл залишкових напружень і деформована форма після випуску з урахуванням сил тертя

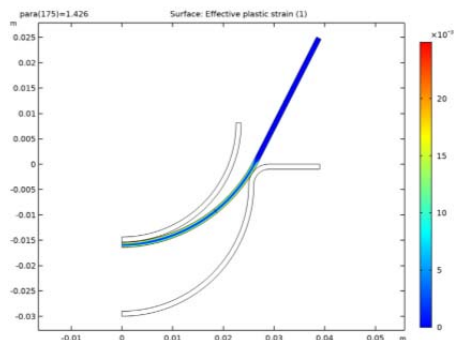


Рис. 3: Ефективна пластична деформація при максимальному відхиленні Пуансона.

На рис. 4.б показано положення заготовки в матриці для тертя. З лівого боку пуансон входить в матрицю (зверху вниз). З правого боку можна спостерігати стадію вивільнення, коли пуансон знятий з матриці (зверху вниз).

Через комбінації таких чинників як: тертя і контакт моделі пружно-пластичного матеріалу і геометричної нелінійності моделі, необхідно ручне налаштування вирішувача в програмі COMSOL, щоб отримати правдиві результати.

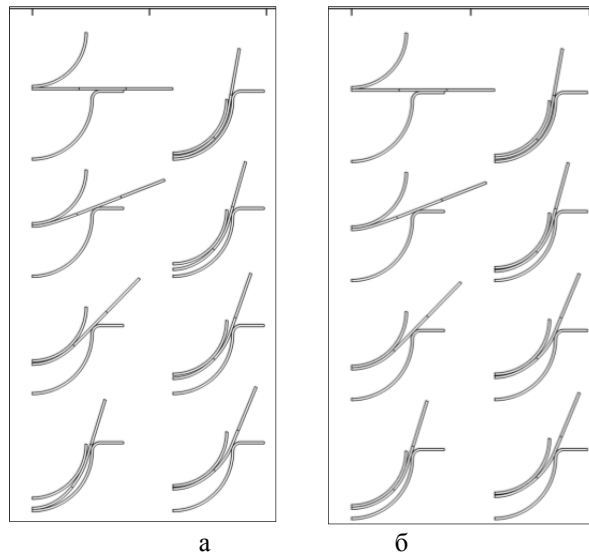


Рис. 6. Деформована форма заготовки в матриці: а – без тертя, б – включаючи тертя

На рисунку 7 показані сили удару по відношенню до зсуву пуансона. Можна чітко помітити ефект тертя до прикладеного навантаження.

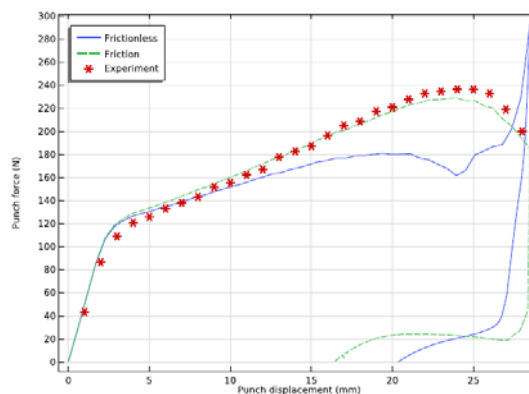


Рис. 7. Сили удару по відношенню до зсуву пуансона

У моделі без тертя, розрахункові сили в процесі формування мають два піки. Сили продовжують збільшуватись, щоб отримати заготовку всередині прес-форми. Безпосередньо перед тим, як пуансон досягає форми, заготовка стосується нижньої частини матриці, і зусилля значно збільшується, щоб завершити етап формування. На етапі звільнення сили удару продовжують зменшуватись, коли удар повертається у вихідне положення. При додаванні тертя, що додається навантаження значно відрізняється. Перш за все, це вимагає більш високих навантажень, щоб отримати заготовку в матрицю. По-друге, спостерігається тільки один пік під час етапу форму-

вання, так як заготовка не торкнеться нижньої частини штампа. Під час стадії вивільнення, також спостерігається максимум, що пояснюється дією сили тертя.

В даному прикладі необхідно використовувати однакові постійні величини, для збереження однакової жорсткості при початковому положенні заготовки та при передбачуваній деформації.

Висновки. У процесі виробництва, часто виникає проблема виготовлення деталей, які мають високу складність, що призводить до складності проектування їх технологічних процесів виготовлення. У практиці виготовлення складних деталей, таких як, корпусні деталі, вали, осі, виникають проблеми із забезпеченням заданої точності, деформації та інше. Найчастіше нормовані параметри точності для перерахованих деталей мають просторовий характер. Оцінка дійсної точності при реалізації тієї чи іншої схеми обробки є скрутною.

Оскільки розробка аналітичних моделей, які вирішують завдання різних механічних процесів у виробництві може бути ускладнено, то можуть використовуватися чисельні і чисельно-аналітичні моделі. Моделювання фізичних і механічних процесів може здійснюватися з використанням чисельних моделей, заснованих на методі скінченних елементів. Моделювання ймовірних процесів вимірювання геометричних параметрів може здійснюватися з використанням чисельних моделей. У роботі на прикладі показано, доцільність використання комп'ютерного моделювання при розрахунку механічних процесів. Моделювання в програмному середовищі COMSOL Multiphysics має широкі можливості для побудови потрібної моделі, а також розрахунку і вимірювання необхідних параметрів, не проводячи для цього практичних та експериментальних досліджень.

Л і т е р а т у р а

1. Борисов А.В. Численное моделирование физических процессов с применением метода конечных элементов на базе COMSOL Multiphysics / А.В. Борисов, А.А. Воронцов. – Томск, 2010. – 92 с.
2. Красников Г. Е. Моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphysics / Г.Е. Красников, О.В. Нагорнов, Н.В. Старостин. – М: НИЯУ МИФИ, 2012. – 184 с.
3. Жидков Е.П. Комплекс программ для моделирования / Е.П. Жидков, С. Лима, Полякова Р.В. и др. – Дубна, 1993.
4. Байдак, Ю., Смик, В. Моделювання задачі конвективного теплообміну з поверхні випарника холодильної установки рефрижераторного контейнера // Refrigeration Engineering and Technology. – N 52. – 2016. – Р. 5-10.
5. Коваль О.А., Петрукович Д.Є. Особливості використання Comsol Multiphysics для мультифізичного моделювання процесів в механічних системах. Впровадження технологій комп'ютерного моделювання для підвищення якості підготовки фахівців з будівельної та машинобудівельної галузей: Наукові праці Міжнарод-

ної науково-практичної конференції. – Харків: ХНАДУ, 2016. – С. 47–48.

6. Кроль О.С., Шевченко С.В., Соколов В.І. Проектування металорізальних верстатів у середовищі APM WinMachine. – Луганськ: ЧНУ ім. В. Даля, 2011. – 388 с.
7. Кроль О.С., Соколов В.І. Тривимірне моделювання металорізальних верстатів та інструментального оснащення. – Сєверодонецьк: ЧНУ ім. В. Даля, 2016. – 160 с.
8. COMSOL Multiphysics, Available at: <https://www.comsol.com/>

References

1. Borisov A.V. Numerical modeling of physical processes using the finite element method based on COMSOL Multiphysics / A.V. Borisov, A.A. Vorontsov, Tomsk, 2010
2. Krasnikov G. E. Modeling of physical processes using the Comsol Multiphysics package / G.E. Krasnikov, O.V. Nagornov, N.V. Starostin., NRNU MEPhI, 2012 . 184 p.
3. E.P. Zhidkov, S. Lima, Polyakova R.V. A set of programs for modeling. Dubna, 1993.
4. Baidak, Yu., Smik, V. Model of the problem of convective heat exchange from the top of a steam tank of a refrigeration unit of a refrigerator container. Refrigeration Engineering and Technology. - N 52. - 2016. - P. 5-10.
5. Koval O.A., Petrukovich D.E. Features of Comsol Multiphysics for multiphysics modeling processes in mechanical systems. In-process technology of computer model for audio and video production of weekly and machine-related gadgets: Scientific and practical international conference. KHNADU, Kharkiv., 2016 .P. 47–48.
6. Krol O., Shevchenko S.V., Sokolov V. Design machine tools in environment APM WinMachine. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2011.
7. Krol O.S. Three-dimensional modeling of machine tools and tool equipment. Handbook. / O.S. Krol, V.I. Sokolov. – Severodonetsk: VDEUNU, 2016. – 160 p.
8. COMSOL Multiphysics, Available at: <https://www.comsol.com/>

Мелконов Г.Л., Мелконова И.В. Особенности моделирования механических процессов с помощью метода конечных элементов в программной среде COMSOL Multiphysics

В статье приводится обзор проблем, встречающихся при моделировании механических процессов. Так же проведен анализ применения модуля «Механика конструкций» в программной среде COMSOL Multiphysics для решения механических задач на примере модели которая представляет собой тонкий металлический лист, который вдавливаются в штамп с помощью пуансона. При прокате листа металла явление деформации - является важным этапом в технологическом процессе. Поэтому в работе показана возможность применения моделирования механических процессов, как возможность проводить экспериментальные исследования с помощью COMSOL Multiphysics. Также в работе поведен анализ литературных источников, в которых рассматривается вопрос моделирования механических и физических процессов не только в программной среде COMSOL Multiphysics, но и в других программных продуктах.

Ключевые слова: моделирования механических процессов, метод конечных элементов, деформация, пуансон.

Melkonov H.L., Melkonova I.V. Modeling features of mechanical processes by using the finite element method in a programmer COMSOL Multiphysics

The article provides an overview of the software necessary for modeling mechanical processes. Established simulation advantage in comparison with analytical methods of calculation. Analysis of the use of the module "Mechanics of Structures" in the COMSOL Multiphysics software environment for solving mechanical problems using the model which represents the thin sheet metal which is pressed into the die using the punch. In sheet metal forming processes, the springback phenomena caused by the material elastic recovery behavior makes the formed part partially return to its original shape during the release of the forming load. It is important to predict the springback accurately as the final deformed shape differs slightly from the shape given by the die at full forming load. The target results consist in the forming angle, the angle after release, and the punch forces as function of the punch displacement. When rolling a sheet of metal, the phenomenon of deformation is an important step in the process. The paper shows how the material and the structure itself behave during deformation. Therefore, the work shows the possibility of applying the simulation of mechanical processes, as the ability to conduct experimental studies using COMSOL Multiphysics. Also in the work the analysis of literary sources, in which the issue of modeling mechanical and physical processes is considered not only in the COMSOL Multiphysics

software environment, but also in other software products. An advantage, in comparison with other software systems, Comsol Mutiphysics has its interface. To use it, you do not need to write partial differential equations, although he uses them, you do not need to build a finite element grid - he forms it himself. The calculation of the impact forces with respect to the displacement of the punch, as well as the nature of the distribution of power installed. By using numerical simulation, it is possible to determine the most rational design option and parameters taking into account the current load and characteristics of product's construction.

Keywords: *modeling of mechanical processes, finite element method, deformation, punch.*

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

Мелконова Інна Вікторівна – старший викладач кафедри електричної інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк) inna.mia.lg@gmail.com

Стаття подана 23.02.2020 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-55-65>

УДК 624.9.048

РОЗВИТОК ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ ВІЛЬНИМ АБРАЗИВНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ В КОЛИВНИХ РЕЗЕРВУАРАХ І ФОРМУВАННЯ ЇХ ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ

Міцник А.В.

DEVELOPMENT OF PROCESSES WITH A FREE ABRASIVE MEDIUM TREATMENT IN OSCILLATING RESERVOIRS AND THE FORMATION OF THEIR PHYSICAL AND TECHNOLOGICAL CAPABILITIES

Mitsyk A.V.

Проведено структурований аналіз процесів віброобробки та дана класифікація відповідних операцій, що застосовуються в металообробних виробництвах. Розглянуто процеси очисної та мийної обробки, тобто операції видалення з поверхні деталей залишків формувальної суміші, окалини, пригару, корозії, припою, шламу і різних забруднень після лиття, кування, штампування і термообробки. Зазначено, що доробні процеси віброобробки являють собою технології видалення з поверхні деталей облоя, задирок, заокруглення гострих кромek після лиття, холодного штампування та обробки лезовим інструментом на металорізальних.

Ключові слова: віброобробка, коливний резервуар, робоче середовище, задирка, технологічний параметр, класифікація операцій, шорсткість поверхні

Вступ. Універсальні технологічні можливості процесів обробки сипучим гранульованим середовищем в коливних резервуарах, продуктивність і економічність при виконанні оздоблювально-захищувальних операцій забезпечили їм широке поширення в сучасному машинобудуванні [1 – 6].

Інтенсивність протікання процесу віброобробки та реалізація її можливостей визначаються основними параметрами технології. При цьому швидкість зіткнення гранул в потоках робочого середовища, що циркулює в коливному резервуарі виброверстата досягає 0,5 ... 1,0 м/с, прискорення 20...150 м/с², сила зіткнення гранул і деталей становить 13 ... 30 Н і більше. Контактні тиски в зоні зіткнень $7 \cdot 10^3$... $15 \cdot 10^3$ Н/мм², що забезпечує деформацію і руйнування матеріалу оброблюваних деталей при видаленні дефектів після попередніх технологічних процесів виготовлення деталей.

Високоєфективні процеси віброобробки в виробництві деталей повинні забезпечувати задані кресленням вимоги до якості при найменшій собіва-

ртості продукції і максимальній продуктивності, що вимагає створення прогресивних технологій. Виходячи з практики віброобробки, проектуванню відповідних технологій повинен передувати аналіз вихідного стану оброблюваних деталей на технологічність. У зв'язку з цим розглянуті деякі чинні підходи до технологічного проектування, прийняті в технології машинобудування.

В роботі [7, 8] зроблена спроба аналізу стану поверхні деталей, у виробництві яких використовуються віброоброблюючі технології. Відзначається, що «... оброблювані без закріплення деталі розділені по поверхнях, формі й жорсткості на три групи: перша – деталі простої форми з обробкою по зовнішній поверхні та деталі з отворами, пазами та порожнинами, що не підлягають обробці; друга – деталі з отворами, пазами та порожнинами, які вимагають обробки; третя – тонкостінні деталі та деталі складної форми». Поряд з цим вказується на необхідність уточнення розмірних ознак. Так, «... великі деталі – з розміром одного параметра від 100 ... 300 мм і вагою до 3 кг; середні деталі – з розміром одного параметра 30 ... 100 мм і вагою до 1 кг; дрібні деталі з розміром одного параметра 10 ... 30 мм і вагою до 200 г; дуже дрібні деталі – з розміром одного параметра до 10 мм при будь-якій вазі».

Такий підхід до технології віброобробки, має дуже поверховий характер через відсутність зв'язку технології з фізико-механічними властивостями матеріалу оброблюваних деталей, а також відсутність залежностей розмірів і конструктивних особливостей резервуарів виброверстата від розмірів оброблюваних деталей, що забезпечує рівномірну об'ємну обробку всіх їх поверхонь при стабільній циркуляції робочого середовища.

Разом з тим, відсутня інформація про кількість технологічних переходів, які необхідні при досяг-

ненні кінцевого результату обробки. Такі дані в умовах сучасного виробництва є пріоритетними, тому що характеризують економічну ефективність застосування методу обробки для забезпечення високої якості виробів. Крім того, не враховуються технологічні методи отримання заготовок оброблюваних деталей, що пов'язано з вихідним станом їх поверхні, її дефектами та шорсткістю.

При проектуванні технологій віброобробки зазначені дані впливають на вибір режимів руху резервуара, типу і розміру гранул робочого середовища, складу хімічно-активного розчину, об'ємного співвідношення оброблюваних деталей і абразивних гранул, машинного часу, і інших технологічних параметрів. Такі дані також є основою при формуванні технічних характеристик виброверстатів, що реалізують проектувану технологію.

В роботі [2] зроблена спроба опису технології віброобробки деталей великих розмірів і маси. Зазначено, що «... деталі великих розмірів, співмірні з розмірами резервуара, обробляються нерівномірно по всій поверхні, а їх велика вага може привести до руйнування покриття або стінки резервуара, великі труднощі викликає обробка деталей складної форми». Також наголошується, що технології віброобробки деталей великої довжини типу труб, прутків, профілів, мають особливу специфіку в промисловому впровадженні.

В роботі [9] уточнюються особливості технологій віброобробки довгомірних деталей з малою згинальною жорсткістю типу фрезерованих панелей, стрингерів, лонжеронів, секцій шпангоутів. Оцінювальними параметрами в цій технології приймаються розміри деталей, складність їх форми, вихідний стан, норми точності, матеріал і ін.

Метою досліджень є проведення структурованого аналізу та класифікації процесів оздоблювально-зачищувальної обробки в коливних резервуарах. Наявні дослідження мають суперечливий характер і недостатню повноту, оскільки проводилися на виброверстатах різної конструкції, з різними об'ємами резервуарів, в різних робочих середовищах і за різними методиками. Все це не дозволяє з достатньою для практики вірогідністю порівнювати отримані результати. Поставлена мета є найбільш загальною для всіх процесів віброобробки, що дозволяє інтенсифікувати ці процеси незалежно від характеристик оброблюваних деталей і необхідного кінцевого технологічного результату.

Класифікаційний аналіз операцій віброобробки. Для всебічного розуміння технологічних задач, пов'язаних з проектування процесів віброобробки, проведемо класифікаційний аналіз вібраційних оздоблювально-зачищувальних операцій, які використовуються у виготовленні деталей металообробних виробництв (рис. 1)



Рис. 1. Класифікація вібраційних оздоблювально-зачищувальних операцій, що застосовуються в металообробних виробництвах

Проведення аналізу структуровано в напрямку розгляду типових процесів обробки, що застосовуються при виготовленні широкої номенклатури деталей.

Процеси очисної та мийної обробки. Це технологічні процеси видалення з поверхні деталей дефектів у вигляді залишків формувальної суміші, окалини, пригара, корозії, залишків припою, шламу і різних видів забруднень після лиття, кування, штампування і термообробки. Згадані дефекти зустрічаються в технологіях виготовлення деталей різного призначення. У багатьох випадках очищення деталей передуватиме виконанню наступних технологічних операцій, таких як обробка лезовим або абразивно-алмазним інструментом, пластичне деформування та ін. В деяких випадках очисні операції є остаточними, що забезпечують необхідні експлуатаційні властивості елементів оброблюваних деталей, наприклад, при видаленні формувальної суміші на ділянках конструкції литих деталей, що не піддаються подальшій обробці.

При розгляді очисних операцій контрольованим параметром процесу обробки є ступінь очищення деталей від металевих і неметалевих дефектів, фізично або хімічно з'єднаних з матеріалом деталі. Крім того, контролюється вплив тривалості обробки на чистоту поверхні (рис. 2) [10].

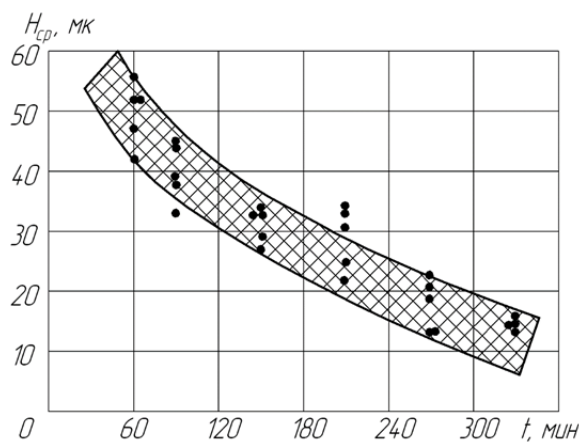


Рис. 2. Вплив тривалості обробки на чистоту поверхні відливок [10]

Як показує досвід впровадження, характеристики робочого середовища і склад хімічно-активних розчинів, що використовуються при віброобробці, безпосередньо впливають на процес очищення литих деталей. Також очевидно вплив на процес очищення й амплітуди коливань резервуара віброверстата. При амплітуді 1,3 ... 1,5 мм і 3,0 ... 3,5 мм час обробки до повного очищення становить, відповідно, 50 ... 60 хв і 25 ... 30 хв.

Розглядаючи фізичне трактування процесів, що відбуваються при виконанні очисних операцій литих деталей [10], можна зробити висновок, що основними складовими цих процесів, що сприяють видаленню дефектів поверхні, є динамічна рухливість сипучого середовища та деталей, а також їх взаємне

зіткнення при змінних прискореннях. Комплексно це забезпечує ударно-хвильовий вплив у вигляді безлічі мікроударів гранул середовища об поверхню деталі [11, 12], що доповнюється дією розклинюючого ефекту Ребіндера (рис. 3) [13], що виникає при використанні хімічно-активного розчину, що сприяє руйнуванню технологічного стику «поверхня деталі – залишки формувальної суміші». Наявність розчину також прискорює видалення продуктів зносу робочого середовища і перешкоджає пилоутворенню.

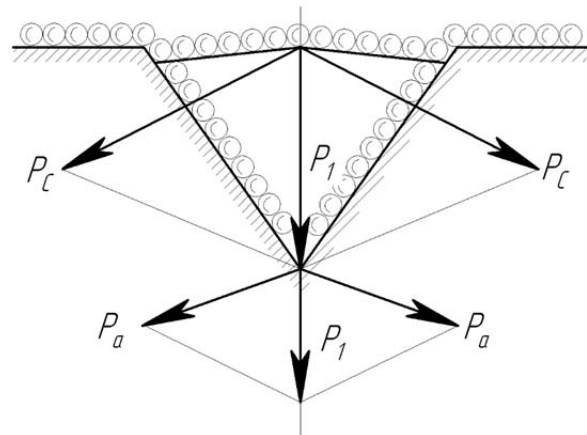


Рис. 3. Схема руйнування технологічного стику «поверхня деталі – залишки формувальної суміші» (розклинюючий ефект Ребіндера) [11]

У роботах [14 – 17] констатується, що конкретна участь перерахованих складових, які супроводжують очисні операції литих деталей, полягає в наступному. Динамічна рухливість гранул середовища і деталей, що виникає під впливом коливного резервуара, взаємне зіткнення гранул і деталей при їх відносному переміщенні зі змінними прискореннями, сприяють відшаруванню найбільших ліквідів з меншою силою зчеплених з поверхнею оброблюваних деталей. Зіткнення деталей з гранулами середовища супроводжується формуванням ударних хвиль, поширення яких в різних робочих середовищах відрізняється за швидкістю, напрямку і часу [18, 19]. Як результат на границі розділу поверхні деталі й залишків формувальної суміші відбувається утворення тріщин, які приводять до відділення найбільших і менш щільно зчеплених з поверхнею деталі залишків формувальної суміші. При цьому відбувається макроочістка, в ході якої видаляється 60 ... 75 % всього обсягу дефектів поверхні [2].

Частина формувальної суміші, що залишилася на поверхні литої деталі видалається під дією безлічі мікроударів гранул робочого середовища, що виконують подальший процес мікроочістки. Руйнування і розпорошення залишків формувальної суміші відбувається в результаті ударної та різальної дії гранул робочого середовища. Істотну роль при мікроочістці грає твердість абразивних зерен матеріалу гранул, яка повинна перевищувати твердість матеріалу, що руйнується, формувальної суміші.

Очевидно, що очищення поверхонь деталей від окалини є результатом ударно-хвильової дії гранул робочого середовища на оброблювані поверхні, яка призводить до сколювання і стирання дефектів, а також впливу хімічно-активних розчинів, що руйнують плівку окалини. Таким чином, основою процесу віброобробки для очищення деталей від окалини є механохімічне руйнування шару окалини і його видалення з поверхні деталі. При розгляді процесу очищення деталей від окалини слід також дати оцінку значенню різальної здатності гранул робочого середовища.

У роботах [20 – 23] показано, що мийку поверхонь деталей, виконувану за допомогою віброобробки, також слід віднести до очисних процесів. Поверхні деталей після різних видів обробки зберігають забруднення, які необхідно видалити перед операціями складання, нанесення покриттів і ін. Для теплообробних виробництв характерними забрудненнями можуть бути залишки дрібної стружки, абразивних матеріалів, емульсії, олій, полірувальної пастки.

Операції мийки та видалення забруднень в загальному випадку супроводжуються механічним впливом безлічі мікроударів гранул робочого середовища і змиванням забруднень хімічно-активним розчином [24 – 26].

Коливальні рухи резервуара віброверстата, а також гранул робочого середовища, забезпечують високу мийну активність розчину, який прискорює процес видалення забруднень. На швидкість протікання операцій мийки та очищення впливають режими обробки, вага і розмір гранул робочого середовища, кількісний і якісний склад хімічно-активного розчину, матеріал і вага оброблюваних деталей, а також характер забруднень [2, 5, 27, 28].

Процеси доробочної обробки. Це технологічні процеси видалення з поверхні деталей дефектів у вигляді облоя, задилок, а також скруглення гострих кромки після лиття, холодного штампування та обробки лезовим інструментом на металорізальних верстатах.

Практика машинобудування показує, що у зв'язку зі зростаючим обсягом виготовлення деталей методами лиття та штампування зростає обсяг робіт з видалення облоя і задилок [4 – 6, 29 – 33]. У віброоброблюючих технологіях процес видалення облоя з поверхні деталей з кольорових металів і їх сплавів, гранулами робочого середовища, складається з обламування окремих пластин облоя з утворенням кромки деталі, що має ознаки крихкого зламу, а також остаточної зачистки залишків облоя і гострих кромки в місцях зламу поверхні.

Роботи [2, 5, 20, 34, 35] виділяються серед публікацій інших авторів широким спектром проведених досліджень, в них підкреслюється, що видалення облоя на стадії його обламування відбувається в результаті динамічного впливу безлічі мікроударів гранул робочого середовища по оброблюваній поверхні деталі. Сила мікроударів гранул і зйом металу

залежить від зернистості матеріалу гранул і їх розміру (рис. 4, а, б). Остаточна зачистка залишків облоя і гострих кромки здійснюється мікрорізання, ефективність якого залежить від різальної здатності абразивних зерен матеріалу гранул робочого середовища. Ефективність технології дороблювальної віброобробки значно зростає при використанні хімічно-активного розчину, що сприяє розпушуванню та інтенсивному мікрорізання нерівностей оброблюваної поверхні деталі.

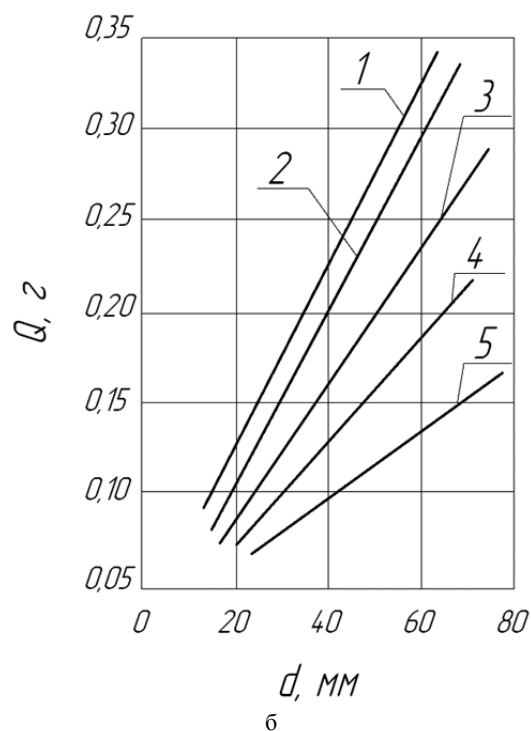
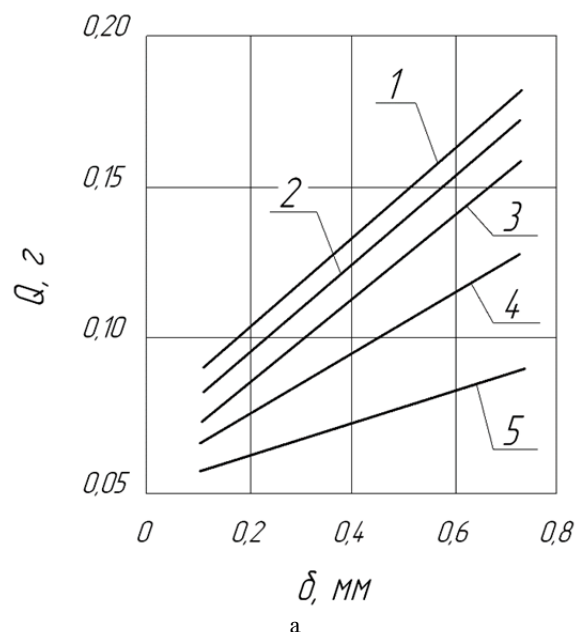


Рис. 4. Залежність зйому Q металу від зернистості δ матеріалу гранул робочого середовища (а) і їх розміру d (б): 1 – Ст 3; 2 – сталь 45; 3 – У10А; 4 – СЧ12-28; 5 – КЧ40-2 [2]

При обробці на металорізальних верстатах на поверхні деталей утворюються задирки й гострі кромки, необхідність видалення яких викликана умовами подальшого складання та експлуатації виробів.

Однією з головних вимог до вихідного стану оброблюваних деталей при виконанні технологічних процесів доробочної віброобробки є регламент товщини задирки біля основи. У нормальних умовах різання лезовим інструментом товщина задирок біля основи не повинна перевищувати 0,15 ... 0,2 мм [5, 23, 36, 37].

Механізм видалення задирок передбачає спільний руйнівний вплив пластичного вигину задирок і їх мікрорізання при зіткненні гранул середовища з поверхнею оброблюваної деталі. До уваги також беруться кут зіткнення гранули та деталі, залежність зйому металу від кута зіткнення, сили зіткнення, амплітуди й частоти коливань резервуара (рис. 5, 6), радіус заокруглення гранули середовища, глибина деформації поверхні, а також границя плинності матеріалу деталі [2, 38].

Товщина задирки, при якій забезпечується пластичний вигин, визначається з виразу:

$$\delta = 4,23 \sqrt{\frac{A\omega^2 S b_{\text{cp}} q \sin \alpha h_3 \eta}{b_3 \sigma_T}},$$

де A , ω – амплітуда та частота коливань резервуара виброверстата; S – площа контакту при зіткненні гранули та деталі; b_{cp} – товщина шару середовища; q – щільність середовища; α – кут зіткнення гранули та деталі; h_3 – висота задирки; η – коефіцієнт корисної дії удару гранули; b_3 – товщина задирки біля основи; σ_T – границя плинності матеріалу деталі.

Фізична сутність технології видалення задирок і округлення гострих кромки, що проводиться процесами мікрорізання і пластичного деформування, забезпечується особливостями механізму віброобробки, а саме властивістю плинності сипучого робочого середовища під дією коливань і його інтенсивним перемішуванням. Встановлена природа протікання процесу віброобробки викликає безперервність руху потоків сипучого середовища в резервуарі, постійне проникнення гранул в глухі та наскрізні отвори, і пази, а також контакт гранул з усіма елементами поверхонь оброблюваних деталей [38 – 41].

Основою операцією видалення задирок і округлення гострих кромки є процес мікрорізання, супроводжуваний зйомом металу і тонким пластичним деформуванням поверхневого шару оброблюваної деталі. У зв'язку з цим у якості робочого середовища при віброобробці застосовуються абразивні гранули, матеріал яких має необхідні різальні властивості [42 – 46].

Розміри оброблюваних деталей і розміри задирок істотно впливають на їх видалення при оздоблювально-зачишувальній обробці [47, 48]. Геометрія деталі також впливає на розмір задирки, утвореного в процесі попередньої обробки та на результати вібраційного видалення задирок. Питання геометрії оброблюваної деталі розглянуто в інших джерелах [49, 50].

На підставі фізичних уявлень про процеси дороблювальної обробки, а також результатів експериментів, в роботах [51 – 54] зазначено, що інтенсивність віброоброблюючих технологій, пов'язаних з видаленням задирок і скругленням гострих кромки, залежить від частоти й амплітуди коливань резервуара, характеристики гранул робочого середовища, кількісного і якісного складу хімічно-активного розчину, а також фізико-механічних властивостей матеріалу оброблюваних деталей.

Процеси шліфування та полірування. Це технологічні процеси, які переслідують своєю метою зменшення шорсткості поверхні оброблюваних деталей, їх підготовку під різні види гальванічних і лакофарбових покриттів, надання поверхням деталей глянцевого відтінку з метою декоративної обробки.

Відомості про те, що утворення мікрорельєфу оброблюваної поверхні в процесі віброшліфування відбувається при нанесенні на поверхню безлічі мікроударів гранул робочого середовища та утворення на поверхні слідів обробки у вигляді кратероподібних заглиблень і подряпин, знаходимо в роботах [2, 5, 6]. Там же зазначено, що найбільш ефективно обробляються відкриті поверхні деталі, до яких забезпечується вільний доступ гранул робочого середовища.

Процеси віброполірування здійснюються як із застосуванням хімічно-активних розчинів, суспензій і паст, так і без них. Характерним для цих технологій є використання робочих середовищ у вигляді м'яких полірувальних матеріалів, таких як деревина, повсть, фетр, шкіра, гума, картон. Широко відомі технології віброполірування, в яких застосовуються металеві робочі середовища, тобто сталеві полірувані кулі, ролики та ін. [2, 5, 35].

В процесі віброполірування зміна шорсткості поверхні відбувається при видаленні окислів металу в точках контакту гранул робочого середовища з поверхнею деталей. Таким чином, основою технології віброполірування є механохімічний процес видалення найдрібніших частинок матеріалу деталі з її оброблюваної поверхні. У зв'язку з цим істотну роль для інтенсифікації та регулювання процесу віброполірування набуває використання хімічно-активних розчинів, які підвищують ефективність обробки у 2 ... 7 разів [2, 5, 27].

Промисловий процес віброполірування деталей в металевих середовищах має свої особливості й відмінності, як від процесу віброшліфування в середовищі абразивних гранул, так і від процесу віброполірування в середовищі м'яких полірувальних матеріалів.

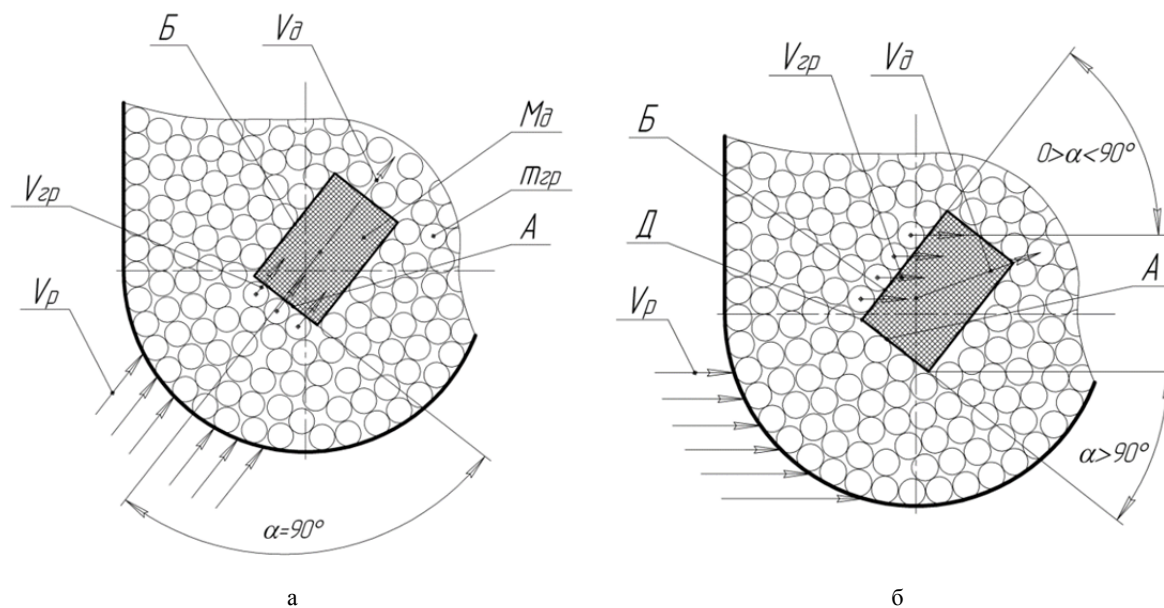
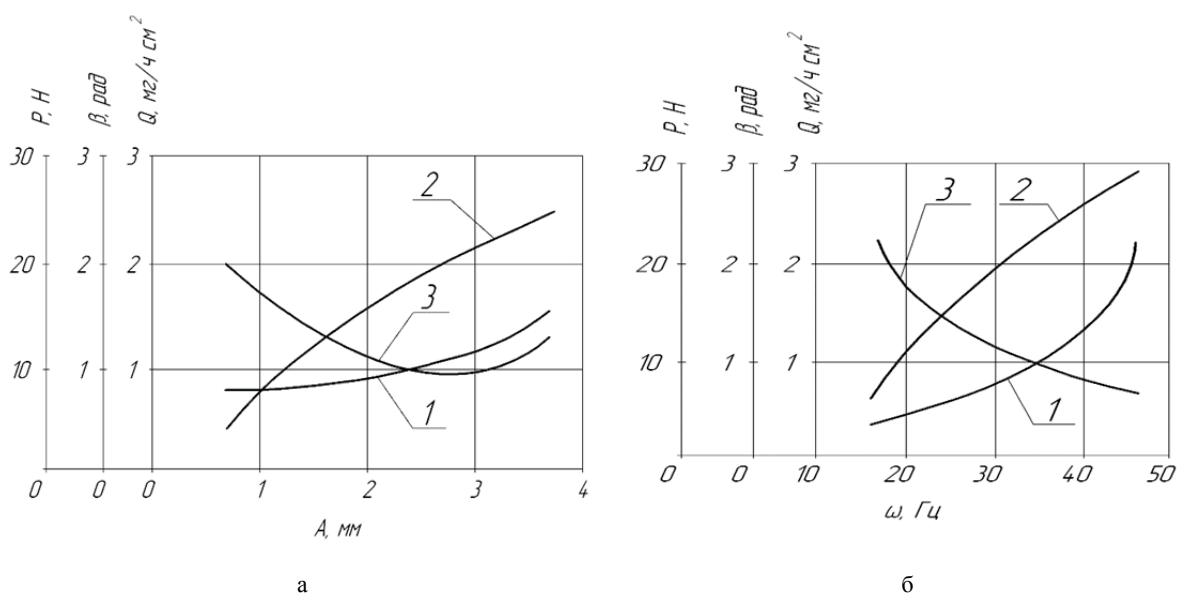


Рис. 5. Схема зіткнення деталі і гранули під гострим (а) і прямим (б) кутом [38]

Рис. 6. Залежність зйому Q металу, кута β зіткнення деталі і гранули і сили P зіткнення від амплітуди A (а) і частоти ω (б) коливань резервуара: 1 – зйом металу; 2 – кут зіткнення; 3 – сила зіткнення [2]

В роботі [23] встановлено, що основою механізму віброполірування в металевих середовищах є пластичне деформування поверхні, яке визначає можливість зміни мікрорельєфу.

Слід зазначити, що інтенсивність протікання процесів віброшліфування і віброполірування залежить від кінематичних і динамічних параметрів робочого середовища, що визначають величину сили мікроударів. До таких параметрів відноситься амплітуда, частота і траєкторія коливального руху резервуара виброверстата. Також інтенсивність процесів віброобробки залежить від маси гранул робочого середовища, їх геометричної форми й розмірів, що визначають площу контакту з поверхнею оброблюва-

ної деталі, складу хімічно-активних розчинів, що сприяють видаленню різного роду забруднень.

Висновки. Проведений структурований аналіз процесів віброобробки та класифікація відповідних операцій показує, що фізична сутність досліджуваних процесів полягає в комплексному впливі на оброблювані деталі ряду факторів:

1. безлічі мікроударів гранул середовища, що забезпечують рівномірний і всебічний вплив на деталі;
2. змінних прискорень, що викликають протікання ударно-хвильових процесів;
3. поверхнево-активних речовин, що викликають протікання фізико-хімічних процесів;

4. інтенсивно циркуляційного та осциляційного руху робочого середовища й оброблюваних деталей.

Аналізуючи значення кожного з параметрів, можна представити фізико-технологічні можливості процесу віброобробки, що формуються мікрорізання і поверхнево-пластичним деформуванням і складаються у відсутності жорсткого зв'язку оброблюваних деталей і гранул робочого середовища, що створює умови для безрозмірного процесу віброобробки.

Література

1. Мицьк А.В. Развитие новых технологий вибрационной отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей общемашиностроительного применения / А.В. Мицьк, В.А. Федорович // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ": сб. науч. тр. Темат. вып.: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2012. – № 47 (953). – С. 226 – 233.
2. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев – Ростов-на-Дону, 2008. – 694 с.
3. Застосування вібраційної обробки для підвищення якості виробів: монографія / П.Л. Носко, М.О. Калмиков, А.П. Ніколаєнко, Л.М. Лубенська; Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля. – Луганськ: Ноулідж, 2009. – 292 с.
4. Бабичев А.П. Технологическое применение колебаний или ... вибрационные технологии / Бабичев А.П. // Вестник ДГТУ. – 2005. – Т. 5. № 3 (25). – С. 289 – 301.
5. Карташов И.Н. Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах / И.Н. Карташов, М.Е. Шаинский, В.А. Власов. – Киев: Вища школа, 1975. – 188 с.
6. Кулаков Ю.М. Отделочно-зачистная обработка деталей / Ю.М. Кулаков, В.А. Хрульков. – М: Машиностроение, 1979. – 216 с.
7. Бурштейн И.Е. Объемная вибрационная обработка / И.Е. Бурштейн, А.П. Бабичев, Б.Б. Ходош, Б.Н. Карышев, А.П. Сергиев, К.Г. Слюсаренко, А.Н. Тоцкий, А.М. Стессель, В.В. Балицкий, А.Ф. Духовский, Т.В. Завьялова. – М.: ЭНИМС, 1970. – 96 с.
8. Бурштейн И.Е. Объемная вибрационная обработка / И.Е. Бурштейн, В.В. Балицкий, А.Ф. Духовский, М.Я. Дубова, Л.Ш. Гетельман, А.М. Стессель. – М.: ЭНИМС, 1977. – 108 с.
9. Копылов Ю.Р. Виброударное упрочнение / Ю.Р. Копылов. – Воронеж: Воронежский институт МВД России, 1999. – 386 с.
10. С.И. Фомченко Очистка отливок / С.И. Фомченко, И.Я. Балакин, А.С. Докторович, Л.Н. Костров. – Л.: Машиностроение, 1969. – 264 с.
11. Kundrać, 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). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04844-2>
12. Kundrać, 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. <https://doi.org/10.3390/ma12193054>
13. Ребиндер П.А. Влияние активных смазочно-охлаждающих жидкостей на качество поверхности при обработке металлов резанием и давлением. – М.: Изд-во АН СССР, 1946. – 432 с.
14. Балакин И.Я. Исследование процесса очистки отливок виброударным методом / И.Я. Балакин, Ю.Н. Зинин, Ю.Ф. Боровский, С.И. Фомченко // Материалы семинара «Прогрессивные методы литья в песчаные формы». – Л.: ЛДНП – 1967.
15. Балакин И.Я. Эффективность различных способов очистки отливок / И.Я. Балакин, Б.Б. Гуляев, Ю.Ф. Боровский, С.И. Фомченко // Вестник машиностроения. – 1967. – № 3.
16. Балакин И.Я. Вибрационная очистка отливок / И.Я. Балакин, Б.Б. Гуляев, Ю.Ф. Боровский, С.И. Фомченко // Литейное производство – 1966. – № 4.
17. Георгиев В.М. Вибрационная обработка литых и штампованных деталей сантехарматуры / В.М. Георгиев // Вопросы вибрационной технологии. Р-н-Д: ДГТУ. – 1999. – С. 7 – 11.
18. Бабичев И.А. Экспериментальное исследование распространения ударных волн в среде стальных сферических тел с различной плотностью упаковки // Сб. статей «Прогрессивная отделочно-упрочняющая технология». Р-на-Д. – 1984. – С. 3 – 5.
19. Бабичев И.А. Ударно-волновые процессы в уплотненной среде стальных шаров при вибрационной воздействии / И.А. Бабичев, Г.А. Прокопец // Тезисы научно-технической конференции. – Р-на-Д.: ДГТУ, 1991. – С. 35 – 36.
20. Бабичев А.П. Состояние технологии очистных операций и возможность применения вибрационной обработки в ремонтных производствах / А.П. Бабичев, Л. Кимлинг // Вопросы вибрационной технологии. Р-н-Д: ДГТУ. – 2001. – С. 3 – 7.
21. Кимлинг Л. Применение вибрационной обработки для очистки деталей и сосудов от лакокрасочных покрытий / Л. Кимлинг // Вопросы вибрационной технологии. Р-н-Д: ДГТУ. – 2001. – С. 40 – 43.
22. Иванов В.В. Расширение возможностей использования моющего средства «Прогресс» в технологических жидкостях для ВиО / В.В. Иванов, Ю.П. Погребщиков, С.Н. Худолей // Вопросы вибрационной технологии. Р-н-Д: ДГТУ. – 2001. – С. 72 – 75.
23. Бабичев А.П. Применение вибрационных технологий на операциях отделочно-зачистной обработки деталей (очистка, мойка, удаление облоя и заусенцев, обработка кромок) / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко, Л.К. Гиллеспи. Р-н-Д: ДГТУ. – 2010. – 289 с.
24. Алексеева Е.К. Применение вибрационной обработки на операциях мойки деталей / Е.К. Алексеева // Состояние и перспективы промышленного освоения вибрационной обработки. Р-н-Д: РИСХМ. – 1974. – С. 91 – 95.
25. Ванн Мао Повышение эффективности и качества очистки поверхности деталей от эксплуатационных загрязнений за счет применения вибрационной обработки в технологии авторемонтных производств: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Ванн Мао. – Р-н-Д., 2003. – 20 с.
26. Соколов В.І., Кроль О.С., Єфіфанова О.В. Гідравліка. – Севеодонецьк: СНУ ім. В. Даля, 2017. – 160 с.
27. Берещенко А.А. Виброхимическая обработка углеродистых и легированных сталей: дис. ... кандидата хим. наук: 05.17.03 / Алла Александровна Берещенко. – Киев, 1980. – 132 с.

28. Политов И.В. Вибрационная обработка деталей машин и приборов / И.В. Политов, Н.А. Кузнецов. – Л.: Лениздат, 1965. – 125 с.
29. Krol O., Sokolov V. Modelling of spindle nodes for machining centers // *Journal of Physics: Conference Series*. – Vol. 1084, 012007 (2018).
30. Krol, O., Sokolov, V.: 3D modelling of angular spindle's head for machining centre. *Journal of Physics: Conference Series*. – Vol.1278, 012002 (2019).
31. 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.
32. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев. – Р-н-Д: ДГТУ, 1993. – 98 с.
33. Косягин Е.М. Исследование процессов скругления острых кромок и удаления заусенцев при вибрационной обработке / Е.М. Косягин, Ю.Ю. Ефанов, А.В. Кожухова // *Вопросы вибрационной технологии*. Р-н-Д: ДГТУ. – 1999. – С. 47 – 51.
34. Калмиков М.О. Инструмент для обработки деталей вильными абразивами / М.О. Калмиков, Т.О. Шумакова, В.Б. Струтинский, Л.М. Лубенская. – Київ – Луганськ: «Ноулдж», 2010. – 214 с.
35. Мицык А.В. Повышение эффективности обработки крупногабаритных плоскостных изделий активизацией движения рабочей среды в колеблющихся «U» - образных контейнерах: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Андрей Владимирович Мицык. – Харьков., 2008. – 331 с.
36. Сергиев А.П. Снятие заусенцев с мелких листовых штампованных деталей пневмогидроротационным методом / А.П. Сергиев, Андилахай А.А. // *Всероссийский научно-технический семинар «Виброабразивная обработка деталей»*. – Ворошиловград: ВМИ, 1978. – С. 156 – 157.
37. Шаинский М.Е. Обработка поверхностей деталей в виброустановках нового типа / М.Е. Шаинский, Б.А. Гончаров // *Методы и средства обработки деталей в абразивной среде с применением вибрации*. – 1963. – № 6-63-640/127 – 43 с.
38. Мицык В.Я. Особенности механики метода отделочно-зачистной и упрочняющей обработки в колеблющихся резервуарах и эффективность оборудования для его реализации / В.Я. Мицык // *Вісник КДПУ ім. М. Остроградського*. – 2007. – Ч. 2, № 1 (42). – С. 52 – 57.
39. Мицык А.В. Определение взаимосвязей движения контейнера вибростанка, его содержимого и технологического процесса обработки крупногабаритных изделий / А.В. Мицык // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2005. – № 2. – С. 53 – 57.
40. Мицык В.Я. Развитие научных основ проектирования технологии и оборудования отделочно-зачистной и упрочняющей виброобработки / В.Я. Мицык // *Вібрації в техніці та технологіях*. – 2010. – № 2 (58). – С. 141 – 151.
41. Шаинский М.Е. Исследование декоративного шлифования и полирования стальных деталей в вибрирующих резервуарах: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Михаил Ефимович Шаинский. – Львов, 1967. – 171 с.
42. Шумакова Т.А. Влияние формы абразивных гранул на производительность процесса вибрационной обработки / Т.А. Шумакова, Е.П. Мельникова, И.А. Чесноков // *Вібрації в техніці та технологіях*. – 2010. – №2 (58). – С. 219 – 233.
43. Струтинский В.Б. К вопросу разработки математического аппарата определения оптимальной формы гранулы / В.Б. Струтинский, М.А. Калмыков, Т.А. Шумакова // *Вібрації в техніці та технологіях*. – 2010. – № 3 (59). – С. 109 – 114.
44. Лубенская Л.М. О влиянии массы гранул на производительность процесса вибрационной обработки / Л.М. Лубенская, Т.А. Шумакова, Н.И. Пичугин // *Вібрації в техніці та технологіях*. – 2010. – № 3 (59). – С. 62 – 79.
45. Справочник шлифовщика / В.А. Кашук, А.Б. Верещагин. – М.: Машиностроение, 1988. – 480 с.
46. Nikolaïenko A.P. Increasing of details surface quality by vibrating processing / A.P. Nikolaïenko // *Вісник СНУ ім. В. Даля*. – 2016. – № 2 (226). – С. 60 – 69.
47. Гиллеспи Л.К. 1976е Грат, полученный в результате обточки. Корпорация Бендикс. Отчет отдела города Канзас BDX-613-1748. 1976.
48. Гиллеспи Л.К. Использование псевдозаусенцев в исследованиях по удалению грата // *Техническая газета MR79-980*. Дарбон, МН: Общество инженеров технологов (SME). 1979.
49. Шеффер Фридрих 1975а. Влияние дизайна продукта на удаление заусенцев // *Техническая газета MR75-483*. Дарбон, МН: Общество инженеров-технологов (SME).
50. Gillespie Laroux. Deburring and Edge Finishing. Handbook. SME. ASME PRESS. New York, Michigan, 1999. – 404 p.
51. Николаенко, А. Совершенствование конструкции вибрационных станков с U-образной формой контейнера / А. Николаенко // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. – 2013. – Т. 1, № 56. – С. 15 – 21.
52. Литовка Г.В. Вероятностно-статистическая система геометрических параметров гранул абразивного наполнителя как научная основа управления показателями вибрационной обработки: дис. ... докт. техн. наук: 05.02.08, 05.03.01 / Литовка Геннадий Васильевич. – Благовещенск, 1996. – 364 с.
53. Мицык А.В. Использование абразивных материалов в техпроцессах виброобработки крупногабаритных изделий // *Тезисы международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития транспорта промышленных регионов»*. – Днепропетровск: НГУ, 2005. – С. 21 – 22.
54. Мицык В.Я. Характеристика и назначение рабочих растворов в технологических процессах виброобработки // *Тезисы международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития транспорта промышленных регионов»*. – Днепропетровск: НГУ, 2005. – С. 22 – 23.

References

1. Mitsyk A.V. Razvitiye novykh tehnologij vibracionnoj otdelочно-zachistnoj i uprochnjajushhej obrabotki detalej obshhemashinostroitel'nogo primeneniya / A.V. Mitsyk, V.A. Fedorovich // *Vestnik Nac. tehn. un-ta "HPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Noveye resheniya v sovremennyh tehnologijah*. – Har'kov : NTU "HPI". – 2012. – № 47 (953). – S. 226 – 233
2. Babichev A.P. Osnovy vibracionnoj tehnologii / A.P. Babichev, I.A. Babichev – Rostov-na-Donu, 2008. – 694 s.
3. Zastosuvannja vibracijnoi obrobki dlja pidvishhennja yakosti virobiv: monografija / P.L. Nosko, M.O. Kalmikov,

- A.P. Nikolaenko, L.M. Lubens'ka; Shidnoukr. nac. un-t im. V. Dalja. – Lugans'k: Noulidzh, 2009. – 292 s.
4. Babichev A.P. Tehnologicheskoe primeneniye kolebanij ili ... vibracionnye tehnologii / Babichev A.P. // Vestnik DGTU. – 2005. – T. 5. № 3 (25). – S. 289 – 301.
 5. Kartashov I.N. Obrabotka detalej svobodnymi abrazivami v vibrirujushhih rezervuarah / I.N. Kartashov, M.E. Shainskij, V.A. Vlasov. – Kiev: Vishha shkola, 1975. – 188 s.
 6. Kulakov Ju.M. Otdelochno-zachistnaja obrabotka detalej / Ju.M. Kulakov, V.A. Hrul'kov. – M.: Mashinostroenie, 1979. – 216 s.
 7. Burshtejn I.E. Ob'emnaja vibracionnaja obrabotka / I.E. Burshtejn, A.P. Babichev, B.B. Hodosh, B.N. Kartyshev, A.P. Sergiev, K.G. Sljusarenko, A.N. Tockij, A.M. Stessel', V.V. Balickij, A.F. Duhovskij, T.V. Zav'jalova. – M.: JeNIMS, 1970. – 96 s.
 8. Burshtejn I.E. Ob'emnaja vibracionnaja obrabotka / I.E. Burshtejn, V.V. Balickij, A.F. Duhovskij, M.Ja. Dubova, L.Sh. Getel'man, A.M. Stessel'. – M.: JeNIMS, 1977. – 108 s.
 9. Kopylov Ju.R. Vibroudarnoe uprochnenie / Ju.R. Kopylov. – Voronezh: Voronezhskij institut MVD Rossii, 1999. – 386 s.
 10. S.I. Fomchenko Ochistka otlivok / S.I. Fomchenko, I.Ja. Balakin, A.S. Doktorovich, L.N. Kostrov. – L.: Mashinostroenie, 1969. – 264 s.
 11. Kundrač, 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). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04844-2>
 12. Kundrač, 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. <https://doi.org/10.3390/ma12193054>
 13. Rebinder P.A. Vlijanie aktivnyh smazочно-ohlazhdajushhih zhidkostej na kachestvo poverhnosti pri obrabotke metallov rezaniem i davleniem. – M.: Izd-vo AN SSSR, 1946. – 432 s.
 14. Balakin I.Ja. Issledovanie processa ochistki otlivok vibroudarnym metodom / I.Ja. Balakin, Ju.N. Zinin, Ju.F. Borovskij, S.I. Fomchenko // Materialy seminaru «Progressivnye metody lit'ja v peschanye formy». – L.: LDNP – 1967.
 15. Balakin I.Ja. Jeffektivnost' razlichnyh sposobov ochistki otlivok / I.Ja. Balakin, B.B. Guljaev, Ju.F. Borovskij, S.I. Fomchenko // Vestnik mashinostroenija. – 1967. – № 3.
 16. Balakin I.Ja. Vibracionnaja ochistka otlivok / I.Ja. Balakin, B.B. Guljaev, Ju.F. Borovskij, S.I. Fomchenko // Litejnoe proizvodstvo – 1966. – № 4.
 17. Georgiev V.M. Vibracionnaja obrabotka lityh i shtampovannyh detalej santehtarmatury / V.M. Georgiev // Voprosy vibracionnoj tehnologii. R-n-D: DGTU. – 1999. – S. 7 – 11.
 18. Babichev I.A. Jeksperimental'noe issledovanie rasprostraneniya udarnykh voln v srede stal'nyh sfericheskikh tel s razlichnoj plotnost'ju upakovki // Sb. statej «Progressivnaja otdelochno-uprochnijushhaja tehnologija». R-na-D. – 1984. – S. 3 – 5.
 19. Babichev I.A. Udarno-volnovye processy v uplotnennoj srede stal'nyh sharov pri vibracionnoj vozdeystvii / I.A. Babichev, G.A. Prokopec // Tezisy nauchno-tehnicheskoy konferencii. – R-na-D.: DGTU, 1991. – S. 35 – 36.
 20. Babichev A.P. Sostojanie tehnologii ochistnykh operacij i vozmozhnost' primeneniya vibracionnoj obrabotki v remontnykh proizvodstvax / A.P. Babichev, L. Kimling // Voprosy vibracionnoj tehnologii. R-n-D: DGTU. – 2001. – S. 3 – 7.
 21. Kimling L. Primenenie vibracionnoj obrabotki dlja ochistki detalej i sudov ot lakokrasochnykh pokrytij / L. Kimling // Voprosy vibracionnoj tehnologii. R-n-D: DGTU. – 2001. – S. 40 – 43.
 22. Ivanov V.V. Rasshirenie vozmozhnostej ispol'zovaniya mozhnogo sredstva «Progress» v tehnologicheskikh zhidkostjakh dlja ViO / V.V. Ivanov, Ju.P. Pogrebshhekov, S.N. Hudolej // Voprosy vibracionnoj tehnologii. R-n-D: DGTU. – 2001. – S. 72 – 75.
 23. Babichev A.P. Primenenie vibracionnykh tehnologij na operacijah otdelochno-zachistnoj obrabotki detalej (ochistka, mojka, udalenie obloja i zausencev, obrabotka kromok) / A.P. Babichev, P.D. Motrenko, L.K. Gillespi. R-n-D: DGTU. – 2010. – 289 s.
 24. Alekseeva E.K. Primenenie vibracionnoj obrabotki na operacijah mojki detalej / E.K. Alekseeva // Sostojanie i perspektivy promyshlennogo osvoeniya vibracionnoj obrabotki. R-n-D: RISHM. – 1974. – S. 91 – 95.
 25. Vann Mao Povyshenie jeffektivnosti i kachestva ochistki poverhnosti detalej ot jekspluatacionnykh zagrijaznenij za schet primeneniya vibracionnoj obrabotki v tehnologii avtoremontnykh proizvodstv: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: 05.02.08 / Vann Mao. – R-n-D., 2003. – 20 s.
 26. Sokolov V., Krol O., Yepifanova O. Hydraulics. V. Dahl EUNU, Severodonetsk, 2017.
 27. Bereshhenko A.A. Vibrohimicheskaja obrabotka uglerodistykh i legirovannykh stalej: dis. ... kandidata him. nauk: 05.17.03 / Alla Aleksandrovna Bereshhenko. – Kiev, 1980. – 132 s.
 28. Politov I.V. Vibracionnaja obrabotka detalej mashin i priborov / I.V. Politov, N.A. Kuznecov. – L.: Lenizdat, 1965. – 125 s.
 29. Krol O., Sokolov V. Modelling of spindle nodes for machining centers // *Journal of Physics: Conference Series*. – Vol. 1084, 012007 (2018).
 30. Krol, O., Sokolov, V.: 3D modelling of angular spindle's head for machining centre. *Journal of Physics: Conference Series*. – Vol. 1278, 012002 (2019).
 31. 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.
 32. Babichev A.P. Osnovy vibracionnoj tehnologii / A.P. Babichev. – R-n-D: DGTU, 1993. – 98 s.
 33. Kosjagin E.M. Issledovanie processov skruglenija ostryykh kromok i udalenija zausencev pri vibracionnoj obrabotke / E.M. Kosjagin, Ju.Ju. Efanov, A.V. Kozhuhova // Voprosy vibracionnoj tehnologii. R-n-D: DGTU. – 1999. – S. 47 – 51.
 34. Kalmikov M.O. Instrument dlja obrobki detalej vil'nimi abrazivami / M.O. Kalmikov, T.O. Shumakova, V.B. Strutinskij, L.M. Lubens'ka. – Kiiv – Lugans'k: «Noulidzh», 2010. – 214 s.
 35. Mitsyk A.V. Povyshenie jeffektivnosti obrabotki krupnogabaritnykh ploskostnykh izdelij aktivizacij dvizhenija rabochej sredy v kolebljushhihsja «U» – obraznykh kontejnerah: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.03.01 / Andrey Vladimirovich Mitsyk. – Har'kov., 2008. – 331 s.
 36. Sergiev A.P. Snjatje zausencev s melkikh listovykh shtampovannyh detalej pnevmogidrorotacionnym metodom /

- A.P. Sergiev, A.A. Andiljahaj // Vsesojuznyj nauchno-tehnicheskij seminar «Vibroabrazivnaja obrabotka detalej». – Voroshilovgrad: VMI, 1978. – S. 156 – 157.
37. Shainskij M.E. Obrabotka poverhnostej detalej v vibrostanovkah novogo tipa / M.E. Shainskij, B.A. Goncharov // Metody i sredstva obrabotki detalej v abrazivnoj srede s primeneniem vibracii. – 1963. – № 6-63-640/127 – 43 s.
 38. Mitsyk V.Ja. Osobennosti mehaniki metoda otdelochno-zachistnoj i uprochnijushhej obrabotki v kolebljushhihsja rezervuarah i jeffektivnost' oborudovanija dlja ego realizacii / V.Ja. Micyk // Visnik KDPU im. M. Ostrogradskogo. – 2007. – Ch. 2, № 1 (42). – S. 52 – 57.
 39. Mitsyk A.V. Opredelenie vzaimosvjazej dvizhenija kontejnera vibrostanka, ego sodержimogo i tehnologicheskogo processa obrabotki krupnogabaritnyh izdelij / A.V. Mitsyk // Novi materiali i tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni. – 2005. – № 2. – S. 53 – 57.
 40. Mitsyk V.Ja. Razvitie nauchnyh osnov proektirovanija tehnologii i oborudovanija otdelochno-zachistnoj i uprochnijushhej vibroobrabotki / V.Ja. Micyk // Vibracii v tehnici ta tehnologijah. – 2010. – № 2 (58). – S. 141 – 151.
 41. Shainskij M.E. Issledovanie dekorativnogo shlifovanija i polirovanija stal'nyh detalej v vibrirujushhih rezervuarah: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.02.08 / Mihail Efimovich Shainskij. – L'vov, 1967. – 171 s.
 42. Shumakova T.A. Vlijanie formy abrazivnih granul na proizvoditel'nost' processa vibracionnoj obrabotki / T.A. Shumakova, E.P. Mel'nikova, I.A. Chesnokov // Vibracii v tehnici ta tehnologijah. – 2010. – № 2 (58). – S. 219 – 233.
 43. Strutinskij V.B. K voprosu razrabotki matematicheskogo apparata opredelenija optimal'noj formy granuly / V.B. Strutinskij, M.A. Kalmykov, T.A. Shumakova // Vibracii v tehnici ta tehnologijah. – 2010. – № 3 (59). – S. 109 – 114.
 44. Lubenskaja L.M. O vlijanii massy granul na proizvoditel'nost' processa vibracionnoj obrabotki / L.M. Lubenskaja, T.A. Shumakova, N.I. Pichugin // Vibracii v tehnici ta tehnologijah. – 2010. – № 3 (59). – S. 62 – 79.
 45. Spravochnik shlifovshhika / V.A. Kashhuk, A.B. Vereshhagin. – M.: Mashinostroenie, 1988. – 480 s.
 46. Nikolaenko A.P. Increasing of details surface quality by vibrating processing / A.P. Nikolaenko // Visnik SNU im. V. Dajla. – 2016. – № 2 (226). – S. 60 – 69.
 47. Gillespi L.K. 1976e Grat, poluchennyj v rezul'tate obtochki. Korporacija Bendiks. Otchet otdela goroda Kansas BDX-613-1748. 1976.
 48. Gillespi L.K. Ispol'zovanie psevdosausencev v issledovanijah po udaleniju grata // Tehnicheskaja gazeta MR79-980. Dearbon, MI: Obshhestvo inzhenerov tehnologov (SME). 1979.
 49. Sheffer Fridrih 1975a. Vlijanie dizajna produkta na udalenie zausencev // Tehnicheskaja gazeta MR75-483. Dearbon, MI Obshhestvo inzhenerov-tehnologov (SME).
 50. Gillespi Laroux. Deburring and Edge Finishing. Handbook. SME. ASME PRESS. New York, Michigan, 1999. – 404 p.
 51. Nikolaenko, A. Sovershenstvovanie konstrukcii vibracionnyh stankov s U-obraznoj formoj kontejnera / A. Nikolaenko // Visnik NTU «HPI». Serija: Novi rishennja u suchasnih tehnologijah. – 2013. – T. 1, № 56. – S. 15 – 21.
 52. Litovka G.V. Verojatnostno-statisticheskaja sistema geometricheskikh parametrov granul abrazivnogo napolnitelja kak nauchnaja osnova upravlenija pokazateljami vibracionnoj obrabotki: dis. ... dokt. tehn. nauk: 05.02.08, 05.03.01 / Litovka Gennadij Vasil'evich. – Blagoveshensk, 1996. – 364 s.
 53. Mitsyk A.V. Ispol'zovanie abrazivnyh materialov v tehprocessah vibroobrabotki krupnogabaritnyh izdelij // Tezisy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskij konferencii «Problemy i perspektivy razvitija transporta promyshlennyh regionov». – Dnepropetrovsk: NGU, 2005. – S. 21 – 22.
 54. Micyk V.Ja. Harakteristika i naznachenie rabochih rastvorov v tehnologicheskijh processah vibroobrabotki // Tezisy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskij konferencii «Problemy i perspektivy razvitija transporta promyshlennyh regionov». – Dnepropetrovsk: NGU, 2005. – S. 22 – 23.

Мицьк А.В. Развитие процессов обработки свободной абразивной средой в колеблющихся резервуарах и формирование их физико-технологических возможностей

Проведен структурованийаний анализ процессов виброобработки и дана классификация соответствующих операций, применяемых в металлообрабатывающих производствах. Рассмотрены процессы очистной и моечной обработки, то есть операции удаления с поверхности деталей остатков формовочной смеси, окалины, пригаров, коррозии, припоя, шлама и различных загрязнений после литья,ковки, горячей штамповки и термообработки. Указано, что доделочные процессы виброобработки представляют собой технологии удаления с поверхности деталей облоя, заусенцев, скругления острых кромок после литья, холодной штамповки и обработки лезвийным инструментом на металлорежущих станках. Описаны процессы виброшлифования и виброполирования, применяемые для уменьшения шероховатости поверхности обрабатываемых деталей, их подготовки под гальванические и лакокрасочные покрытия, придания поверхностям глянцевого оттенка с целью декоративной обработки.

Ключевые слова: Виброобработка, колеблющийся резервуар, рабочая среда, заусенец, технологический параметр, классификация операций, шероховатость поверхности.

Mitsyk A.V. Development of processes with a free abrasive medium treatment oscillating reservoirs and the formation of their physical and technological capabilities

It is noted that the technological capabilities of free abrasive medium treatment processes in oscillating reservoirs, their productivity and profitability when performing finishing and grinding operations, have ensured widespread use in modern mechanical engineering. It is indicated how the technological capabilities of processing in vibrating machines reservoirs, their productivity and profitability when performing finishing and grinding operations, provide wide industrial implementation in machine-building production. A structured analysis of the processes of vibration treatment has been carried out and a classification of the corresponding operations used in metalworking industries has been given. Among them there are the processes of cleaning and washing processing, that is, technological operations of removing from the surface of parts the remains of the molding sand, scale, burns, corrosion, solder, sludge and various contaminants after casting, forging, hot stamping and heat treatment. A controlled processing parameter has been established, which is the degree of purity of parts from metal and non-metal defects. The

influence of the vibration processing duration on the surface cleanliness of castings has been revealed. It is indicated that the finishing processes of vibration treatment are technologies for removing burrs, rounding of sharp edges from castings surface after casting, cold stamping and blade cutting on metal cutting machines. Based on the physics of the finishing processing, it is indicated that the intensity of the vibration treatment depends on the kinematic and dynamic characteristics of the reservoir, as well as on the physical and technological characteristics of the medium granules, the composition of the chemically active solution, physical and technological properties of the processed parts material. The processes of vibration grinding and vibration polishing are described. These processes are used to reduce the surface roughness of the processed parts, for their preparation on galvanic and paint coatings, giving the surfaces a glossy shade for the purpose of

decorative processing. It was established that the intensity of these processes depends on the mode processing parameters, mass, geometric shape and size of the medium granules, the composition of chemically active solutions.

Keywords: *vibration treatment, oscillating reservoir, working medium, burr, processing parameter, classification of operations, roughness, physical and technological characteristics.*

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

Стаття подана 14.02.2020 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-66-71>

УДК 621.9.025.11

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВУЗЛІВ МЕТАЛОРІЗАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ В СИСТЕМІ ANSYS

Ніколаєнко А.П., Шумакова Т.О.

RESEARCH OF STRENGTH CHARACTERISTICS OF METAL-CUTTING EQUIPMENT UNITS IN ANSYS

Nikolaenko A.P., Shumakova T.O.

Стаття присвячена проблемам застосування комп'ютерних систем в інженерних розрахунках при проектуванні вузлів обладнання машинобудівного комплексу. Показана необхідність використання науково обґрунтованих засобів проектування, що базуються на математичному моделюванні напружено-деформованого стану методом кінцевих елементів. Проаналізовано можливості використання системи інженерних розрахунків ANSYS Mechanical Enterprise для оцінки міцнісних характеристик вузлів металорізального обладнання. На основі розробленої тривимірної моделі шпиндельного вузла радіально-свердільного верстату в системі ANSYS проведено аналіз напружено-деформованого стану, побудовано модель переміщень кінця шпинделя та проведено розрахунок на вібростійкість.

Ключові слова: тривимірне моделювання, система інженерних розрахунків ANSYS, шпиндельний вузол, напружено-деформований стан, кінцево-елементна сітка.

Вступ. В сучасному машинобудуванні актуальними є задачі проектування та випуску нових конкурентоспроможних типів обладнання, а саме металорізальних верстатів, обладнання фармацевтичних та біотехнологічних виробництв, обладнання електронної промисловості [1-6]. При цьому нові сучасні конструкції повинні відповідати підвищеним вимогам точності та продуктивності при мінімізації їхньої собівартості та скорочення часу на їх розробку. Також гостро стоїть питання модернізації існуючого на підприємствах обладнання [7, 8, 9].

Вирішення задач випуску нових конкурентоспроможних типів обладнання та модернізації існуючого можливо лише при використанні науково обґрунтованих засобів проектування, що базуються на математичному моделюванні напружено-деформованого стану методом кінцевих елементів. Цей метод дає можливість розробки та впровадження достатньо точних та ефективних методів розрахунку та оптимізації деталей та вузлів верстатів [7, 10-14]. Однією з найбільш ефективних систем, яка

дозволяє проводити всі види міцнісних розрахунків, включаючи: статичний, втомний, модальний, гармонічний, спектральний, випадкових вібрацій та аналіз перехідних процесів, а також моделювати лінійну та нелінійну втрату стійкості несучих елементів та вузлів, є ANSYS Mechanical Enterprise [11, 15, 16].

Аналіз літературних джерел. Однією з найбільш відповідальних деталей верстата, яка є останньою ланкою коробки швидкоостей та несе заготовку або інструмент, є шпиндель [17,18]. Від якості шпиндельних вузлів залежить точність обертання інструменту або деталі, що оброблюється. До них пред'являються наступні вимоги:

- точність обертання, що вимірюється биттям на передньому кінці шпинделя в радіальному або осевому напрямку;
- жорсткість шпиндельного вузла, що визначається за пружним переміщенням переднього кінця шпинделя;
- вібростійкість шпиндельного вузла, яка значно впливає на стійкість всього верстата;
- довговічність шпиндельних вузлів;
- обмеження тепловиділення та температурних деформацій, які мають значний вплив на точність обробки;
- швидке та надійне закріплення інструменту або заготовки, для забезпечення їх точне центрування та відповідно точне обертання.

Аналіз літературних джерел показує значний інтерес дослідників до питання розширення та підвищення ефективності використання систем автоматизованого проектування [8, 14, 17, 18]. Багато уваги приділяється використанню інструментарію параметричного моделювання вузлів металорізального обладнання в САПР APM WinMachine та САПР КОМПАС-3D [6, 12, 13]. Для оцінки впливу міцнісних характеристик деталей та вузлів металорізального обладнання на такі показники, як точність, жо-

ресткість, продуктивність та ін., дослідники також використовують програмні засоби SolidWorks, АПМ FEM [14, 13, 18].

Постановка проблеми та мета статті. Система інженерних розрахунків ANSYS Mechanical Enterprise, яка широко використовується на практиці для вирішення задач: механіки деформівного твердого тіла, оцінки реакцію моделей на всілякі навантаження, оптимізації конструкцій, не достатньо представлена в роботах вітчизняних вчених [15, 16]. Однак, використання даної системи разом з комп'ютерним моделюванням вузлів верстатів дозволяє на стадії їх проектування без виготовлення дослідного зразка визначати недоліки конструкції та розробляти заходи по їх усуненню. Метою даної роботи є підвищення ефективності проектування вузлів верстатів. Для цього ставиться завдання провести дослідження шпиндельного вузла за міцнісними показниками та створити модель переміщення переднього кінця шпинделя в системі інженерних розрахунків ANSYS Workbench Static Structural.

Методика та результати досліджень. Розглянемо задачу розрахунку напружено-деформаційного стану на прикладі шпиндельного вузла радіально-свердлильного верстата при обробці отворів $D = 20^{+0.045}_{-0}$ мм в деталях типу ступиця зі сплавів на титановій основі свердлами зі швидкорізальної сталі Р9К5.

Шпиндель радіально-свердлильного верстата (рис. 1), що було досліджено в представленій роботі, обертається на трьох точних радіальних підшипниках в пінолі. В передній (нижній) опорі шпиндельного вузла, крім двох радіальних підшипників, встановлений упорний підшипник, що сприймає осьове навантаження під час процесу різання. Задня (верхня) опора складається з радіального та упорного підшипників. Останній служить для сприйняття осьових навантажень при зворотньому різанні та інших аналогічних операціях.

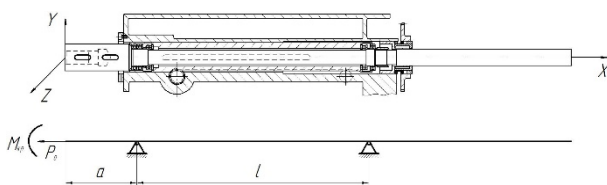


Рис. 1. Розрахункова схема шпинделя радіально-свердлильного верстата

При розрахунку на жорсткість визначається пружне переміщення шпинделя в перетині переднього кінця.

Визначення прогину кінця шпинделя в передній опорі проводиться за формулами [19, 20, 21]:

$$y = \frac{Pa^2}{3E} \left(\frac{a}{J_1} + \frac{l}{J_2} \right) + P \left(e_1 \frac{l+a^2}{l^2} + e_2 \left(\frac{a}{l} \right)^2 \right), \quad (1)$$

де $E = 2.1 \cdot 10^5$ МПа – модуль пружності 1-го роду матеріалу шпинделя; P – навантаження на шпиндель від сил різання; H ; J_1 – осереднений момент інерції консолі шпинделя, мм^4 ; J_2 – осереднений момент інерції перетину шпинделя у прольоті між опорами, мм^4 ; e_1 , e_2 – піддатливість опор шпинделя, $\text{мкм}/\text{Н}$; a – довжина консолі шпинделя, мм ; l – відстань між опорами, мм .

Сила різання при свердлінні, умовно прикладена до точки ріжучої кромки свердла, розкладається на [22]:

P_x – осьова сила, паралельна осі свердла (шпинделя);

P_y – радіальна сила, що проходить через вісь свердла, дія якої врівноважується та дорівнює нулю;

P_z – дотична сила, дотична до кола, на якій лежить точка докладання рівнодіючої сили різання, яка знаходиться із рівняння моментів сил, діючих відносно осі X [22]:

$$\sum M_x = M_{kp} = 2P_{zc} \frac{D}{2} + 2P_z \frac{D}{4}. \quad (2)$$

P_{zc} – дотична сила різання на стрічці свердла.

Вихідними даними для розрахунку шпинделя на міцність та вібростійкість є:

– складова сили різання P_z , яка при свердлінні створює крутний момент M , яка долається шпинделем верстата, та осьову силу P_o , яка долається механізмом подачі верстата, та має вплив на шпиндель. Для даних умов різання $M = 250H \cdot \text{мм}$; $P_o = 4960 \text{ Н}$ [23].

– максимальна частоти обертання шпинделя $n = 1400 \text{ хв}^{-1}$;

– технічні характеристики підшипників;

– геометричні параметри шпиндельного вузла.

Для проведення дослідження міцнісних характеристик шпинделя була створена 3D-модель шпиндельного вузла верстату інтегрована в графічний редактор ANSYS SpaceClaim (рис. 2). Для спрощення подальших розрахунків необхідно виключити конструктивні елементи в моделі, які будуть відображені у вигляді опор та навантажень.

Вирішення задачі визначення жорсткості шпинделя в CAE доцільно проводити в середовищі ANSYS Workbench Static Structural. Для імітації роботи підшипників використовується команда «Bearing» зі вкладки «Connections» (рис. 3). За допомогою команд «Force» та «Moments» задаються сили та крутний момент, які діють на шпиндель.

Після прикладання навантажень було створено кінцево-елементну сітку, наведену на рис. 4. У панелі властивостей є можливість зазначити розмір кінцевого елемента та параметри сітки. При цьому не слід забувати, що величина кінцевого елемента пов'язана з часом розрахунку і його похибкою. У випадку моделі, що розглядається, було обрано авто-

матичний метод розбиття на сітку, та створено 52643 елемента.

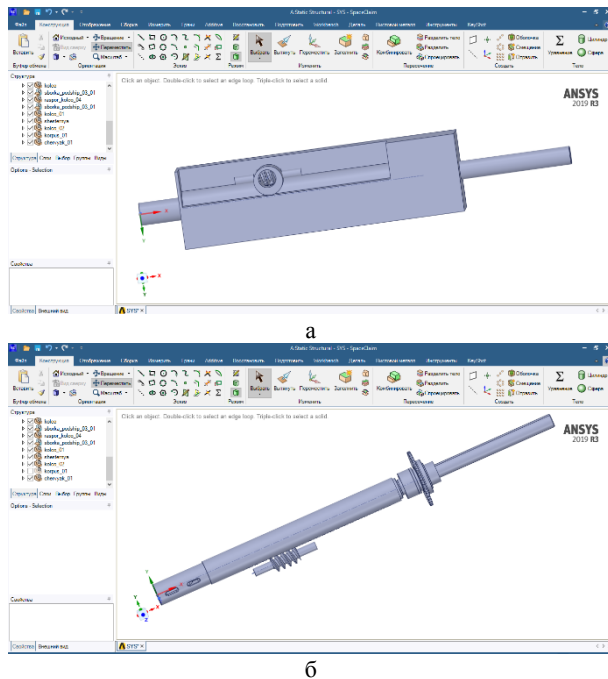


Рис. 2. 3D-модель шпиндельного вузла радіально-свердлильного верстата в ANSYS Space Claim:
а – тривимірна модель шпинделя в корпусі;
б – тривимірна модель шпинделя без корпусу

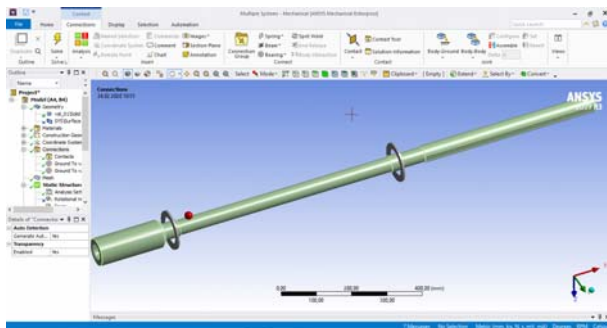


Рис. 3. 3D-модель шпинделя в ANSYS Mechanical

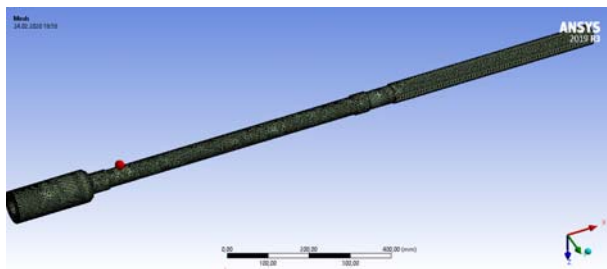


Рис. 4. Кінцево-елементна сітка

Для отримання результатів розрахунків переміщення переднього кінця шпинделя відносно початкового положення під дією сил різання використовується команда «Total Deformation». На отриманій моделі сірим відображено початкове розташування шпинделя, а кольором позначено його відхилення від мінімального до максимального значення.

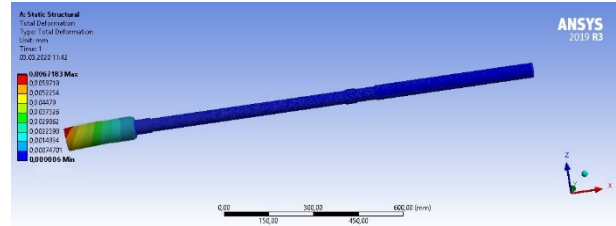


Рис. 5. Модель переміщення кінця шпинделя

Мінімальний прогин шпинделя складає $-0,6 \cdot 10^{-5}$ мм, максимальний – 0,0067 мм. Виходячи з вимог до точності обробки, прогин шпинделя від сил різання і сил приводу не повинен перевищувати третини допуску на лімітуючий розмір деталі [20]. Дана вимога виконується, оскільки допуск на розмір складає 0,045 мм, тобто $2 \cdot 0,0067 = 0,013 < 0,045$ мм.

Вибрав у розділі «Solution Information» еквівалентні напруги «Equivalent Stress», була проведена оцінка рівня напружень. Під дією прикладеної зовнішньої сили в конструкції виникають внутрішні напруження. В кожній точці конструкції діють 6 незалежних напруг: 3 нормальних та 3 дотичні. Еквівалентна напруга Мізеса відображає поведінку під навантаженням матеріалів з пружно-пластичною моделлю поведінки (більшість конструкційних сталей та сплавів); та обчислюється через головні нормальні напруги. Результати досліджень еквівалентних напруг по Мізесу наведено на рис. 6.

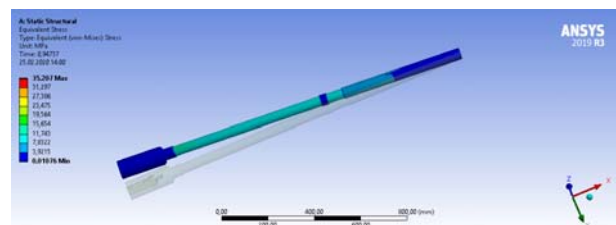


Рис. 6. Приведені напруги на шпинделі

В розглянутому в статті випадку, межа міцності матеріалу шпинделя, що виконано з сталі Ст40Х дорівнює 363 МПа. Максимальна напруга, яка діє на валу дорівнює 35 МПа (рис.6), тобто можна говорити про значний запас міцності. Також система ANSYS дає можливість переглянути напруги на окремій ділянці конструкції шпинделя та отримати розрахунок в графічному вигляді, а також у вигляді епюри напружень на цій ділянці (рис.7).

Для розрахунку на вібростійкість доцільно використовувати модуль ANSYS Workbench Modal, який дозволяє розраховувати власні частоти шпинделя. З метою уникнення явищ резонансу проводився порівняльний аналіз власної частоти шпинделя з частотою вимушених коливань. Рекомендується, щоб власна частота обертання шпинделя була у декілька разів вища частоти його вимушених коливань [20, 24]. Ця вимога відображена коефіцієнтом динамічної стійкості шпинделя:

$$K_{\partial} = \frac{\omega_{\min}}{\omega_{\text{роб}}}, \quad (3)$$

де $\omega_{\min}$ – мінімальне значення основної власної частоти, Hz ; $\omega_{\text{роб}}$ – максимальне значення робочої частоти шпинделя. Згідно з паспортними даними радіально-свердлильного верстата $\omega_{\text{роб}} = 1400 \times 6^{-1} = 33 \text{ Hz}$.

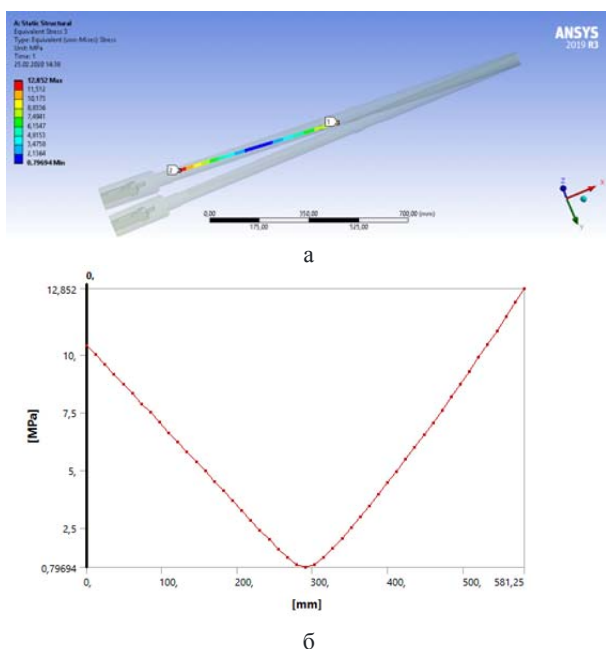


Рис. 7. Напруги на небезпечній ділянці конструкції шпинделя:
а – дані, представлені в графічному вікні;
б – епюра навантажень

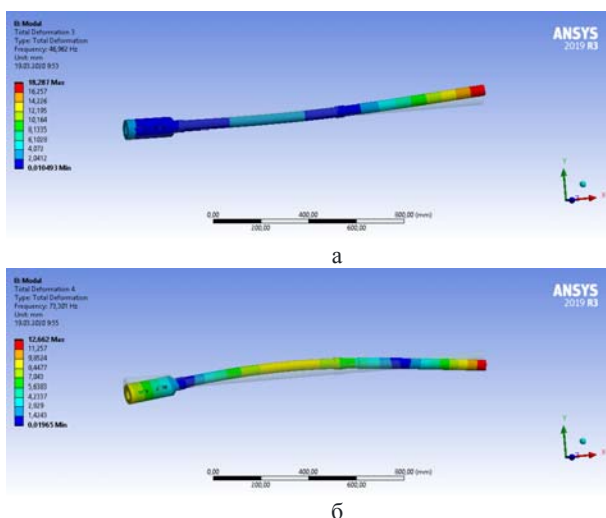


Рис. 8. Динамічні характеристики шпинделя:
а – власна форма коливань на 1-й власній частоті;
б – власна форма коливань на 2-й власній частоті

В результаті розрахунку в модулі ANSYS Workbench Modal було отримано наступні значення власних частот коливань шпинделя: 46,962 Hz , 73,301 Hz , 158,71 Hz , 223,53 Hz . Таким чином встановлено, що коефіцієнт динамічної стійкості шпинделя, що досліджувався, дорівнює:

$$K_{\partial} = \frac{46,962}{33} = 1,42$$

Форма коливань шпинделя на різних власних частотах наведено на рис. 8.

Висновки. Проаналізовано можливості системи ANSYS Mechanical Enterprise з модулями для статичного аналізу Static Structural та аналізу коливань Modal, що використовуються при комп'ютерному моделюванні металорізального обладнання.

Розроблено тривимірну модель шпиндельного вузла радіально-свердлильного верстата, отримано модель переміщення переднього кінця шпинделя, прогин якого знаходиться в полі допуску на лімітуючий розмір деталі.

Проведено розрахунок напружено-деформаційного стану, який показує, що напруги, які діють на шпиндель у 10 разів нижчі ніж межа міцності матеріалу. Це свідчить про значний запас міцності конструкції шпинделя.

Отримано значення власних частот коливань шпинделя та розраховано коефіцієнт динамічної стійкості шпинделя, який дорівнює 1,42.

Проведений розрахунок в програмному комплексі ANSYS дозволяє проаналізувати конструкцію шпиндельного вузла верстата та запропонувати необхідні корективи без виготовлення дослідних зразків, що значно скорочує час проектування шпиндельних вузлів і, як наслідок, підвищують продуктивність процесу їх виготовлення.

Л і т е р а т у р а

1. 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).
2. Мічик А.В., Федорович В.О. Оцінка ефективності вібраційної оздоблювально-зачишувальної обробки у резервуарах з мультиенергетичним впливом і різною формою поперечного перерізу // *Різання та інструменти в технологічних системах: Міжнар. наук.-техн. зб. / Під заг. ред. проф. А.І. Грабченко. – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – Вип. 90. – С. 50 – 61.*
3. Шумакова Т.О., Осипов В.І. Розробка методу автоматизованого виробництва абразивних гранул і пристрою для його реалізації / *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – № 2(226), 2016. – С. 124 – 130.*
4. Соколов В.І., Кроль О.С., Єпіфанова О.В. Гідравліка. – Северодонецьк: СНУ ім. В. Даля, 2017. – 160 с.
5. 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).
6. 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).
 7. Кроль О.С., Хмеловский Г.Л. Оптимизация и управление процессом резания: учебное пособие. – К: УМК ВО, 1991. – 140 с.
 8. Николаенко А.П. К вопросу обеспечения надежности станков методами математического моделирования / Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – №5(222), 2015. – С.79 – 82.
 9. 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.
 10. Nikolaenko, A.T. Hussein. Modelling of vibrating machine-tool with improved construction / Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa. – Vol. 14, No.1, 2014. – P.174 – 181.
 11. Шаталов О.Є. Реалізація базових методів та моделей захищеності бойових машин легкої категорії за масою від кінетичних боеприпасів / О. Є. Шаталов, Є. Є. Дудар, А. Ю. Васильєв // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер.: Машинознавство та САПР: зб. наук. пр. – Харків: НТУ "ХПІ", 2019. – № 2. – С. 97-106.
 12. Krol, O., Sokolov, V. (2018). Modeling Carrier System Dynamics for Metal-Cutting Machines. 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), IEEE. – P. 1–5.
 13. Krol O.S., Sokolov V.I. Rational Choice of Machine Tools for Designers. – Sofia: Prof. Marin Drinov Academy Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2019. – 113 p.
 14. Krol O.S., Sokolov V.I. Engineering Forecasting of Machine Tools for Designers. – Sofia: Prof. Marin Drinov Academy Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. – 114 p.
 15. T. Stolarski, Y. Nakasone, S. Yoshimoto. Engineering analysis with ANSYS software. – Butterworth-Heinemann, UK. – 2018, 553 p.
 16. Huei-Huang Lee. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 18. – Department of Engineering science of National Chen Kun University, Taiwan. – 2018, 610 p.
 17. Krol, O., Sokolov, V.: 3D modelling of angular spindle's head for machining centre. Journal of Physics: Conference Series 1278, 012002 (2019).
 18. 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).
 19. Решетов Д.Н. Детали и механизмы металлорежущих станков. Том 2. – М.: Машиностроение, 1978. – 520 с.
 20. Чугринов А.А. Шпиндельные узлы металлорежущих станков. Учебное пособие. – Северодвинск: РИО Севмашвуза, 1998. – 84 с.
 21. Зарубицький Є.У., Покінтелиця М.І., Плахотник В.А. та ін. Курсове проектування металорізальних верстатів. Навчальний посібник. – Луганськ, Вид-во СХУ, 2000. – 332 с.
 22. Резание материалов: учеб. / С. Н. Григорьев [и др.]. –Р34 Пенза: Изд-во ПГУ, 2010. – 628 с.
 23. Расчет режимов резания. Учебное пособие / Безъязычный В. Ф., Аверьянов И. Н., Кордюков А. В. – Рыбинск: РГТА, 2009. – 185 с.
 24. Кроль О.С. Методы и процедуры динамики шпиндельных узлов: монография. - Луганск: изд-во ВНУ им. В. Даля, 2014. – 154 с.

References

1. 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).
2. Mitsyk AV, Fedorovich VA Estimation of the efficiency of vibration finishing treatment in tanks with multi-energy impact and different cross-sectional shape // Cutting and tools in technological systems: Int. scientific-technical Sat. / Under the head. ed. prof. A.I. Grabchenko. - Kharkiv: NTU "KPI", 2019. - Issue. 90. P. 50-61.
3. Shumakova T.O, Osipov V.I. Development of the method of automated production of abrasive granules and device for its implementation / Visnik Shidnoukrayinskogo natsionalnogo universitetu imeni Volodimira Dalya. – No. 2 (226), 2016. – P. 124–130.
4. Sokolov V., Krol O., Yepifanova O. Hydraulics. V. Dahl EUNU, Severodonetsk, 2017.
5. 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).
6. 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).
7. Krol' O.S., Khmelovskiy G.L. Optimizatsiya i upravleniye protsessom rezaniya: uchebnoye posobiye. – K: UMK VO, 1991. – 140 p.
8. Nikolaienko A.P. On the question of ensuring the reliability of machines by methods of mathematical modeling / Visnik Shidnoukrayinskogo natsionalnogo universitetu imeni Volodimira Dalya. – No.5 (222), 2015. – P.79–82.
9. Nikolaienko A.P. Improving the design of vibratory machines with a U-shaped container / Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu KHPI. Ser.: Novi rishennya v suchasnykh tekhnolohiyakh. – No 56 (1029), 2013. – P. 15–21.
10. Nikolaenko, A.T. Hussein. Modelling of vibrating machine-tool with improved construction / Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa. – Vol. 14, No.1, 2014. – P.174 – 181.
11. Shatalov AE Implementation of basic methods and models of protection of lightweight combat vehicles by kinetic ammunition / AE Shatalov, EE Dudar, AY Vasiliev // Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser.: Engineering and CAD: Coll. of sciences. Ave. – Kharkiv: NTU "KPI", 2019. - № 2. – P. 97 – 106.
12. Krol, O., Sokolov, V. (2018). Modeling Carrier System Dynamics for Metal-Cutting Machines. 2018 International

- Russian Automation Conference (RusAutoCon), IEEE. – P. 1–5.
13. Krol O.S., Sokolov V.I. Rational Choice of Machine Tools for Designers. – Sofia: Prof. Marin Drinov Academy Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2019. – 113 p.
 14. Krol O.S., Sokolov V.I. Engineering Forecasting of Machine Tools for Designers. – Sofia: Prof. Marin Drinov Academy Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. – 114 p.
 15. T. Stolarski, Y. Nakasone, S. Yoshimoto. Engineering analysis with ANSYS software. – Butterworth-Heinemann, UK, 2018. – 553 p.
 16. Huei-Huang Lee. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 18. – Department of Engineering science of National Chen Kun University, Taiwan, 2018. – 610 p.
 17. Krol, O., Sokolov, V.: 3D modelling of angular spindle's head for machining centre. Journal of Physics: Conference Series 1278, 012002 (2019).
 18. 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).
 19. Reshetov D.N. Details and mechanisms of metal cutting machines. Volume 2. - M.: Mashinostroyeniye, 1978. - 520 p.
 20. Chugrinov A.A. Spindle units of metal cutting machines. Tutorial. - Severodvinsk: RIO Sevmashvtuz, 1998. - 84 p.
 21. Zarubitsky E.U., Pokintelitsa MI, Plakhotnik VA etc. Course design of metal-cutting machines. Tutorial. - Lugansk, SNU, 2000. - 332 p.
 22. Cutting materials: textbook. / S.N. Grigoriev [et al.]. –P34 Penza: Publishing House of PSU, 2010. - 628 p.
 23. Calculation of cutting conditions. Textbook / Bilingual V.F., Averyanov I.N., Kordyukov A.V. - Rybinsk: RGATA, 2009. - 185 p.
 24. Krol O.S. Methods and procedures for the dynamics of spindle assemblies: a monograph. - Lugansk: izd-vo VNU im. V. Dalia, 2014.- 154 p.

Николаенко А.П., Шумакова Т.А. Исследование прочностных характеристик узлов металлорежущего оборудования в системе ANSYS

Статья посвящена изучению проблем использования компьютерных систем инженерных расчетов при проектировании узлов оборудования машиностроительного комплекса. Показана необходимость использования научно обоснованных методик проектирования, которые базируются на методах математического моделирования и на моделировании методом конечных элементов. Проанализированы возможности использования системы инженерных расчетов ANSYS Mechanical Enterprise для оценки прочностных характеристик узлов металлорежущего оборудования. На основе разработанной трехмерной модели шпиндельного узла радиально-сверлильного станка в системе Ansys проведено анализ напряженно-деформированного состояния, построена модель перемещений конца шпинделя и проведен расчет на вибростойкость.

Ключевые слова: *трехмерное моделирование, система инженерных расчетов Ansys, шпиндельный узел, напряженно-деформированное состояние, конечно-элементная сетка.*

Nikolaenko A., Shumakova T. Research of strength characteristics of metal-cutting equipment units in ANSYS

This article is devoted to the study of the problems of using computer systems of engineering calculations in the design of machine-building complex equipment units. The necessity to use scientifically based design techniques, mathematical modeling methods and finite element modeling, is shown.

ANSYS Mechanical Enterprise is one of the most efficient systems that can perform all types of strength calculations, including static, fatigue, modal, harmonic, spectral, random vibration and transient analysis, as well as simulate linear and non-linear stability of bearing elements and nodes. The ANSYS Mechanical Enterprise software products are integrated into the ANSYS Workbench calculation platform for parametric and cross-disciplinary calculations.

The article presents the research of the spindle node by strength indexes and created a model of the spindle front end moving in the system of engineering calculations Ansys Workbench Static Structural. Spindle is one of the most important parts of the machine, which is the last link in the gearbox and carries a part or a tool. The accuracy of the rotation of a tool or a part depends on the quality of the spindle units. ANSYS SpaceClaim graphical editor is used to prepare geometric models that are imported into the platform.

The solution of the problem of determination of spindle stiffness in Ansys Workbench Static Structural environment is considered in the article. When calculating the stiffness must be determined the elastic movement of the spindle at the intersection of the front end. After applying loads and constraints, a finite element mesh was created and a model of displacement of the front end of the spindle was constructed.

The level of internal stresses that appear in the structure under the influence of the applied external force was estimated with the help of the Equivalent Stress command. Equivalent stress that reflects the loading behavior of materials with an elasto-plastic behavior model was calculated through the principal normal voltages. The results of the calculations showed a considerable margin of safety.

A type of analysis "Modal" was used to calculate the vibration resistance. That allowed to calculate the natural spindle frequencies.

Keywords: *3D model, spindle assembly, boring arbor, elastically deformed state, initial parameter method.*

Ніколасенко Анна Павлівна – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) Apnikolaenko@gmail.com

Шумакова Тетяна Олександрівна – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) shumakovatania@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-72-77>

УДК 621.646:62-83

КОРЕКЦІЯ АВТОМАТИЧНОГО ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНОГО ПРИВОДУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Соколов В.І., Степанова О.Г., Батурін Є.О.

CORRECTION OF AUTOMATIC ELECTROHYDRAULIC DRIVE FOR TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

Sokolov V.I., Stepanova O.G., Baturin E.O.

Розглянуто питання вибору коригуючої ланки для підвищення якості регулювання електрогідрравлічного приводу технологічного обладнання. Виконано аналіз способів корекції динамічних характеристик електрогідрравлічних слідувачів приводів з дросельним регулюванням. Для приводів, побудованих на основі стандартних модулів, показана доцільність послідовної установки в ланцюг електрогидромеханічного перетворювача коригуючої ланки - реального пропорційно-диференціюючого регулятора. Як параметри налаштування коригуючої ланки розглядаються постійна часу і коефіцієнт передачі регулятора, до уваги також прийнята постійна часу, що характеризує інерційність ланки. Для вибору оптимальних значень параметрів налаштування коригуючої ланки електрогідрравлічного приводу технологічного обладнання рекомендовано проведення досліджень в середовищі Simulink пакета прикладних програм MATLAB. Наведено приклад дослідження впливу параметрів настройки коригуючої ланки на динамічні характеристики електрогідрравлічного приводу з дросельним регулюванням. Представлена блок-діаграма для моделювання перехідних процесів в середовищі Simulink. Відмічені особливості вибору рекомендованих значень параметрів налаштування коригуючої ланки електрогідрравлічних приводів технологічного обладнання для механічної обробки матеріалів. Отримано передавальну функцію електрогідрравлічного слідувача приводу з коригувальною ланкою.

Ключові слова: електрогідрравлічний привід, дросельне регулювання, структурна схема, коригуюча ланка, передавальна функція, блок-діаграма, перехідний процес.

Постановка проблеми. Сучасне технологічне обладнання, зокрема, обладнання для механічної обробки матеріалів, пред'являє високі вимоги до показників якості регулювання автоматичних приводів, а саме їх швидкодії та характеру перехідного процесу [1-5].

Прагнення досягти високої точності за рахунок збільшення коефіцієнта посилення розімкнутого контуру приводу (тобто його добротності) дає появу неприпустимої коливальності приводу в перехідно-

му процесі. У зв'язку з цим виникає потреба в зміні параметрів або структури приводу. Для того, щоб забезпечити необхідний запас стійкості, можна оцінити можливість зміни конструкцій елементів і пристроїв приводу з метою зменшення постійних часу відповідних їм динамічних ланок.

Істотна переробка агрегатів приводу не завжди можлива, а іноді і не дає бажаного результату (якщо інерційне навантаження на привід велике, а сили тертя у виконавчому механізмі незначні). Тому вихід зі скрутного становища знаходять при використанні додаткових коригуючих пристроїв [6-10].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Конструктивне виконання коригуючих пристроїв буває різним, і в сукупності їх можна розділити на дві великі групи: гідромеханічні та електричні [6, 11-15]. Зрозуміло, що для включення таких елементів в структуру системи необхідно, щоб в ній були зв'язки з фізичними величинами, відповідними їм за своєю природою.

Для автоматичних електрогідрравлічних приводів (ЕГП) технологічного обладнання з дросельним регулюванням можна використовувати такі гідромеханічні методи корекції [16-20]:

1. Введення перетікання рідини між порожнинами гідроциліндра.
2. Забезпечення додаткового зворотного зв'язку шляхом використання пружності опори гідроциліндра НС.
3. Підключення демпфера до золотника електрогідрравлічного підсилювача.
4. Включення додаткових зворотних зв'язків, що створюють сигнали по похідним від тиску в порожнинах гідроциліндра або за похідними від переміщення його штока.

При коригуванні ЕГП з дросельним регулюванням за допомогою електричних і електронних пристроїв [6, 12, 16] слід використовувати різні допоміжні контури, які складені з елементів, що воло-

діють ємністю, індуктивністю та активним опором. З'єднання з таких елементів дозволяють отримати динамічні ланки з характеристиками, близькими до характеристик форсуючих ланок першого і другого порядків, або реальні диференціюючі ланки. Електричні та електронні коригуючі пристрої можуть бути включені послідовно в ланцюг основного контуру, а також можуть бути застосовані для організації додаткових зворотних зв'язків, що створюють сигнали по похідним від окремих змінних величин за часом.

Мета статті. Метою даної роботи є обґрунтування вибору найбільш ефективної типової коригуючої ланки для автоматичного ЕГП технологічного обладнання, а також розробка рекомендацій по вибору оптимальних параметрів налаштування коригуючої ланки.

Матеріали та результати дослідження. Для проведення подальших досліджень використовуємо схему ЕГСП, представлену в роботі [21] і показану на рис. 1.

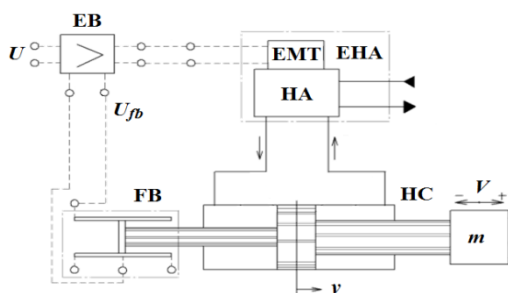


Рис. 1. Розрахункова схема автоматичного ЕГП

У розрахунковій схемі позначені: НС – гідроциліндр; ЕНА – електрогидравлічний підсилювач, що включає електромеханічний перетворювач (ЕМТ) і гідравлічний підсилювач (НА); ФВ – зворотний зв'язок, ЕВ – електричний блок. На схемі відзначені наступні основні змінні ЕГП: U – вхідна (керуюча) напруга; U_{fb} – напруга ФВ; y , V – переміщення та швидкість поршня.

Для відхилень змінних в роботі [21] отримана лінійна математична модель, відповідно до якої передача керуючого сигналу може бути представлена структурною схемою, наведеною на рис. 2.

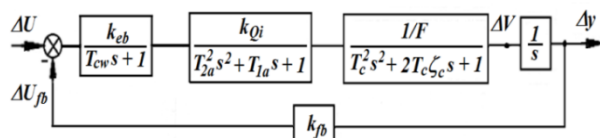


Рис. 2. Структурна схема передачі керуючого сигналу

У структурній схемі позначені наступні параметри приводу: k_{eb} – коефіцієнт передачі ЕВ; T_{cw} – постійна часу обмотки керування; k_{Qi} – коефіцієнт підсилення ЕНА по витраті; T_{2a} , T_{1a} – постійні часу

ЕНА; F – ефективні площини НС; T_c – гідромеханічна постійна часу НС; ζ_c – коефіцієнт відносного демпфування НС; k_{fb} – коефіцієнт передачі ФВ.

Методика оцінки параметрів автоматичного ЕГП детально викладена в роботах [22-27].

На основі виконаного аналізу методів корекції слід відзначити наступне.

Що стосується введення перетікання між порожнинами гідроциліндра. Відомо, що зі збільшенням витоків і перетоків в гідродвигуні коливальність автоматичного ЕГП знижується. Разом з тим постійні підвищені витoki і перетікання знижують точність регулювання в сталому режимі роботи приводу. Тому в ЕГП з дросельним регулюванням слід застосовувати коригуючий пристрій, що працює за принципом динамічних перетоків рідини. Воно створює перетікання рідини при перехідному процесі та припиняє їх в сталому режимі роботи.

Також відзначимо особливість включення додаткових зворотних зв'язків. Оскільки однією з основних задач при виборі коригуючого пристрою є зниження коливальності, тобто збільшення запасу стійкості ЕГП при збереженні допустимої швидкості помилки регулювання, то додатковий зворотний зв'язок не повинен реагувати на сталу швидкість приводу. Його негативний сигнал повинен бути пропорційний другій похідній від переміщення вихідної ланки, тобто його прискоренню. Тільки в цьому випадку можна досягти зниження коливальності приводу.

Методи корекції, засновані на застосуванні електричних та електронних пристроїв, досить просто здійснити. Вони особливо доцільні в тих випадках, коли необхідно виправити характеристики виготовленого приводу або приводу, що збирається з готових модулів. Такі пристрої можна встановлювати, як в прямому шляху контуру управління, так і в головному зворотному зв'язку ФВ. Однак електричні та електронні пристрої не завжди забезпечують необхідну надійність роботи приводу, і, крім того, вони можуть викликати появу перешкод, які деформують сформовані в контурі приводу сигнали управління. Зазначені недоліки електричних та електронних коригуючих пристроїв в меншій мірі проявляються при використанні гідромеханічних коригувальних пристроїв. Але оскільки гідромеханічні коригувальні пристрої зазвичай органічно пов'язані з конструкцією електрогидравлічного підсилювача ЕНА або гідроциліндра НС, тому їх застосування повинно бути передбачено заздалегідь при створенні приводу.

Виходячи з вищевикладеного, для корекції динамічних властивостей автоматичних ЕГП з дросельним регулюванням технологічного обладнання для механічної обробки матеріалів зручно використовувати електричні та електронні коригувальні пристрої. В якості коригуючої ланки слід рекомендувати послідовну установку в ланцюг електромеханічного перетворювача ЕМТ електрогидравлічного підсилювача ЕНА (рис. 1) пропорційно-

диференціального регулятора. Передавальна функція ідеального пропорційно-диференціального регулятора

$$W_c^*(s) = Ts + k, \quad (1)$$

де T - постійна часу коригуючої ланки; k - коефіцієнт передачі коригуючої ланки.

Оскільки неможливо реалізувати ідеальну пропорційно-диференціальну ланку, для реальної коригуючої ланки будемо розглядати наступну передавальну функцію

$$W_c = \frac{Ts + k}{T_{in}s + 1}, \quad (2)$$

де T_{in} - постійна часу, що характеризує інерційність коригуючої ланки.

Установка коригуючої ланки в автоматичному ЕГП з дросельним регулюванням показана на структурній схемі, наведеній на рис. 3.

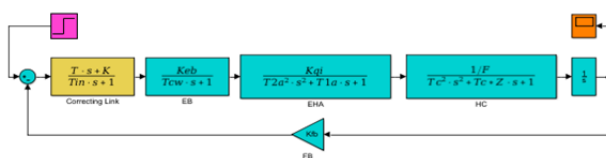


Рис. 3. Установка коригуючої ланки в автоматичному ЕГП

Дослідження динамічних характеристик ЕГП при виборі оптимальних значень параметрів налаштування коригуючої ланки зручно виконати в пакеті прикладних програм MATLAB, використовуючи структурну схему приводу в середовищі Simulink. Блок-діаграма для моделювання динамічних характеристик розглянутого ЕГП з коригуючою ланкою в середовищі Simulink представлена на рис. 4.

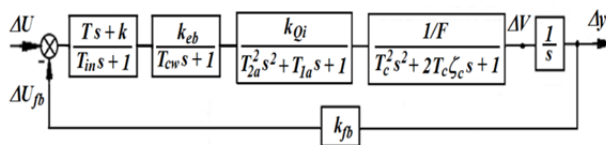


Рис. 4. Блок-діаграма для моделювання динамічних характеристик ЕГП з коригуючою ланкою в середовищі Simulink пакета MATLAB

Відзначимо, що прийняті позначення параметрів лінійної моделі автоматичного ЕГП на блок-діаграмі відповідно до можливостей вбудованого редактора MATLAB практично збігаються з прийнятими раніше і не потребують додаткових коментарів.

Результати моделювання показують, що інерційність коригуючої ланки не впливає за умови, що постійна часу, що характеризує його інерційність, набагато менше (більш, ніж на порядок) мінімальної постійної часу ланок ЕГП

$$T_{in} \ll T_{min} \quad (3)$$

Сучасна елементна база електричних та електронних коригуючих пристроїв дозволяє реалізувати умову (3) для приводів технологічного обладнання. У тих випадках, коли умова (3) не здійснена, інерційність коригуючої ланки не тільки істотно впливає на тривалість перехідного процесу, а й змінює його характер.

Наведемо приклад дослідження впливу параметрів налаштування коригуючої ланки на динамічні характеристики ЕГП з дросельним регулюванням для наступних параметрів приводу: $T_{cw}=0,01$ с; $T_{2a}=1,27 \cdot 10^{-3}$ с; $T_{1a}=1,17 \cdot 10^{-3}$ с; $T_c=2,62 \cdot 10^{-3}$ с; $\zeta_c=0,25$; $k_{eb}=1,754$ ом⁻¹; $k_{Qi}=5,16 \cdot 10^{-4}$ м³/(сА); $F=9,15 \cdot 10^{-3}$ м²; $k_{fb}=108$ В/м. Розглядалися перехідні процеси при стрибку керуючої напруги $\Delta U=27$ В, що відповідало усталеному переміщенню поршня на $\Delta y=0,25$ м.

На рис. 5 показано вплив коефіцієнта передачі k коригуючої ланки на перехідний процес при значенні постійної часу $T=0$. Як видно, збільшення значення k призводить до підвищення коливальності системи. Характер впливу на перехідний процес постійної часу T коригуючої ланки при значенні коефіцієнта передачі $k=6$ представлений на рис. 6. Величина T також помітно визначає вид перехідного процесу.

Результати моделювання переконливо показують, що пропорційно-диференціальний регулятор дозволяє ефективно коригувати динамічні характеристики автоматичного ЕГП з дросельним регулюванням, зокрема характер перехідного процесу та його тривалість. Так, для розглянутого прикладу зміна значення постійної часу T в діапазоні $0,01 \dots 0,06$ с і коефіцієнта передачі k в діапазоні $1 \dots 6$ дозволяє досягти аперіодичного, монотонного і коливального характеру перехідного процесу, а також істотно підвищити швидкодню приводу. Наприклад, при значеннях $k=6$ і $T=0,04$ с швидкодня збільшується в 7 разів.

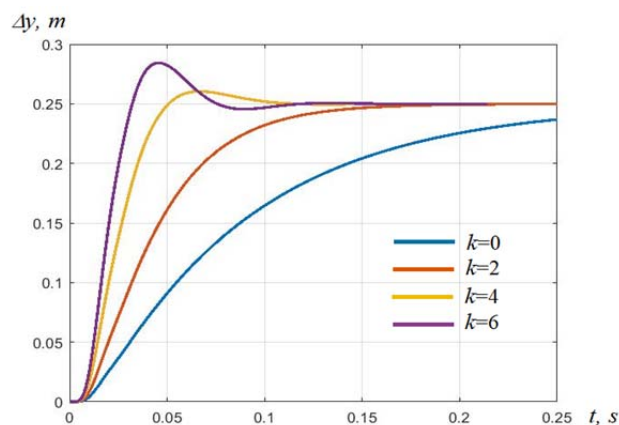


Рис. 5. Вплив на перехідний процес коефіцієнта передачі k коригуючої ланки при значенні постійної часу $T=0$

Разом з тим, важливо відзначити наступне. При виборі оптимальних значень параметрів налаштування коригуючої ланки необхідно враховувати, що в ряді випадків особливо технологічного призначення обладнання виключають перерегулювання переміщення робочого органу або зміна знаку його швидкості [14, 28, 29], зокрема, в обладнанні для механічної обробки матеріалів. Тому, рекомендовані значення параметрів налаштування коригуючої ланки можуть і не забезпечувати оптимальну швидкість автоматичного ЕГП, а повинні визначатися по комплексному критерію якості регулювання.

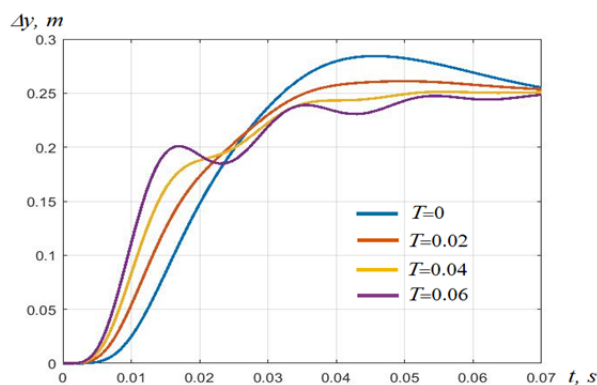


Рис. 6. Вплив на перехідний процес постійної часу T коригуючої ланки при значенні коефіцієнта передачі $k = 6$

Комплексний аналіз динамічних характеристик автоматичного ЕГП технологічного обладнання з коригуючою ланкою можна провести по передавальній функції, яка згідно рис. 3 при допущенні $T_{in} \approx 0$ відповідно до умовою (3) визначається виразом

$$W(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta U(s)} = \frac{k_{yu}(Ts + k)}{a_6 s^6 + a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}, \quad (4)$$

де

$$\begin{aligned} k_{yu} &= 1/k_b; \quad a_0 = k; \quad a_1 = T + \frac{1}{D_{EHS}}; \quad D_{EHS} = k_b k_G k_b / F; \\ a_2 &= \frac{T_{cw} + T_{la} + 2T_c \zeta}{D_{EHS}}; \quad a_3 = \frac{T_{cw} T_{la} + 2T_c \zeta T_{cw} + T_{2a}^2 + 2T_c \zeta T_{la} + T_c^2}{D_{EHS}}; \\ a_4 &= \frac{T_{2a}^2 T_{cw} + 2T_c \zeta T_{cw} T_{la} + T_c^2 T_{cw} + 2T_c \zeta T_{2a}^2 + T_{la} T_c^2}{D_{EHS}}; \\ a_5 &= \frac{2T_{2a}^2 T_c \zeta T_{cw} + T_c^2 T_{cw} T_{la} + T_{2a}^2 T_c^2}{D_{EHS}}; \quad a_6 = \frac{T_{2a}^2 T_{cw}}{D_{EHS}}. \end{aligned}$$

В даних виразах k_{yu} – коефіцієнт передачі ЕГСП по керуючому сигналу; D_{EHS} – добротність ЕГСП.

Висновки. Таким чином, розглянуто питання вибору коригуючої ланки для підвищення якості автоматичного ЕГП технологічного обладнання. Виконано аналіз способів корекції динамічних характеристик ЕГП з дросельним регулюванням. Для приводів, побудованих на основі стандартних моду-

лів, показана доцільність послідовної установки в ланцюг електромеханічного перетворювача коригуючої ланки – реального пропорційно-диференційного регулятора. В якості параметрів налаштування коригуючої ланки розглядаються постійна часу та коефіцієнт передачі регулятора, до уваги також прийнята постійна часу, що характеризує інерційність ланки.

Для вибору оптимальних значень параметрів налаштування коригуючої ланки ЕГП технологічного обладнання рекомендовано проведення досліджень в середовищі Simulink пакета прикладних програм MATLAB.

Наведено приклад дослідження впливу параметрів налаштування коригуючої ланки на динамічні характеристики автоматичного ЕГП з дросельним регулюванням. Показана можливість досягнення необхідної якості перехідного процесу, а також значного збільшення швидкодії приводу. Представлена блок-діаграма для моделювання перехідних процесів в середовищі Simulink. Відмічені особливості вибору рекомендованих значень параметрів налаштування коригуючої ланки ЕГСП технологічного обладнання для механічної обробки матеріалів. Відмічені особливості вибору рекомендованих значень параметрів налаштування коригуючої ланки ЕГП технологічного обладнання для механічної обробки матеріалів.

Отримана передавальна функція автоматичного ЕГП з коригувальною ланкою.

Література

1. Кроль О.С., Шевченко С.В., Соколов В.І. Проектування металорізальних верстатів у середовищі APM WinMachine. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2011. – 388 с.
2. Харламов Ю.А., Соколов В.И., Кроль О.С. Трибологическая надежность металлорежущих станков. – Северодонецк: ВНУ им. В. Даля, 2017. – 320 с.
3. Krol O., Sokolov V.: Parametric Modeling of Gear Cutting Tools. In: Advances in Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 4, pp. 3-11. Springer, Cham (2019).
4. Krol O., Sokolov V.: Parametric Modeling of Transverse Layout for Machine Tool Gearboxes. In: Advances in Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 4, pp. 122-130. Springer, Cham (2019).
5. Кроль О.С., Соколов В.І. Тривимірне моделювання металорізальних верстатів та інструментального оснащення. – Северодонецьк: СНУ ім. В. Даля, 2016. – 160 с.
6. 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).
7. 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).

8. Кроль О.С., Шумакова Т.О., Соколов В.І. Проектування зуборізних інструментів за допомогою системи КОМПАС. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля. – 2013. – 142 с.
9. Krol O., Tsankov P., Sokolov V. Rational choice of twosupport spindles for machining centers with lubrication system // EUREKA: Physics and Engineering. – N. 3. – 2018. – P. 52–58.
10. Krol O., Sokolov V. Rational choice of machining tools using prediction procedures // EUREKA: Physics and Engineering. – N 4. – 2018. – P. 15-20.
11. Соколов В.І., Степанова О.Г., Батурін Є.О. Дослідження динамічних характеристик електрогідравлічного приводу технологічного обладнання // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. – 2019. – № 1 (249). – С. 55–60.
12. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Automatic Control System for Electrohydraulic Drive of Production Equipment // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE. – 2018.
13. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Mathematical model of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation // TEKA. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – Vol. 17. – N 1. – 2017. – Lublin – Rzeszow, Poland. – P. 27-32.
14. Krol O., Sokolov V. Development of models and research into tooling for machining centers // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Vol. 3. – Issue 1 (93). – 2018. – P. 12–22.
15. Krol, O., Sokolov, V.: 3D modelling of angular spindle's head for machining centre. Journal of Physics: Conference Series 1278, 012002 (2019).
16. Рассказова Ю.Б., Степанова О.Г., Азаренко Н.Г. Совершенствование электрогидравлических приводов машиностроительного оборудования. – Северодонецк: ВНУ им. В. Даля, 2016. – 100 с.
17. Sokolov V., Azarenko N., Sokolova Ya. Simulation of the power unit of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 12. – N 4. – 2012. – Lublin, Poland. – pp. 268 – 273.
18. Sokolov V., Krol O. Installations criterion of deceleration device in volumetric hydraulic drive // Procedia Engineering. – Vol. 206. – P. 936–943.
19. 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).
20. Krol O., Sokolov V. Modeling Carrier System Dynamics for Metal-Cutting Machines // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE. – 2018.
21. Sokolov V., Krol O. Determination of Transfer Functions for Electrohydraulic Servo Drive of Technological Equipment // Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2019. – Springer, Cham. – P. 364-373.
22. Коваленко А.А., Соколов В.И., Дымнич А.Х., Уваров П.Е. Основы технической механики жидкостей и газов: Учебное пособие для вузов. - Луганск: ВУТУ, 1998. - 272 с.
23. Соколов В.І., Кроль О.С., Єпіфанова О.В. Гідравліка. – Северодонецк: СНУ ім. В. Даля, 2017. – 160 с.
24. Sokolov V. Diffusion of Circular Source in the Channels of Ventilation Systems // Advances in Engineering Research and Application. ICERA 2018. Lecture Notes in Networks and Systems. – Vol. 63. – 2019. – Springer, Cham. – P. 278-283.
25. Соколов В.І., Кроль О.С., Єпіфанова О.В. Дифузійні процеси в системах вентиляції. – Северодонецк: СНУ ім. В. Даля. – 2018. – 148 с.
26. Степанова О.Г. Експериментальні дослідження гідравлічного приводу технологічного обладнання / О.Г. Степанова // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Северодонецк : СНУ ім. В. Даля, 2019. – № 1 (249). – С. 61-65.
27. 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. LNME, vol. 1, pp. 707-715. Springer, Cham (2020).
28. Krol O., Sokolov V. Modelling of spindle nodes for machining centers // Journal of Physics: Conference Series. – Vol. 1084. – 2018.
29. Sokolov, V., Krol, O., Stepanova, O.: Nonlinear simulation of electrohydraulic drive for technological equipment. Journal of Physics: Conference Series 1278, 012003 (2019).

References

1. Krol O., Shevchenko S.V., Sokolov V. Design machine tools in environment APM WinMachine. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2011.
2. . Kharlamov Y., Sokolov V., Krol O. Tribologicheskaya nadezhnost metallorazhushchih stankov. – Severodonetsk: VNU im. V. Dalia, 2017. – 320 s.
3. Krol O., Sokolov V.: Parametric Modeling of Gear Cutting Tools. In: Advances in Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 4, pp. 3-11. Springer, Cham (2019).
4. Krol O., Sokolov V.: Parametric Modeling of Transverse Layout for Machine Tool Gearboxes. In: Advances in Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 4, pp. 122-130. Springer, Cham (2019).
5. Krol O.S. Three-dimensional modeling of machine tools and tool equipment. Handbook. / O.S. Krol, V.I. Sokolov. – Severodonetsk: VDEUNU, 2016. – 160 p.
6. 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).
7. 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).
8. Krol O., Shumakova T., Sokolov V. Design metal cutting instruments by dint of system of KOMPAS. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2013.
9. Krol O., Tsankov P., Sokolov V. Rational choice of two-support spindles for machining centers with lubrication system // EUREKA: Physics and Engineering. – N. 3. – 2018. – P. 52–58.
10. Krol O., Sokolov V. Rational choice of machining tools using prediction procedures // EUREKA: Physics and Engineering. – N 4. – 2018. – P. 15-20.
11. Sokolov V.I., Stepanova O.H., Baturin Y.O. Reseach of dynamic characteristics for electrohydraulic drive of technological equipment // Visn. Skhidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dalia. - 2019. - № 1 (249). - S. 55-60.
12. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Automatic Control System for Electrohydraulic Drive of Production Equipment //

- 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE. – 2018.
13. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Mathematical model of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation // TEKA. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – Vol. 17. – N 1. – 2017. – Lublin – Rzeszow, Poland. – P. 27-32.
 14. Krol O., Sokolov V. Development of models and research into tooling for machining centers // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Vol. 3. – Issue 1 (93). – 2018. – P. 12–22.
 15. Krol, O., Sokolov, V.: 3D modelling of angular spindle's head for machining centre. Journal of Physics: Conference Series 1278, 012002 (2019).
 16. Rasskazova Y., Stepanova O., Azarenko N. Perfection of Electrohydraulic Drives of Machine-Building Equipment. – Severodonetsk: VDEUNU, 2016. – 100 s.
 17. Sokolov V., Azarenko N., Sokolova Ya. Simulation of the power unit of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 12. – N 4. – 2012. – Lublin, Poland. – pp. 268 - 273.
 18. Sokolov V., Krol O. Installations criterion of deceleration device in volumetric hydraulic drive // Procedia Engineering. – Vol. 206. – P. 936–943.
 19. 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).
 20. Krol O., Sokolov V. Modeling Carrier System Dynamics for Metal-Cutting Machines // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE. – 2018.
 21. Sokolov V., Krol O. Determination of Transfer Functions for Electrohydraulic Servo Drive of Technological Equipment // Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2019. – Springer, Cham. – P. 364-373.
 22. Kovalenko A.A. Osnovy tehnikeskoj mehaniki zhidkostej i gazov: uchebnoe posobie dlja vuzov / A.A. Kovalenko, V.I. Sokolov, A.H. Dymnich, P.E. Uvarov. - Lugansk: VUGU, 1998. - 272 s.
 23. Sokolov V., Krol O., Yepifanova O. Hydraulics. V. Dahl EUNU, Severodonetsk, 2017.
 24. Sokolov V. Diffusion of Circular Source in the Channels of Ventilation Systems // Advances in Engineering Research and Application. ICERA 2018. Lecture Notes in Networks and Systems. – Vol. 63. – 2019. – Springer, Cham. – P. 278-283.
 25. Sokolov V., Krol O., Yepifanova O. Diffusion processes in ventilation systems. V. Dahl EUNU, Severodonetsk, 2018.
 26. Stepanova O.H. Experimental researches of hydraulic drive for technological equipment // Visn. Skhidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dalia. - 2019. - № 1 (249). - S. 61-65.
 27. 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).
 28. Krol O., Sokolov V. Modelling of spindle nodes for machining centers // Journal of Physics: Conference Series. – Vol. 1084. – 2018.
 29. Sokolov, V., Krol, O., Stepanova, O.: Nonlinear simulation of electrohydraulic drive for technological equipment. Journal of Physics: Conference Series 1278, 012003 (2019).

Соколов В.И., Степанова О.Г., Батурин Е.О. Коррекция автоматического электрогидравлического привода технологического оборудования.

Рассмотрен вопрос выбора корректирующего звена для повышения качества регулирования автоматического электрогидравлического привода технологического оборудования. Выполнен анализ способов коррекции динамических характеристик электрогидравлических приводов с дроссельным регулированием. Для приводов, построенных на основе стандартных модулей, показана целесообразность последовательной установки в цепь электромеханического преобразователя корректирующего звена – реального пропорционально-дифференцирующего регулятора. В качестве параметров настройки корректирующего звена рассматриваются постоянная времени и коэффициент передачи регулятора, во внимание также принята постоянная времени, характеризующая инерционность звена. Для выбора оптимальных значений параметров настройки корректирующего звена автоматического электрогидравлического привода технологического оборудования рекомендовано проведение исследований в среде Simulink пакета прикладных программ MATLAB. Приведен пример исследования влияния параметров настройки корректирующего звена на динамические характеристики электрогидравлического привода с дроссельным регулированием. Представлена блок-диаграмма для моделирования переходных процессов в среде Simulink. Отмечены особенности выбора рекомендуемых значений параметров настройки корректирующего звена автоматических электрогидравлических приводов технологического оборудования для механической обработки материалов. Получена передаточная функция электрогидравлического привода с корректирующим звеном.

Ключевые слова: электрогидравлический привод, дроссельное регулирование, структурная схема, корректирующее звено, передаточная функция, блок-диаграмма, переходной процесс.

Sokolov V.I., Stepanova O.G., Baturin Y.O. Correction of automatic electrohydraulic drive for technological equipment.

The question of choosing the corrective link to improve the control of the automatic electrohydraulic drive for technological equipment is considered. The analysis is made of the methods for correcting the dynamic characteristics of electrohydraulic drives with throttle regulation. The design of corrective devices is different, and in the aggregate they can be divided into two large groups: hydromechanical and electrical. In the correction using electrical and electronic devices, various auxiliary circuits should be used, which are composed of elements with capacitance, inductance and active resistance. Compounds of such elements make it possible to obtain dynamic links with characteristics close to the characteristics of the forcing links of the first and second orders, or real differentiating links. Correction methods based on the use of electrical and electronic devices are quite simple to implement. They are especially suitable in cases where it is necessary to correct the characteristics of the manufactured drive. For drives built on the basis of standard modules, the expediency of sequential installation in circuit of electromechanical amplifier the correction link - real proportional-differentiating controller, is shown. The time constant and the transfer coefficient of the controller are considered as parameters for adjusting the link; the time constant characterizing the inertia of the link is also taken into account. To select the optimal settings for the correction link of the automatic electrohydraulic drive for technological equipment, it is recommended to con-

duct research in the Simulink environment of the MATLAB application package. The example of study of the influence for the settings of the correction link on the dynamic characteristics of an electrohydraulic drive with throttle control is given. A block-diagram for simulating transient processes in a Simulink environment is presented. The peculiarities of the selection for the recommended settings of the correction link of the automatic electrohydraulic drives for technological equipment for machining materials are noted. The transfer function of the electrohydraulic drive with the correcting link is obtained.

Keywords: electrohydraulic drive, throttle regulation, structural scheme, correction link, transfer function, block-diagram, transient process.

Соколов Володимир Ілліч – д.т.н., проф., завідувач кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк) sokolov.snu.edu@gmail.com

Степанова Оксана Геннадіївна – аспірант кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк) ogstepanova@gmail.com

Батурін Євген Олександрович – студент групи МВС-19дм, факультет інженерії, кафедра машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк) baturin2307@gmail.com

Стаття подана 18.02.2020 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-79-86>

УДК 621.646: 62-83

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНОГО ПРИВОДУ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ

Степанова О.Г.

MATHEMATICAL MODEL OF DYNAMIC CHARACTERISTICS FOR POWER PART OF ROTARY MOTION ELECTROHYDRAULIC DRIVE

Stepanova O.G.

Представлено математичну модель динамічних характеристик силової частини електрогідравлічного приводу обертального руху технологічного обладнання з об'ємним регулюванням. Силова частина гідравлічного приводу з об'ємним регулюванням, що розглядається, включає об'ємний насос з регульованою подачею, допоміжні пристрої та об'ємний гідромотор. В якості основного насоса та гідромотора використано дві аксіально-поршневі гідромашини. Для побудови математичної моделі наведена розрахункова схема та прийняті основні допущення. Математична модель динамічних характеристик силової частини електрогідравлічного приводу враховує інерційність рухомих частин гідромотору та стисливість робочої рідини в трубопроводах та порожнинах насоса і гідромотора. Виконана лінеаризація математичної моделі, отримана передавальна функція для кута повороту валу гідромотора по куту нахилу шайби (блоку циліндрів). Перевірка адекватності математичної моделі динамічних характеристик виконана шляхом зіставлення експериментальних та розрахункових перехідних процесів для кутової швидкості валу гідромотора при подачі напруги на вхід гідропідсилювача, що керує похилою шайбою (блоком циліндрів). Адекватна математична модель динамічних характеристик силової частини електрогідравлічного приводу обертального руху, що представлена, покладена в основу для подальшої розробки систем автоматичного керування технологічним обладнанням.

Ключові слова: технологічне обладнання, електрогідравлічний привід, об'ємне регулювання, динамічні характеристики, передавальна функція, перехідний процес.

Постановка проблеми. Сучасні технології машинобудування та матеріалообробки пред'являють дедалі більші вимоги до технічних і функціональних характеристик верстатів і технологічного обладнання [1-5]. Якість одержуваних виробів при механічній обробці багато в чому залежить від можливості реалізації оптимальних законів руху робочих органів, точності регулювання їх переміщень, стабільності швидкостей в умовах змінного навантажен-

ня. Тому актуальною є науково-технічна задача підвищення точності і розширення функціональних можливостей верстатів і технологічного обладнання.

Досягнення довільної кінематики робочого органу, можливості програмної реалізації оптимальних законів його руху забезпечується застосуванням автоматичних електрогідравлічних приводів [6-9] і, зокрема, гідроприводів обертального руху з об'ємним регулюванням в обладнанні потужністю понад 8 кВт. Разом з тим, в даний час відсутні типові універсальні математичні моделі робочих процесів, які протікають в приводах верстатів і технологічного обладнання для механічної обробки, що можуть бути покладені в основу для розробки систем автоматичного керування обладнанням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Силова частина гідравлічного приводу з об'ємним регулюванням включає об'ємний насос з регульованою подачею, допоміжні пристрої і виконавчий гідродвигун об'ємного типу [6, 10-14]. Найбільше застосування в гідроприводах отримали аксіально-поршневі насоси, подача яких регулюється зміною кута нахилу блоку циліндрів або зміною кута нахилу шайби, що здійснюється зазвичай електрогідравлічними підсилювачами, що розміщені в корпусі насоса [15-19]. В якості виконавчих гідродвигунів зазвичай використовують гідроциліндри з лінійним переміщенням вихідної ланки, гідроциліндри з поворотним рухом вихідної ланки і аксіально-поршневі або аксіально-поршневі гідромотори. До допоміжних пристроїв відносять клапани, фільтри, насос і бак системи підживлення робочою рідиною силової частини гідроприводу.

Проблематика математичного моделювання характеристик електрогідравлічних приводів технологічного обладнання достатньо широко представлена в літературі [8, 20-24]. Дослідження робочих процесів в обладнанні ґрунтовані на фундаментальних

рівняннях гідромеханіки, механіки твердого тіла, електротехніки, а для дослідження стійкості та якості регулювання таких систем, їх корегування застосовують методи теорії автоматичного керування [25-29].

Разом з тим, розширення функціональних можливостей та підвищення ефективності технологічного обладнання за рахунок розробки та застосування систем автоматичного керування вимагає негрозмізких достовірних моделей робочих процесів, що протікають в приводах та достатньо повно враховують особливості технологічного призначення обладнання.

Мета статті. Метою даної роботи є розробка адекватної математичної моделі динамічних характеристик силової частини електрогідравлічного приводу обертального руху технологічного обладнання з об'ємним регулюванням.

Матеріали і результати дослідження. На рис. 1 наведена типова принципова гідравлічна схема силової частини електрогідравлічного приводу обертального руху з об'ємним регулюванням, що містить дві аксіально-поршневі гідромашини: основний насос 2 і гідромотор 5. Вал насоса приводиться в обертання від асинхронного електродвигуна 1. Подача насоса регулюється зміною кута нахилу блоку циліндрів (або кута нахилу шайби) з допомогою механізму 3, яким у більшості випадків виступає електрогідравлічний підсилювач. Насос двома трубопроводами 4 з'єднаний з гідромотором. Вал гідромотора через редуктор 6 з'єднаний з керуємим об'єктом 7. Для компенсації витоків робочої рідини служить допоміжний насос 13 (зазвичай шестерінчастий або пластинчастий), що приводиться в обертання від валу основного насоса. Якщо кут нахилу блоку циліндрів (кут нахилу шайби) основного насоса регулюється за допомогою гідропідсилювача, то допоміжний насос використовується також для живлення гідропідсилювача рідиною під тиском. Тиск в напірній магістралі допоміжного насоса підтримується переливним клапаном 10. Ця магістраль через два підживлювальні клапани 9 підключена до трубопроводів, що з'єднують основний насос і гідромотор. При падінні тиску в одному з трубопроводів нижче допустимого значення відповідний підживлювальний клапан відкривається і пропускає рідину під тиском з напірної магістралі допоміжного насоса до тих пір, поки в трубопроводі не відновиться необхідний рівень тиску. Після цього підживлювальний клапан під дією тиску в трубопроводі закривається. Підживлювальні клапани повинні підтримувати в трубопроводі такий мінімальний тиск, щоб в основному насосі не виникала кавітація. Для цього встановлюється необхідний тиск в напірній магістралі допоміжного насоса шляхом регулювання натягу пружини (тиску спрацювання) переливного клапана 10.

Від виникнення надмірно високого тиску трубопроводів гідроприводу захищені двома запобіжними клапанами 8. При неприпустимому підвищен-

ні тиску в одному з трубопроводів відкривається відповідний запобіжний клапан, що пропускає рідину в інший трубопровід з низьким тиском. В лінії нагнітання допоміжного насоса також є запобіжний клапан 12, який захищає насос від підвищення тиску при засміченні фільтра 11.

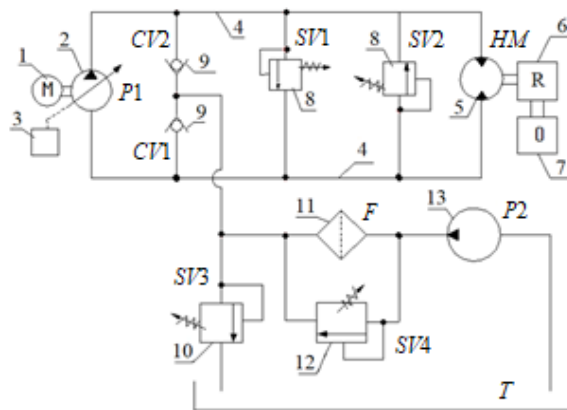


Рис. 1. Гідравлічна схема силової частини приводу з об'ємним регулюванням

Відзначимо позначення гідромашин і гідроапаратів на рис. 1. Тут $P1 \dots P2$ – насоси; HM – гідромотор; $CV1 \dots CV2$ – клапани зворотні; $SV1 \dots SV4$ – клапани запобіжні; F – фільтр.

Перед побудовою математичного опису силової частини електрогідравлічного приводу з об'ємним регулюванням, складемо розрахункову схему, з огляду на наступні основні допущення:

1. Асинхронний електродвигун 1 обертає вал насоса з кутовою швидкістю Ω_p , величина якої не залежить потужності, що розвивається насосом.
2. При роботі гідроприводу тиски в трубопроводах $4 p_1$ і p_2 не досягають значень, при яких відкриваються запобіжні клапани 8.
3. Тиск p_s в магістралі перед підживлювальними клапанами підтримується постійним.
4. Зусилля, що долаються гідромотором 5 при керуванні об'єктом 7, можуть бути представлені сумою моментів від дії приведених до валу гідромотора інерційного навантаження, позиційної навантаження та гідравлічного тертя.

5. Трубопроводи будемо приймати настільки короткими, щоб можна було в них нехтувати інерцією рідини та втратами тиску через опір тертя.

Розрахункова схема представлена на рис. 2. На цій схемі стрілками показані напрямки потоків рідини в той момент часу, коли тиск p_1 більше тиску p_2 . Також в схемі позначені: γ – кут нахилу блоку циліндрів (шайби) аксіально-поршневого насоса; t – час; Ω – кутова швидкість валу гідромотора; α – кут повороту валу гідромотора; Q_p , Q_m – ідеальні витрати насоса та гідромотора; Q_{op} , Q_{om} – витрати перетікання в насосі та гідромоторі; Q_{lp1} , Q_{lp2} , Q_{lm1} , Q_{lm2} – витрати витоків в лініях насоса та гідромотора; Q_{r1} , Q_{r2} – витрати підживлення скрізь підживлювальні клапани.

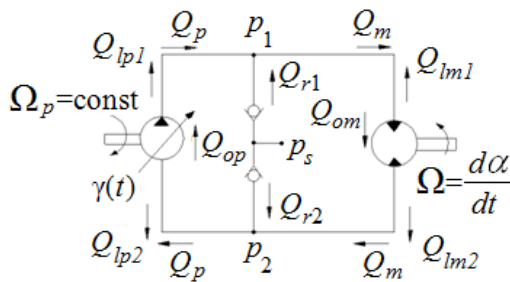


Рис. 2. Розрахункова схема силової частини гідроприводу

При всіх прийнятих вище допущеннях отриманню лінійної математичної моделі силової частини приводу з об'ємним регулюванням перешкоджає одна істотно нелінійна характеристика, яка визначає залежність витрат підживлення Q_{r1} і Q_{r2} через підживлювальні клапани від тисків p_1 і p_2 в трубопроводах. Якщо рівень тиску в трубопроводах виявляється нижче тиску підживлення p_s перед підживлювальними клапанами, то при малих змінах тисків можна застосувати співвідношення

$$Q_{r1} = k_{sv} (p_s - p_1); \quad (1)$$

$$Q_{r2} = k_{sv} (p_s - p_2); \quad (2)$$

де k_{sv} — провідність підживлювального клапана [14, 18].

Якщо рівень тиску в трубопроводах перевищує тиск підживлення

$$Q_{r1} = Q_{r2} = 0, \quad (3)$$

так як підживлювальні клапани закриті під дією тиску в трубопроводах.

При рівноважному стані гідроприводу, для якого ненавантажений вал гідромотора не обертається, рівень тиску в трубопроводах внаслідок витоків рідини з насоса і гідромотора та кінцевого значення провідності клапанів встановлюється нижче p_s . При коливаннях в кожен трубопровід через певний підживлювальний клапан на одному півперіоді при низькому тиску надходить кількість рідини, яке компенсує не тільки виток, але і стисливість рідини. На наступному півперіоді відбувається стиснення великого об'єму рідини в трубопроводі, що призводить до збільшення в ньому тиску. Надходження рідини в гідропривід через підживлювальні клапани супроводжується підвищенням середнього за період коливання тиску в трубопроводах або підвищенням рівня тиску в них. Кількість рідини, що надійшла в трубопроводи за період коливання, залежить від амплітуди коливання тиску p_1 і p_2 , тому середня за період провідність клапанів залежить від амплітуди коливань тиску в трубопроводах.

При дослідженні динаміки гідроприводу з малими відхиленнями змінних від сталих значень рівень тиску в трубопроводах може бути прийнятий

нижче тиску p_s , тому допустимо використовувати лінійні співвідношення (1, 2). При дослідженні динаміки гідроприводу з великими змінами змінних доводиться враховувати нелінійність характеристики підживлювальних клапанів.

Для моменту часу, коли при малому відхиленні блоку циліндрів (або похилої шайби) від положення рівноваги насос подає рідину по трубопроводу з тиском p_1 і всмоктує рідину з трубопроводу з тиском p_2 , рівняння витрат напишемо у вигляді:

для трубопроводу з тиском p_1 витрата насоса

$$Q_p = Q_m + Q_{op} + Q_{om} + Q_{lp1} + Q_{lm1} + Q_{c1} - Q_{r1}, \quad (4)$$

для трубопроводу з тиском p_2 витрата насоса

$$Q_p = Q_m + Q_{op} + Q_{om} - Q_{lp2} - Q_{lm2} - Q_{c2} + Q_{r2}. \quad (5)$$

У рівняннях (4) і (5) витрати Q_{c1} і Q_{c2} є тими складовими витрат, які пов'язані з компенсацією стисливості рідини. Решта складових позначені відповідно до розрахункової схеми (рис. 2). Для деякого спрощення виразів, що визначають коефіцієнти в наступних рівняннях, вважаємо насос і гідромотор гідромашинами однакового типу, аксіально-поршневими, що відрізняються тільки тим, що у насоса регулюється кут нахилу блоку циліндрів (або шайби), а у гідромотора не регулюється. В цьому випадку можна прийняти

$$Q_{op} = Q_{om} = Q_{ov}; \quad (6)$$

$$Q_{lp1} = Q_{lm1} = Q_{l1}; \quad (7)$$

$$Q_{lp2} = Q_{lm2} = Q_{l2}. \quad (8)$$

З огляду на ці співвідношення, визначимо складові витрати насоса у вигляді

$$Q_m = \frac{q_m}{2\pi} \Omega = \frac{q_m}{2\pi} \frac{d\alpha}{dt}; \quad (9)$$

$$Q_{ov} = k_{ov} (p_1 - p_2); \quad (10)$$

$$Q_{l1} = k_1 p_1; \quad (11)$$

$$Q_{l2} = k_1 p_2; \quad (12)$$

де q_m — робочий об'єм гідромотора; k_{ov} — провідність щілин, через які в насосі та гідромоторі відбувається перетікання рідини з порожнини з високим тиском в порожнину з низьким тиском; k_1 — провідність щілин, через які відбувається витік рідини з насоса та гідромотора.

Витрати Q_{r1} і Q_{r2} визначаємо за співвідношеннями (1) і (2), а витрати Q_{c1} і Q_{c2} в припущенні абсолютно жорстких стінок трубопроводів знаходимо за такими залежностями [8, 25]

$$Q_{c1} = \frac{W_0}{E_f} \frac{dp_1}{dt}; \quad (13)$$

$$Q_{c2} = \frac{W_0}{E_f} \frac{dp_2}{dt}; \quad (14)$$

де W_0 – внутрішній об'єм трубопроводу з підключеними до нього об'ємами порожнин насоса та гідромотора; E_f – об'ємний модуль пружності робочої рідини.

Підставимо складові витрат згідно співвідношенням (1, 2, 9-14) в рівняння (4, 5). Потім складемо ці рівняння і перетворимо

$$Q_p = \frac{q_m}{2\pi} \frac{d\alpha}{dt} + 2k_{ov}(p_1 - p_2) + k_1(p_1 - p_2) + \frac{k_{sv}}{2}(p_1 - p_2) + \frac{W_0}{2E_f} \frac{d(p_1 - p_2)}{dt}. \quad (15)$$

Ідеальну подачу насоса Q_p представимо у вигляді залежності від кута γ нахилу блоків циліндрів або кута нахилу шайби насоса

$$Q_p = \frac{q_p}{2\pi} \Omega_p, \quad (16)$$

де q_p – робочий об'єм насоса.

Для аксіально-поршневого насоса

$$q_p = F_p z_p D_p \operatorname{tg} \gamma, \quad (17)$$

де F_p – робоча площа одного поршня (плунжера) насоса; z_p – число поршнів; D_p – діаметр окружності, на якій розташовані осі поршнів насоса.

Як видно, функція $q_p(\gamma)$ є нелінійною. При малих відхиленнях блоку циліндрів (шайби) насоса від нейтрального положення зазначена функція може бути лінеаризована і рівняння (17) записані у вигляді

$$Q_p = k_{Q\gamma} \gamma, \quad (18)$$

де

$$k_{Q\gamma} = \frac{\partial Q_p}{\partial \gamma}. \quad (19)$$

Для аксіально-поршневого насоса

$$k_{Q\gamma} = \frac{F_p z_p D_p \Omega_p}{2\pi}. \quad (20)$$

Застосовуючи співвідношення (18), приведемо рівняння (15) до виду

$$\frac{q_m}{2\pi k_{Q\gamma}} \frac{d\alpha}{dt} + \frac{W_0}{2E_f k_{Q\gamma}} \frac{dp_m}{dt} + \frac{k_\Sigma}{k_{Q\gamma}} p_m = \gamma, \quad (21)$$

де

$$k_\Sigma = k_1 + 2k_{ov} + \frac{k_{sv}}{2}; \quad (22)$$

$$p_m = p_1 - p_2. \quad (23)$$

У рівнянні (21), крім вхідної величини γ і вихідної α , міститься змінний в часі перепад тиску p_m , який залежить від навантаження, що долається гідромотором. При дії інерційного навантаження величина p_m визначається по крутному моменту M_m , який входить в рівняння обертального руху валу гідромотора

$$M_m - M_{fr} - M_{poz} = J \frac{d^2 \alpha}{dt^2}, \quad (24)$$

де J – момент інерції оберткових з валом гідромотора частин (приведений момент інерції навантаження і ротора мотора). Надалі цю величину будемо називати наведеними моментом інерції гідромотора.

В рівнянні (24) M_{fr} – момент від сил тертя $M_{fr} = M_{fr1} + M_{fr2}$, де M_{fr1} та M_{fr2} – момент тертя в гідромоторі та момент тертя в навантаженні.

Крутний момент для об'ємної гідромашини [6, 26] визначається співвідношенням

$$M_m = \frac{q_m}{2\pi} p_m. \quad (25)$$

Момент тертя M_{fr1} створюється тертям в гідромоторі. У загальному випадку тертя в гідромоторі може бути змішаним. Для спрощення математичної моделі гідроприводу будемо враховувати тільки гідравлічне тертя [25, 29], вважаючи

$$M_{fr1} = k_{fr1} \frac{d\alpha}{dt}, \quad (26)$$

де k_{fr1} обчислюється за нахилом апроксимуючої характеристики $M_{fr1} = M_{fr1}(\Omega)$.

Момент тертя M_{fr2} , що виникає внаслідок тертя в навантаженні, представимо аналогічною залежністю

$$M_{fr2} = k_{fr2} \frac{d\alpha}{dt}. \quad (27)$$

Момент від дії позиційного навантаження

$$M_{poz} = k_{poz} \alpha, \quad (28)$$

де k_{poz} – жорсткість позиційного навантаження.

Використовуючи співвідношення (25-28), з рівняння (24) отримуємо

$$\frac{2\pi J}{q_m} \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{2\pi k_{fr}}{q_m} \frac{d\alpha}{dt} + \frac{2\pi k_{poz}}{q_m} \alpha = p_m, \quad (29)$$

де

$$k_{fr} = k_{fr1} + k_{fr2}. \quad (30)$$

Розглядаючи спільно рівняння (21) і (29), знаходим

$$\begin{aligned} & \frac{\pi J W_0}{E_f q_m k_{Q\gamma}} \frac{d^3 \alpha}{dt^3} + \left(\frac{\pi k_{fr} W_0}{E_f q_m k_{Q\gamma}} + \frac{2\pi k_{\Sigma} J}{q_m k_{Q\gamma}} \right) \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \\ & + \frac{q_m}{2\pi k_{Q\gamma}} \left(1 + \frac{2\pi^2 k_{poz} W_0}{E_f q_m^2} + \frac{4\pi^2 k_{\Sigma} k_{fr}}{q_m^2} \right) \frac{d\alpha}{dt} + \frac{2\pi k_{\Sigma} k_{poz}}{q_m k_{Q\gamma}} \alpha = \gamma \end{aligned} \quad (31)$$

В реальних гідроприводах зазвичай

$$1 + \frac{2\pi^2 k_{poz} W_0}{E_f q_m^2} + \frac{4\pi^2 k_{\Sigma} k_{fr}}{q_m^2} \approx 1. \quad (32)$$

Тому, замість (31) маємо

$$\begin{aligned} & \frac{\pi J W_0}{E_f q_m k_{Q\gamma}} \frac{d^3 \alpha}{dt^3} + \left(\frac{\pi k_{fr} W_0}{E_f q_m k_{Q\gamma}} + \frac{2\pi k_{\Sigma} J}{q_m k_{Q\gamma}} \right) \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \\ & + \frac{q_m}{2\pi k_{Q\gamma}} \frac{d\alpha}{dt} = \gamma - \frac{2\pi k_{\Sigma} k_{poz}}{q_m k_{Q\gamma}} \alpha \end{aligned} \quad (33)$$

Введемо в розгляд наступні параметри: постійна часу гідроприводу

$$T_{hd} = \frac{q_m}{2\pi k_{Q\gamma}}. \quad (34)$$

постійна часу гідромотора

$$T_m = \sqrt{\frac{2\pi^2 J W_0}{q_m^2 E_f}}. \quad (35)$$

коефіцієнт відносного демпфірування гідромотора

$$\zeta = \frac{\pi (2J E_f k_{\Sigma} + k_{fr} W_0)}{\sqrt{2J W_0 E_f q_m^2}}. \quad (36)$$

коефіцієнт власного зворотного зв'язку

$$k_{ofb} = \frac{2\pi k_{\Sigma} k_{poz}}{q_m k_{Q\gamma}}. \quad (37)$$

Як видно, з цього виразу, коефіцієнт власного зворотного зв'язку силової частини гідроприводу викликаний спільною дією позиційного навантаження і негерметичністю гідромашин.

З урахуванням введених параметрів рівняння (37) перетворимо по Лапласу [8, 10, 15] до виду

$$T_{hd} s (T_m^2 s^2 + 2\zeta_m T_m s + 1) \alpha(s) = \gamma(s) - k_{ofb} \alpha(s), \quad (38)$$

де s – змінна Лапласа.

У разі відсутності позиційного навантаження (28), або повної герметичності гідроприводу, або при несуттєвому моменті від дії сил позиційного навантаження і високої герметичності гідромашин (що зазвичай має місце на практиці) коефіцієнтом власного зворотного зв'язку можна знехтувати. Слід зазначити, що даний коефіцієнт в разі його помітного впливу можна врахувати у зовнішньому зворотному зв'язку автоматичного електрогідралічного приводу.

Тоді, передавальна функція для кута повороту валу гідромотора α по куту нахилу блоку циліндрів (або шайби) γ має вид

$$W_{\alpha\gamma}(s) = \frac{\alpha(s)}{\gamma(s)} = \frac{1}{T_{hd} s (T_m^2 s^2 + 2\zeta_m T_m s + 1)}, \quad (39)$$

або для кутової швидкості валу гідромотора Ω по куту γ

$$W_{pd}(s) = \frac{\Omega(s)}{\gamma(s)} = \frac{s\alpha(s)}{\gamma(s)} = \frac{k_{Q\gamma}}{T_m^2 s^2 + 2\zeta_m T_m s + 1}, \quad (40)$$

де $k_{Q\gamma}$ – коефіцієнт передачі силової частини приво-
воду

$$k_{Q\gamma} = \frac{2\pi k_{Q\gamma}}{q_m}. \quad (41)$$

Як було раніше відмічене, в сучасних аксіально-поршневих насосах керування поворотом блоку циліндрів (або шайби) здійснюється використанням електрогідралічного підсилювача. Зв'язок кута нахилу блоку циліндрів (або шайби) γ з керуючою напругою U розглядається у виді диференційного рівняння [10, 26]

$$T_{rp} \frac{d\gamma}{dt} + \gamma = k_{\gamma U} U, \quad (42)$$

де постійна часу процесу T_{rp} регулювання та коефіцієнт передачі $k_{\gamma U}$ визначаються по паспортним даним насоса.

Рівняння (42) дає наступну передавальну функцію для кута нахилу блоку циліндрів (або шайби) γ по керуючій напрузі U

$$W(s) = \frac{k_{\gamma U}}{T_{rp} s + 1}. \quad (43)$$

Отже, математичну модель динамічних характеристик силової частини електрогидравлічного приводу обертального руху технологічного обладнання з об'ємним регулювання складають диференціальні рівняння (33) та (42), яким відповідають передавальні функції (39) та (43).

Перевірка адекватності розробленої математичної моделі виконана за критерієм Фішера на експериментальному стенді [27] шляхом зіставлення експериментальних та розрахункових перехідних процесів для кутової швидкості валу гідромотора при подачі керуючої напруги на вхід гідропідсилювача (рис. 3). На стенді використаний насос типу НАС 0,04/20 з максимальним робочим об'ємом 0,04 л та гідромотор типу ПМ № 2,5А з робочим об'ємом 0,0317 л). Позитивна оцінка адекватності дає підставу покласти розроблену математичну модель в основу для подальшої розробки систем автоматичного керування технологічним обладнанням.

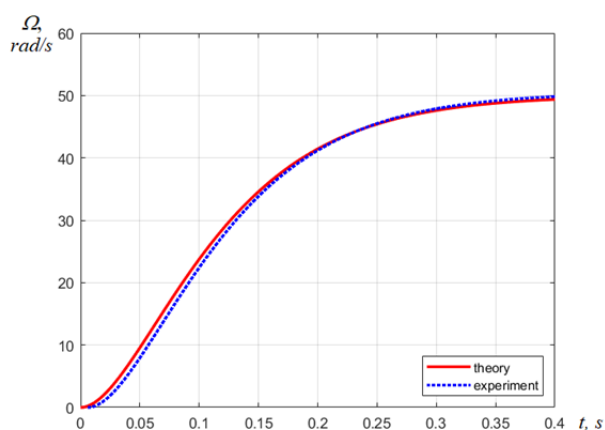


Рис. 3. Перехідні процеси для кутової швидкості обертання валу гідромотора

Висновки. Таким чином, розроблено адекватну математичну модель динамічних характеристик силової частини електрогидравлічного приводу обертального руху технологічного обладнання з об'ємним регулюванням. Силовa частина включає об'ємний насос з регульованою подачею, допоміжні пристрої та об'ємний гідромотор. В якості основного

насоса та гідромотора використано дві аксіально-поршневі гідромашини. Для розробки математичної моделі побудована розрахункова схема та прийняті основні допущення. Математична модель враховує інерційність рухомих частин гідромотору та стисливість робочої рідини в трубопроводах та порожнинах насоса і гідромотора. Виконана лінеаризація математичної моделі, отримана передавальна функція для кута повороту валу гідромотора по куту нахилу шайби або блоку циліндрів. Виконана перевірка адекватності математичної моделі динамічних характеристик шляхом зіставлення експериментальних та розрахункових перехідних процесів для кутової швидкості валу гідромотора при подачі керуючої напруги на вхід гідропідсилювача. Адекватна математична модель динамічних характеристик силової частини електрогидравлічного приводу обертального руху, що представлена, покладена в основу для подальшої розробки систем автоматичного керування технологічним обладнанням.

Література

1. Кріль О.С., Шевченко С.В., Соколов В.І. Проектування металорізальних верстатів у середовищі APM WinMachine. – Луганськ: ЧНУ ім. В. Даля, 2011. – 388 с.
2. Харламов Ю.А., Соколов В.І., Кріль О.С. Трибологическая надежность металлорежущих станков. – Северодонецк: ВНУ ім. В. Даля, 2017. – 320 с.
3. Кріль О.С., Соколов В.І. Тривимірне моделювання металорізальних верстатів та інструментального оснащення. – Северодонецк: ЧНУ ім. В. Даля, 2016. – 160 с.
4. Krol O., Tsankov P., Sokolov V. Rational choice of two-support spindles for machining centers with lubrication system // EUREKA: Physics and Engineering. – N. 3. – 2018. – P. 52–58.
5. Krol O., Sokolov V. Rational choice of machining tools using prediction procedures // EUREKA: Physics and Engineering. – N 4. – 2018. – P. 15–20.
6. Рассказова Ю.Б., Степанова О.Г., Азаренко Н.Г. Совершенствование электрогидравлических приводов машиностроительного оборудования. – Северодонецк: ВНУ ім. В. Даля, 2016. – 100 с.
7. Sokolov V., Azarenko N., Sokolova Ya. Simulation of the power unit of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 12. – N 4. – 2012. – Lublin, Poland. – pp. 268 - 273.
8. Sokolov V., Krol O. Determination of Transfer Functions for Electrohydraulic Servo Drive of Technological Equipment // Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2019. – Springer, Cham. – P. 364–373.
9. Соколов В.І., Степанова О.Г., Батурін Є.О. Дослідження динамічних характеристик електрогидравлічного приводу технологічного обладнання // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. – 2019. – № 1 (249). – С. 55–60.
10. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Automatic Control System for Electrohydraulic Drive of Production Equipment // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE. – 2018.
11. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Mathematical model of the automatic electrohydraulic drive with volume regula-

- tion // TEKA. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – Vol. 17. – N 1. – 2017. – Lublin – Rzeszow, Poland. – P. 27-32.
12. Krol O., Sokolov V.: Parametric Modeling of Gear Cutting Tools. In: Advances in Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 4, pp. 3-11. Springer, Cham (2019).
 13. Krol O., Sokolov V.: Parametric Modeling of Transverse Layout for Machine Tool Gearboxes. In: Advances in Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 4, pp. 122-130. Springer, Cham (2019).
 14. 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.
 15. 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).
 16. 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).
 17. Кріль О.С., Шумакова Т.О., Соколов В.І. Проектування зуборізних інструментів за допомогою системи КОМПАС. – Луганськ: ЧНУ ім. В. Даля. – 2013. – 142 с.
 18. Соколов В.І., Кріль О.С., Єпіфанова О.В. Гідравліка. – Северодонецьк: ЧНУ ім. В. Даля, 2017. – 160 с.
 19. Krol, O., Sokolov, V.: 3D modelling of angular spindle's head for machining centre. *Journal of Physics: Conference Series* 1278, 012002 (2019).
 20. Sokolov V., Krol O. Installations criterion of deceleration device in volumetric hydraulic drive // *Procedia Engineering*. – Vol. 206. – P. 936–943.
 21. Sokolov V. Diffusion of Circular Source in the Channels of Ventilation Systems // *Advances in Engineering Research and Application*. ICERA 2018. Lecture Notes in Networks and Systems. – Vol. 63. – 2019. – Springer, Cham. – P. 278-283.
 22. Соколов В.І., Кріль О.С., Єпіфанова О.В. Дифузійні процеси в системах вентиляції. – Северодонецьк: ЧНУ ім. В. Даля. – 2018. – 148 с.
 23. Krol O., Sokolov V. Modeling Carrier System Dynamics for Metal-Cutting Machines // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE. – 2018.
 24. Krol O., Sokolov V. Development of models and research into tooling for machining centers // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – Vol. 3. – Issue 1 (93). – 2018. – P. 12–22.
 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., Krol, O., Baturin, Y.: Dynamics Research and Automatic Control of Technological Equipment with Electrohydraulic Drive. 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE (2019).
 27. Степанова О.Г. Експериментальні дослідження гідравлічного приводу технологічного обладнання / О.Г. Степанова // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Северодонецьк: ЧНУ ім. В. Даля, 2019. – № 1 (249). – С. 61-65.
 28. Krol O., Sokolov V. Modelling of spindle nodes for machining centers // *Journal of Physics: Conference Series*. – Vol. 1084. – 2018.
 29. 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. LNME, vol. 1, pp. 707-715. Springer, Cham (2020).

References

1. Krol O., Shevchenko S.V., Sokolov V. Design machine tools in environment APM WinMachine. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2011.
2. . Kharlamov Y., Sokolov V., Krol O. Tribologicheskaya nadezhnost metallovezhushchih stankov. – Severodonetsk: VNU im. V. Dalia, 2017. – 320 s.
3. Krol O.S. Three-dimensional modeling of machine tools and tool equipment. Handbook. / O.S. Krol, V.I. Sokolov. – Severodonetsk: VDEUNU, 2016. – 160 p.
4. Krol O., Tsankov P., Sokolov V. Rational choice of two-support spindles for machining centers with lubrication system // *EUREKA: Physics and Engineering*. – N. 3. – 2018. – P. 52–58.
5. Krol O., Sokolov V. Rational choice of machining tools using prediction procedures // *EUREKA: Physics and Engineering*. – N 4. – 2018. – P. 15-20.
6. Rasskazova Y., Stepanova O., Azarenko N. Perfection of Electrohydraulic Drives of Machine-Building Equipment. – Severodonetsk: VDEUNU, 2016. – 100 s.
7. Sokolov V., Azarenko N., Sokolova Ya. Simulation of the power unit of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation // *TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture*. – Vol. 12. – N 4. – 2012. – Lublin, Poland. – pp. 268 – 273.
8. Sokolov V., Krol O. Determination of Transfer Functions for Electrohydraulic Servo Drive of Technological Equipment // *Advances in Design, Simulation and Manufacturing*. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2019. – Springer, Cham. – P. 364-373.
9. Sokolov V.I., Stepanova O.H., Baturin Y.O. Research of dynamic characteristics for electrohydraulic drive of technological equipment // *Visn. Skhidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dalia*. – 2019. – № 1 (249). – S. 55-60.
10. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Automatic Control System for Electrohydraulic Drive of Production Equipment // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE. – 2018.
11. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Mathematical model of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation // *TEKA. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. – Vol. 17. – N 1. – 2017. – Lublin – Rzeszow, Poland. – P. 27-32.
12. Krol O., Sokolov V.: Parametric Modeling of Gear Cutting Tools. In: *Advances in Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, vol. 4, pp. 3-11. Springer, Cham (2019).
13. Krol O., Sokolov V.: Parametric Modeling of Transverse Layout for Machine Tool Gearboxes. In: *Advances in Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, vol. 4, pp. 122-130. Springer, Cham (2019).
14. Kovalenko A.A. Osnovy tehnikeskoy mehaniki zhidkostej i gazov: uchebnoe posobie dlja vuzov / A.A. Kovalenko, V.I. Sokolov, A.H. Dymnich, P.E. Uvarov. - Lugansk: VUGU, 1998. - 272 s.
15. 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).
16. 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).

17. Krol O., Shumakova T., Sokolov V. Design metal cutting instruments by dint of system of KOMPAS. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2013.
18. Sokolov V., Krol O., Yepifanova O. Hydraulics. V. Dahl EUNU, Severodonetsk, 2017.
19. Krol, O., Sokolov, V.: 3D modelling of angular spindle's head for machining centre. Journal of Physics: Conference Series 1278, 012002 (2019).
20. Sokolov V., Krol O. Installations criterion of deceleration device in volumetric hydraulic drive // Procedia Engineering. – Vol. 206. – P. 936–943.
21. Sokolov V. Diffusion of Circular Source in the Channels of Ventilation Systems // Advances in Engineering Research and Application. ICERA 2018. Lecture Notes in Networks and Systems. – Vol. 63. – 2019. – Springer, Cham. – P. 278–283.
22. Sokolov V., Krol O., Yepifanova O. Diffusion processes in ventilation systems. V. Dahl EUNU, Severodonetsk, 2018.
23. Krol O., Sokolov V. Modeling Carrier System Dynamics for Metal-Cutting Machines // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE. – 2018.
24. Krol O., Sokolov V. Development of models and research into tooling for machining centers // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Vol. 3. – Issue 1 (93). – 2018. – P. 12–22.
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., Krol, O., Baturin, Y.: Dynamics Research and Automatic Control of Technological Equipment with Electrohydraulic Drive. 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE (2019).
27. Stepanova O.H. Experimental researches of hydraulic drive for technological equipment // Visn. Skhidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dalia. - 2019. - № 1 (249). - S. 61–65.
28. Krol O., Sokolov V. Modelling of spindle nodes for machining centers // Journal of Physics: Conference Series. – Vol. 1084. – 2018.
29. 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).

Степанова О.Г. Математическая модель динамических характеристик силовой части электрогидравлического привода вращательного движения

Представлена математическая модель динамических характеристик силовой части электрогидравлического привода вращательного движения технологического оборудования с объемным регулированием. Рассматриваемая силовая часть гидравлического привода включает объемный насос с регулируемой подачей, вспомогательные устройства и объемный гидромотор. В качестве основного насоса и гидромотора использованы две аксиально-поршневые гидромашины. Для построения математической модели приведена расчетная схема и приняты основные допущения. Математическая модель динамических характеристик силовой части электрогидравлического привода учитывает инерционность подвижных частей гидромотора и сжимаемость рабочей жидкости в трубопроводах и полостях насоса и гидромотора. Выполнена линеаризация математической модели, получена передаточная функция для угла поворота вала гидромотора по углу наклона шайбы (блока цилиндров). Проверка адек-

ватности математической модели динамических характеристик выполнена путем сопоставления экспериментальных и расчетных переходных процессов для угловой скорости вала гидромотора при подаче напряжения на вход гидроусилителя, управляющего наклонной шайбой (блоком цилиндров). Предложенная адекватная математическая модель динамических характеристик силовой части электрогидравлического привода вращательного движения положена в основу для дальнейшей разработки систем автоматического управления технологическим оборудованием.

Ключевые слова: технологическое оборудование, электрогидравлический привод, объемное регулирование, динамические характеристики, передаточная функция, переходной процесс.

Stepanova O.G. Mathematical model of dynamic characteristics for power part of rotary motion electrohydraulic drive

The mathematical model of the dynamic characteristics for the power part of the rotary motion electrohydraulic drive for technological equipment with volume regulation is presented. The considered power part of the hydraulic drive includes the volumetric pump with adjustable flow, auxiliary devices and the volumetric hydraulic motor. Two axial-piston hydraulic machines were used as the main pump and the hydraulic motor. To build the mathematical model, the settlement scheme is given and basic assumptions are made. The mathematical model of the dynamic characteristics for the power part of the electrohydraulic drive takes into account the inertia of the moving parts for the hydraulic motor and the compressibility of the working fluid in the pipelines and cavities of the pump and the hydraulic motor. The following basic assumptions are made. The electric motor rotates the pump shaft with an angular velocity, the value of which does not depend on the power developed by the pump. The hydraulic pressure actuator in the pipelines do not reach the values at which the safety valves open. The pressure in the line before the make-up valves is kept constant. The loads overcome by the hydraulic motor are represented by the sum of the moments from the action of the inertial load, positional load and hydraulic friction brought to the hydraulic motor shaft. Pipelines are so short that fluid inertia and pressure loss due to friction can be neglected. The linearization of the mathematical model is performed, the transfer function for the rotation angle by the angle of inclination for the washer (cylinder block) is obtained. The adequacy for the mathematical model of the dynamic characteristics was verified by comparing the experimental and calculated transition processes for the angular velocity of the hydraulic motor shaft when applying voltage to the input of the electrohydraulic amplifier controlling the inclined washer (cylinder block). The proposed adequate mathematical model of the dynamic characteristics for the power part of the electro-hydraulic rotary drive is the basis for the further development of automatic control systems for technological equipment.

Keywords: technological equipment, electrohydraulic drive, volume regulation, dynamic characteristics, transfer function, transition process.

Степанова Оксана Геннадіївна – аспірант кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк) ogstepanova@gmail.com

Стаття подана 10.02.2020 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-87-92>

УДК 62/3:629.4:625.42

ЗАСТОСУВАННЯ БОРТОВИХ ЄМНІСНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ НЕЗНАЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА ЕНЕРГОЄМНОСТІ НА РУХОМОМУ СКЛАДІ МЕТРОПОЛІТЕНУ

Сулим А.О., Хозя П.О., Мельник О.О.

USE OF ON-BOARD LOW POWER AND CAPACITY ENERGY STORAGE DEVICES ON THE METRO ROLLING STOCK

Sulym A.O., Khozia P.O., Melnyk O.O.

В статті запропоновано технічне рішення щодо застосування ємнісних накопичувачів енергії на рухомому складі метрополітену. Сутність технічного рішення полягає у використанні в силовому колі рухомого складу метрополітену ємнісного накопичувача порівняно незначної потужності та енергоємності. Встановлено, що впровадження запропонованого технічного рішення дозволить підвищити енергетичну ефективність рухомого складу метрополітену та покращити його техніко-експлуатаційні характеристики.

Ключові слова: бортовий ємнісний накопичувач енергії, потужність, енергоємність, рухомий склад метрополітену.

Вступ. Залізничний транспорт займає провідне місце у задоволенні потреб економіки та населення України в перевезеннях, є важливим фактором забезпечення соціально-економічного зростання і зміцнення обороноздатності держави [1–4].

Однією з важливих ланок в сучасній транспортній інфраструктурі міст-мегаполісів є метрополітен, який порівняно з іншими видами міського транспорту володіє найбільшими перевізними можливостями. Крім того, метрополітен швидкий та комфортний перевізник, що дозволяє його класифікувати як перспективний вид пасажирського транспорту на досить тривалий період. Разом з тим, вітчизняні метрополітени є потужними та енергоємними споживачами електроенергії. Тому на сьогоднішній день у зв'язку з постійним поетапним підвищенням вартості енергоресурсів гостро постає питання щодо необхідності підвищення енергоефективності перевезень в метрополітені [5, 6].

На даний час в метрополітенах України перевезення пасажирів забезпечується, насамперед, поїздами з колекторними двигунами постійного струму послідовного збудження та релейно-контактними системами керування. З метою скорочення споживання електроенергії на тягу в останні роки створю-

ється новий та модернізується існуючий вітчизняний рухомий склад метрополітену. Головними відмінностями новоствореного та модернізованого рухомого складу є використання асинхронного електроприводу змінного струму, мікропроцесорної системи керування, а також впровадження іншого енергозберігаючого обладнання та технологій, насамперед систем рекуперації. Таким чином, в метрополітенах України виконуються заходи з енергозбереження та підвищення енергоефективності рухомого складу метрополітену шляхом заміни застарілого тягового обладнання на нове з реалізацією рекупративного гальмування [5].

За результатами досліджень [5–14] встановлено, що при ефективному використанні електроенергії рекупративного гальмування рухомого складу метрополітену можливо скоротити споживання електроенергії на тягу до 40 %. Однак в умовах реальної експлуатації на величину використання електроенергії рекуперації впливає багато факторів [5–9, 15]. Серед основних можна виділити наступні: інтенсивність руху в зоні рекуперації, режим руху інших споживачів електроенергії, відстань між станціями та профіль колії. За результатами аналізу досліджень [7–9] встановлено, що за існуючої інфраструктури системи тягового енергозабезпечення метрополітену використання електроенергії рекуперації має імовірнісний характер. Ефективність використання електроенергії рекупративного гальмування складає на рівні 5–10 %, що споживається на тягу [8]. Отже, в даний час можливості рекуперації використовуються не в повному обсязі і існує проблема реалізації надлишкової електроенергії за відсутності споживачів в зоні рекуперації. Як наслідок, існують резерви щодо підвищення енергоефективності рухомого складу метрополітену за умов ефективного використання електроенергії рекупративного гальмування.

Із робіт [5–11, 15–17] відомо, що одним з перспективних напрямків підвищення енергоефективності рухомого складу з системами рекуперації є впровадження на його борту накопичувачів енергії. Ідея застосування накопичувачів енергії не є новою і має більш ніж п'ятдесятилітню історію. Однак не дивлячись на те, що в останній час спостерігається значний прогрес в розвитку накопичувачів енергії, перетворювальної техніки і техніки управління, все ж використання потужних та енергоємних накопичувачів енергії в даний час є проблематичним [10, 15, 18, 19]. При цьому основними перепонами є масогабаритні параметри накопичувачів та перетворювачів, а також їх вартість. На сьогоднішній день значна кількість досліджень як вітчизняних, так і закордонних вчених направлена на вирішення зазначених проблем.

Але слід зазначити, що на даний час промисловістю освоєно виробництво силових ємнісних накопичувачів енергії порівняно незначної потужності та енергоємності, які складаються з конденсаторних модулів та мають блочно-модульну конструкцію [5, 11, 14–16, 18, 19]. При цьому одним з важливих питань є розробка технічного рішення щодо ефективного керування енергообмінними процесами між контактною мережею, електродвигунами рухомого складу та бортовим ємнісним накопичувачем енергії під час штатних і аварійних режимів роботи системи тягового енергозабезпечення метрополітену.

Метою роботи є розробка технічного рішення щодо впровадження бортових ємнісних накопичувачів незначної потужності та енергоємності на рухомому складі метрополітену з системами рекуперації.

Викладення основного матеріалу дослідження. У порівнянні з існуючими технічними рішеннями [20–22], в яких запропоновано використовувати потужні та енергоємні накопичувачі енергії з можливістю збереження повного об'єму надлишкової електроенергії рекуперативного гальмування, в основу розробки даного технічного рішення поставлено задачу створення пристрою для накопичення енергії рекуперативного гальмування рухомого складу метрополітену за рахунок спрощення конструкції, зменшення масогабаритів і вартості. При цьому має забезпечуватись достатня ефективність накопичення та використання електроенергії в автоматичному режимі керування енергообмінними процесами.

Розроблене технічне рішення передбачає використання в силових колах рухомого складу метрополітену бортових ємнісних накопичувачів енергії порівняно невеликої потужності та енергоємності – порядку 500–1000 кВт та 0,6–3 кВт·год відповідно. Це відповідає близько 7–12 конденсаторним модулям типу 60ЕК406 виробництва фірми ЗАТ «ЕЛТОН» («Есма»), які можливо розмістити на рухомому складі метрополітену без суттєвих компонувальних переробок.

Сутність заявленого технічного рішення пояснюється фігурою креслення (рис.), на якій представлена принципова блок-схема пристрою.

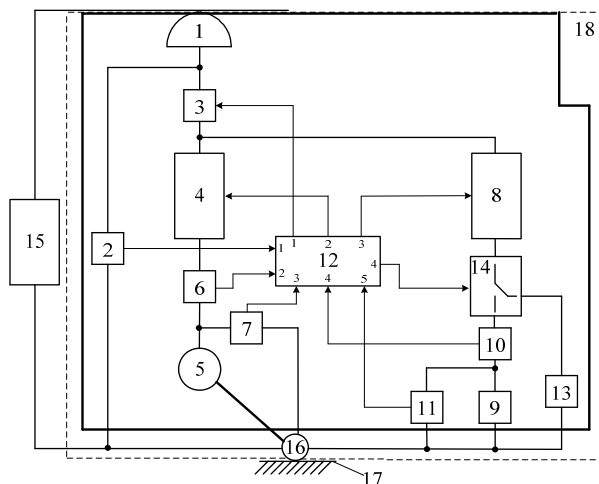


Рис. Пристрій для накопичення енергії рекуперативного гальмування рухомого складу метрополітену

Пристрій для накопичення енергії рекуперативного гальмування рухомого складу метрополітену містить струмоприймач 1, датчик напруги контактної мережі 2, керований комутатор контактної мережі 3, блок перетворення електроенергії 4, електродвигун 5, датчик струму електродвигуна 6, датчик напруги електродвигуна 7, реверсивний перетворювач 8, ємнісний накопичувач 9, датчик струму накопичувача 10, датчик напруги накопичувача 11, блок керування 12, гальмівний резистор 13 та керований перемикач накопичувача і гальмівного резистора 14.

Струмоприймач 1 виконаний з можливістю з'єднання з контактною мережею 15 і послідовно з'єднаний з електродвигуном 5 через керований комутатор контактної мережі 3, блок перетворення електроенергії 4 і датчик струму електродвигуна 6. Вихід струмоприймача 1 з'єднаний з датчиком напруги контактної мережі 2. Датчик напруги електродвигуна 7 паралельно підключений до електродвигуна 5. Електродвигун 5 виконаний з можливістю механічного з'єднання з приводними колесами транспортного засобу 16 і рейкою 17. Вхід реверсивного перетворювача 8 з'єднаний з виходом керованого комутатора контактної мережі 3, а його вихід з'єднаний з накопичувачем 9 та гальмівним резистором 13 через керований перемикач накопичувача і гальмівного резистора 14.

Ємнісний накопичувач 9 виконаний у вигляді конденсаторних модулів, підключений до реверсивного перетворювача 8 та з'єднаний з датчиком струму накопичувача 10 і датчиком напруги накопичувача 11 відповідно послідовно і паралельно.

Гальмівний резистор 13 призначений для поглинання надлишкової енергії рекуперації і з'єднаний з ємнісним накопичувачем 9 паралельно.

Блок керування 12 виконаний у вигляді мікропроцесора і призначений для здійснення в автоматичному режимі керування енергообмінними процесами між контактною мережею 15, електродвигуном 5 та ємнісним накопичувачем 9. Входи 1–5 блоку керування 12 з'єднані з датчиками 2, 6, 7, 10, 11 відповідно, а його виходи 1–4 з'єднані з керованим комутатором контактної мережі 3, блоком перетворення

електроенергії 4, реверсивним перетворювачем 8 та керованим перемикачем накопичувача і гальмівного резистора 14 відповідно.

Блок керування 12 під час будь-якого режиму ведення (тяги, вибігу, рекуперативного гальмування) на входи 1-5 отримує сигнали з датчиків 2, 6, 7, 10, 11 відповідно, а через виходи 1-4 здійснює керування енергообмінними процесами.

Датчик 2 контролює напругу контактної мережі 15, датчик 6 – струм електродвигуна 5, датчик 7 – напругу електродвигуна 5, датчик 10 – струм накопичувача 9, датчик 11 – напругу ємнісного накопичувача 9.

Пристрій розміщений на рухомому складі метрополітену 18.

Пристрій можна використовувати при штатних та аварійних режимах роботи системи енергозабезпечення метрополітену. При штатних ситуаціях експлуатації рухомого складу робота пристрою пояснюється для режимів тяги, вибігу та рекуперативного гальмування.

Робота пристрою здійснюється таким чином.

Приклад 1. Штатні режими роботи системи енергозабезпечення метрополітену.

Режим тяги.

Першочерговий рух рухомого складу метрополітену 18 здійснюється шляхом підключення струмоприймача 1 до контактної мережі 15 за допомогою контактного проводу (не показаний). При цьому рухомий контакт струмоприймача 1 з'єднаний з нерухомим контактом контактної мережі 15. Електродвигун 5, що отримує енергію від блока перетворення електроенергії 4, з'єднаний через керований комутатор контактної мережі 3 з контактною мережею 15, приводить у дію приводне колесо 16, що рухається по рейці 17. При цьому контакт керованого комутатора контактної мережі 3 – замкнений; група ключів блоку перетворення електроенергії 4 працюють в режимі замкнення-розмикання та регулюють напругу на електродвигуні 5; ключі реверсивного перетворювача 8 – розімкненні; керований перемикач накопичувача і гальмівного резистора 14 в положенні замкнення кола гальмівного резистора 13. Ємнісний накопичувач 9 знаходиться в розрядженому стані.

При попередньо зарядженому накопичувачі електродвигун 5 отримує енергію від блока перетворення електроенергії 4 через реверсивний перетворювач 8 з ємнісного накопичувача 9. При цьому контакт керованого комутатора контактної мережі 3 – розімкнений; ключі блоку перетворення електроенергії 4 працюють в режимі замкнення-розмикання та регулюють напругу на електродвигуні 5; ключі реверсивного перетворювача 8 працюють в режимі замкнення-розмикання та регулюють напругу та струм в колі ємнісного накопичувача 9; керований перемикач гальмівного резистора і накопичувача 14 в положенні замкнення кола ємнісного накопичувача 9.

При розряді ємнісного накопичувача 9 живлення електродвигуна 5 здійснюється від контактної мережі 15. При цьому контакт керованого комутато-

ра контактної мережі 3 – замкнений; ключі блоку перетворення електроенергії 4 працюють в режимі замкнення-розмикання та регулюють напругу на електродвигуні 5; ключі реверсивного перетворювача 8 – розімкненні; керований перемикач гальмівного резистора і накопичувача 14 в положенні замкнення кола гальмівного резистора 13.

Режим вибігу.

Струмоприймач 1 з'єднаний з контактною мережею 15 за допомогою контактного проводу (не показаний) і отримує від неї електроенергію.

При цьому контакт керованого комутатора контактної мережі 3 – замкнений; ключі блоку перетворення електроенергії 4 – розімкненні; ключі реверсивного перетворювача 8 – розімкненні; керований перемикач гальмівного резистора і накопичувача 14 в положенні замкнення кола гальмівного резистора 13. Таким чином, електродвигун 5 від'єднаний від контактної мережі 15 та ємнісного накопичувача 9.

Режим рекуперативного гальмування.

При даному режимі ведення рухомого складу метрополітену 18 електродвигун 5 відключається від контактної мережі 15 та працює в режимі генератора. Блок керування 12 через виходи 1-4 здійснює процес заряду ємнісного накопичувача 9. При цьому контакт керованого комутатора контактної мережі 3 – розімкнений; ключі блоку перетворення електроенергії 4 працюють в режимі замкнення-розмикання; ключі реверсивного перетворювача 8 працюють в режимі замкнення-розмикання та регулюють струм і напругу заряду ємнісного накопичувача 9; керований перемикач гальмівного резистора і накопичувача 14 в положенні замкнення кола ємнісного накопичувача 9. Рівень заряду ємнісного накопичувача 9 контролюють датчики 10 та 11.

При повному заряді ємнісного накопичувача 9 блоком керування 12 здійснюється перевірка умов наявності інших споживачів в контактній мережі 15 за допомогою датчика напруги контактної мережі 2. При значенні напруги контактної мережі 15 меншого за задане, що відповідає значенню напруги холостого ходу тягової підстанції, блок керування 12 подає сигнал на замкнення керованого комутатора контактної мережі 3 та розмикання ключів реверсивного перетворювача 8. При цьому ключі блоку перетворення електроенергії 4 залишаються працювати в режимі замкнення-розмикання, керований перемикач гальмівного резистора і накопичувача 14 в положенні замкнення кола ємнісного накопичувача 9. За відсутності споживачів електроенергії в контактній мережі 15 блок керування 12 подає сигнал на розмикання керованого комутатора контактної мережі 3, на роботу ключів реверсивного перетворювача 8 в режимі замкнення-розмикання та переключення керованого перемикача гальмівного резистора і накопичувача 14 в положення кола гальмівного резистора 13, ключі блоку перетворення електроенергії 4 при цьому залишаються в режимі замкнення-розмикання. Надлишкова енергія, що генерується електродвигуном 5, поглинається гальмівним резистором 13.

Приклад 2. Аварійний режим роботи системи енергозабезпечення метрополітену.

При зменшенні напруги в контактній мережі 15 до значення 550 В і нижче або у разі її аварійного відключення датчик напруги контактної мережі 2 направляє сигнал на вхід 1 блока керування 12, який в свою чергу через вихід 1 формує команду на розрив і направляє її керованому комутатору контактної мережі 3. В результаті з'єднання електродвигуна 5 з контактною мережею 15 розривається.

Блок керування 12 направляє сигнал на замикання контакту керуючого перемикача гальмівного резистора і накопичувача 14, після чого живлення електродвигуна 5 здійснюється від ємнісного накопичувача 9. Блок перетворення електроенергії 4 та реверсивний перетворювач 8 забезпечують живлення електродвигуна 5 до використання повного об'єму електроенергії ємнісного накопичувача 9.

Одночасно датчик напруги контактної мережі 2 контролює стан напруги контактної мережі 15. Після підвищення напруги в контактній мережі 15 до значення більшого, ніж 550 В, за сигналом датчика напруги контактної мережі 2 блок керування 12 подає команду на замикання контакту керованого комутатора контактної мережі 3 і подальше живлення електродвигуна 5 здійснюється від контактної мережі 15 з одночасною зарядкою ємнісного накопичувача 9 до мінімального значення робочої напруги.

Для оцінки можливої кількості заощадженої електроенергії на рухомому складі метрополітену за рахунок впровадження зазначеного технічного рішення виконанні теоретичні дослідження за допомогою атестованих комп'ютерних програм «Motion Simulation» та «Рекуперація енергії». Дослідження проводились за умов максимального завантаження вагонів поїзда метрополітену під час його руху між кінцевими станціями Святошинсько-Броварської лінії КП «Київський метрополітен» з дотриманням «непікового» графіку руху. При дослідженнях прийнято, що потужність бортового ємнісного накопичувача енергії складає 840 кВт, енергоємність – 1,25 кВт·год. За результатами виконаних досліджень встановлено, що запропоноване технічне рішення при заданих умовах дозволить підвищити енергоефективність рухомого складу метрополітену з системами рекуперації на рівні 7 %.

Висновки. 1. У порівнянні з відомими запропоноване технічне рішення дозволяє суттєво зменшити вартість та масогабарити, а також розширити функціональні можливості пристрою для накопичення енергії рекуперативного гальмування, насамперед, завдяки використанню реверсивного перетворювача меншої потужності та бортового ємнісного накопичувача меншої потужності і енергоємності. Крім того, включення до складу пристрою керованого перемикача накопичувача і гальмівного резистора, а також застосування блока керування іншого конструктивного виконання дозволяє автоматизувати керування енергообмінними процесами між контактною мережею, електродвигунами рухомого складу, бортовим ємнісним накопичувачем і забезпечити ефективне використання електроенергії рекуперації в штатних та аварійних режимах роботи системи енергозабезпечення рухомого складу метрополітену.

2. За результатами математичного моделювання енергообмінних процесів під час експлуатації рухомого складу метрополітену на конкретній лінії встановлено, що впровадження розробленого технічного рішення дозволить підвищити енергетичну ефективність рухомого складу метрополітену з системами рекуперації на рівні 7 %.

Література

1. Швець А.О. Аналіз засобів проектування та методів удосконалення конструкцій вантажного рухомого складу / А.О. Швець // Вісник Сертифікації залізничного транспорту. – 2018. – № 02 (48). – С. 61–73.
2. 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. Sapronova, O. Bambura // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol 5, Issue 1 (89). P. 11-18. doi: 10.15587/1729-4061.2017.109588
3. Tkachenko V. Research of resistance to the motion of vehicles related to the direction by railway / V. Tkachenko, S. Sapronova, 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
4. Фомін О.В. Впровадження круглих труб в несучі системи напіввагонів з забезпеченням раціональних показників міцності / О.В. Фомін // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – № 4/1 (24). – С. 83–89.
5. Sulym A.O. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the rolling stock / A.O. Sulym, O.V. Fomin, P.O. Khozia, A.G. Mastepan // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2018. – No 5(167). – P. 79-87. doi: 10.29202/nvngu/2018-5/8
6. Шевлюгин М.В. Ресурс- и энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии: автореф. дис... докт. техн. наук: 05.09.03 / Шевлюгин Максим Валерьевич; Московский гос. ун-т путей сообщения. – М., 2013. – 49 с.
7. Саблін О.І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену / О.І. Саблін // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Вип. 8 (72) / том 6/. – С. 9–13.
8. Кузнецов В.Г. Анализ резервов энергосбережения при внедрении системы рекуперации энергии на поездах Днепропетровского метрополитена / В.Г. Кузнецов, О.И. Саблин, П.В. Губский, Е.Г. Колыхаев // Гірничая електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. Нац. гірничого ун-ту. – Дніпропетровськ, 2015. – № 95. – С. 68–73.
9. Сулим А.А. Экономия электроэнергии при использовании рекуперативного торможения на вагонах метрополитена / А.А. Сулим, С.Д. Сычев, В.Р. Распопин [и др.] // Электромеханика и энергетические системы, методы моделирования та оптимизации. Збірник наукових праць X Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 28-29 березня 2012 р. – Кременчук, КрНУ, 2012. – С. 344.
10. Сулим А.О. Оцінка резервів енергозбереження під час штатних умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації / А.О. Сулим,

- Третяк Е.В., Хозя П.О., Мельник О.О., Мужичук С.О. // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – 2019. – №3 (47). – С. 66 – 77.
11. Шевлюгин М.В. Снижение расхода электроэнергии на движение поездов в Московском метрополитене при использовании емкостных накопителей энергии / М.В. Шевлюгин, К.С. Желтов // *НТТ – Наука и техника транспорта*. – М., 2008. – Вып. № 1. – С. 15–20.
 12. Бычкова М.П. Энергосбережение в метро / М.П. Бычкова // *Транспорт Российской Федерации*. – 2010. – Специальный выпуск «Наука и транспорт. Метрополитены будущего». – С. 67.
 13. Бычкова М.П. Система накопителей электроэнергии для повышения энергоэффективности в метро / М.П. Бычкова // *Энергосовет*. – 2011. – № 3 (16). – С. 74–76.
 14. Щуров Н.И. Применение накопителей энергии в системах электрической тяги / Н.И. Щуров, К.В. Щеглов, А.А. Штанг // *Сборник научных трудов НГТУ*. – Новосибирск, 2008. – Вып. № 1 (51). – С. 99–104.
 15. Костин Н.А. Автономность рекуперативного торможения – основа надежной энергоэффективной рекуперации на электроподвижном составе постоянного тока / Н.А. Костин, А.В. Никитенко // *Залізничний транспорт України*. – 2014. – № 3. – С. 15–23.
 16. Нікітенко А.В. Збільшення об'єму рекуперованої електроенергії на електропоездах постійного струму / А.В. Нікітенко, М.О. Костін // *Залізничний транспорт України*. – 2015. – Вип. 3. – С. 25–31.
 17. Омеляненко В.И. Накопители энергии – перспективная технология для железных дорог / В.И. Омеляненко, В.Е. Бондаренко, Г.В. Омеляненко, Л.В. Оверьянова // *журнал «Локомотив-информ»*. – Харьков: Техно-стандарт, 2011. – № 4. – С. 4–9.
 18. Коссов Е.Е. Применение накопителей малой энергоемкости в силовой цепи тепловоза / Е.Е. Коссов, С.О. Никипель // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля*. – Луганськ, 2010. – № 5 (147). – Частина 1. – С. 246–248.
 19. Авилов В.Д. Определение энергоемкости и мощности энергии для грузового электровоза постоянного тока / В.Д. Авилов, Ю.В. Москалев, С.А. Писаренко // *Известия Транссиба*. – 2013. – № 4 (16). – С. 51–58.
 20. Патент RU 2436690 C2 Российская Федерация, МПК (2006.01) B60L 7/12. Способ движения электрического транспортного средства на рекуперированной электроэнергии и устройство для его осуществления / С.С. Лиманский; патентообладатель: С.С. Лиманский – № 2010104636/11; заявка 11.02.2010; опубл. 20.12.2011; бюл. № 35.
 21. Патент RU 2379201 C1 Российская Федерация, МПК (2006.01) B60L 7/10. Способ рекуперации электрической энергии на рельсовом транспорте в накопительную установку вагона / А.Н. Анисов, Г.И. Криштафович, В.Я. Пахомов; патентообладатель: ООО НПФ «Уктус Электрик» – № 2008118850/11; заявка 14.05.2008; опубл. 20.01.2010; бюл. № 2.
 22. Декларацийний патент UA 83779 U Україна, МПК (2013.01) B60L 13/00. Пристрій накопичення електричної енергії тягового електричного комплексу електровоза / О.В. Бялобрюжеский, І.В. Шипунова; патенто-власник: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського – № u2013 05046; заявка 19.04.2013; опубл. 25.09.2013; бюл. № 18.

References

1. Shvec' A.O. Analiz zasobiv proektuvannya ta me-todiv udoskonalennja konstrukcij vantazhnogo ruhomogo skladu / A.O. Shvec' // *Visnik Sertifikacii zaliznizhnogo transportu*. – 2018. – № 02 (48). – S. 61–73.
2. 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. Saprionova, O. Bambura // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol 5, Issue 1 (89). P. 11-18. doi: 10.15587/1729-4061.2017.109588
3. Tkachenko V. Research of resistance to the motion of vehicles related to the direction by railway / V. Tkachenko, S. Saprionova, 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
4. Fomin O.V. Vprovadzhennja kruglih trub v nesuchi sistemi napivvagoniv z zabezpechennjam racional'nih poka-znikiv micnosti / O.V. Fomin // *Tehnologicheskij audit i rezervy proizvodstva*. – 2015. – № 4/1 (24). – S. 83–89.
5. Sulym A.O. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the rolling stock / A.O. Sulym, O.V. Fomin, P.O. Khozia, A.G. Mastepan // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2018. – No 5(167). – R. 79-87. doi: 10.29202/nvngu/2018-5/8
6. Shevljugin M.V. Resurso- i jenergosberegajushhie tehnologii na zheleznodorozhnom transporte i metropolitenah, realizuemye s ispol'zovaniem nakopitelej jenerгии: avtoref. dis... dokt. tehn. nauk: 05.09.03 / Shevljugin Maksim Valer'evich; Moskovskij gos. un-t putej soobshhenija. – M., 2013. – 49 s.
7. Sablin O.I. Doslidzhennja efektyvnosti procesu rekuperacii elektroenerгии v umovah metropolitenu / O.I. Sablin // *Vostochno-Evropskij zhurnalпередовых технологий*. – 2014. – Vip. 8 (72) / tom 6/. – S. 9–13.
8. Kuznecov V.G. Analiz rezervov jenergosberezhenija pri vnedrenii sistemy rekuperacii jenerгии na poezdah Dnepropetrovskogo metropolitenu / V.G. Kuznecov, O.I. Sablin, P.V. Gubskij, E.G. Kolyhaev // *Girnicha elektromekhanika ta avtomatika: nauk.-tehn. zb. Nac. girnichogo un-tu*. – Dnipropetrovs'k, 2015. – № 95. – S. 68–73.
9. Sulim A.A. Jekonomija jelektrojenerгии pri is-pol'zovanii rekuperativnogo tormozhenija na vagonah metropolitenu / A.A. Sulim, S.D. Sychev, V.R. Raspopin [i dr.] // *Elektromekhanichni ta energetichni sistemi, modeliuvannya ta optimizacii. Zbirnik naukovih prac' H Mizhnarodnoi naukovo-tehnichnoi konferencii molodih uchenih i specialistiv u misti Kremenchuk 28-29 bereznja 2012 r.* – Kremenchuk, KrNU, 2012. – S. 344.
10. Sulim A.O. Ocinka rezerviv energozberezhenija pid chas shtatnih umov ekspluatacii ruhomogo skladu metropolitenu z sistemami rekuperacii / A.O. Sulim, Tretjak E.V., Hozja P.O., Mel'nik O.O., Muzhichuk S.O. // *Elektromekhanichni i energozberigajuchi sistemi*. – 2019. – №3 (47). – С. 66 – 77.
11. Shevljugin M.V. Snizhenie rashoda jelektrojener-gii na dvizhenie poezdov v Moskovskom metropolitene pri ispol'zovanii emkostnyh nakopitelej jenerгии / M.V. Shevljugin, K.S. Zheltov // *NTT – Nauka i tehnika transporta*. – M., 2008. – Vyp. № 1. – S. 15–20.
12. Bychkova M.P. Jenergosberezhenie v metro / M.P. Bychkova // *Transport Rossijskoj Federacii*. – 2010. –

- Special'nyj vypusk «Nauka i transport. Metropoliteny budushhego». – S. 67.
13. Bychkova M.P. Sistema nakopitelej jelektrojene-rgii dlja povyshenija jenergojeffektivnosti v metro / M.P. Bychkova // Jenergosovet. – 2011. – № 3 (16). – S. 74–76.
 14. Shhurov N.I. Primenenie nakopitelej jenerгии v sistemah jelektricheskoy tjagi / N.I. Shhurov, K.V. Shheglov, A.A. Shtang // Sbornik nauchnyh trudov NGTU. – Novosibirsk, 2008. – Vyp. № 1 (51). – S. 99–104.
 15. Kostin N.A. Avtonomnost' rekuperativnogo to-rmozhenija – osnova nadezhnoj jenergojeffektivnoj rekupe-racii na jelektropodvizhnom sostave postojannogo toka / N.A. Kostin, A.V. Nikitenko // Zaliznichnij transport Ukraїni. – 2014. – № 3. – S. 15–23.
 16. Nikitenko A.V. Zbil'shennja ob'emu rekuperovanoi elektroenerгии na jelektroїzdah postijnogo strumu / A.V. Nikitenko, M.O. Kostin // Zaliznichnij transport Ukraїni. – 2015. – Vip. 3. – S. 25–31.
 17. Omel'janenko V.I. Nakopiteli jenerгии – pers-pektivnaja tehnologija dlja zheleznyh dorog / V.I. Omel'ja-nenko, V.E. Bondarenko, G.V. Omel'janenko, L.V. Over'ja-nova // zhurnal «Lokomotiv-inform». – Harkiv: Tehnosta-ndart, 2011. – № 4. – S. 4–9.
 18. Kossov E.E. Primenenie nakopitelej maloj jenergoemkosti v silovoj cepi teplovoza / E.E. Kossov, S.O. Nikipelyj // Visnik Shidnoukraїns'kogo nacional'nogo universitetu imeni V. Dalja. – Lugansk, 2010. – № 5 (147). – Chastina 1. – S. 246–248.
 19. Avilov V.D. Opredelenie jenergoemkosti i moshh-nosti jenerгии dlja gruzovogo jelektrovoza postojannogo toka / V.D. Avilov, Ju.V. Moskalev, S.A. Pisarenko // Izvestija Transsiba. – 2013. – № 4 (16). – S. 51–58.
 20. Patent RU 2436690 C2 Rossijskaja Federacija, MPK (2006.01) B60L 7/12. Sposob dvizhenija jelektricheskogo transportnogo sredstva na rekuperirovannoj jelektrojenerгии i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija / S.S. Limanskij; patentoobladatel': S.S. Limanskij – № 2010104636/11; zajavka 11.02.2010; opubl. 20.12.2011; bjul. № 35.
 21. Patent RU 2379201 C1 Rossijskaja Federacija, MPK (2006.01) B60L 7/10. Sposob rekuperacii jelektricheskoy jenerгии na rel'sovom transporte v nakopitel'nuju ustanovku vagona / A.N. Anisov, G.I. Krishtafovich, V.Ja. Pahomov; patentoobladatel': OOO NPF «Uktus Jelektrik» – № 2008118850/11; zajavka 14.05.2008; opubl. 20.01.2010; bjul. № 2.
 22. Deklaracijnij patent UA 83779 U Ukraїna, MPK (2013.01) B60L 13/00. Pristrij nakopichennja elektrichnoi energii tjagovogo elektrichnogo kompleksu jelektrovoza / O.V. Bjalobrzhes'kij, I.V. Shipunova; patentovlasnik: Kremenchuc'kij nacional'nij universitet imeni Mihajla Ostrograds'kogo – № u2013 05046; zajavka 19.04.2013; opubl. 25.09.2013; bjul. № 18.

Сулим А.А., Хозя П.А., Мельник А.А. Применение бортовых емкостных накопителей незначительной мощности и энергоемкости на подвижном составе метрополитена

В статье предложено техническое решение касательно применения емкостных накопителей энергии на подвижном составе метрополитена. Суть технического решения заключается в использовании в силовой цепи подвижного состава метрополитена емкостного накопителя сравнительно незначительной мощности и энергоемкости. Установлено, что внедрение предложенного технического решения позволит повысить энергетиче-

скую эффективность подвижного состава метрополитена и улучшить его технико-эксплуатационные показатели.

Ключевые слова: бортовой емкостной накопитель энергии, мощность, энергоемкость, подвижной состав метрополитена.

A. Sulym, P. Khozia, A. Melnyk Use of on-board low power and capacity energy storage devices on the metro rolling stock

Rail transport occupies a leading position in meeting the needs of economy and population of Ukraine in transportation and is an important factor in ensuring the socio-economic growth and military capability of the state. In the subways of Ukraine, are taken measures for saving energy and increasing energy efficiency of the rolling stock of the subway by replacing the outdated traction equipment with new ones by implementing regenerative braking. The energy efficiency of regenerative braking is at the level of 5-10% consumed by traction. At this moment, the possibility of recuperation is not used completely, and there is a problem of selling excessive electricity in the absence of consumers in the recuperation zone. As a result, there are reserves for increasing the energy efficiency of the rolling stock of the subway under the condition of the efficient use of electric energy of regenerative braking. The article proposes a technical solution for the use of capacitive energy storages on the rolling stock of the subway. The concept of the technical solution is to use a power circuit of the capacitive energy storage of the subway rolling stock of relatively small capacity and energy unlike existing solutions that use powerful and energy-intensive capacitive energy storages with the ability to save the full amount of excess regenerative braking electricity. One of the important issues is the development of a technical solution for the effective operation of energy-exchange processes between the overhead line, electric motors of the rolling stock and an on-board capacitive energy storages. It was established that the implementation of the proposed technical solution will allow to use it under standard (for traction, idle running and regenerative braking modes) and emergency operation modes of the subway energy supply system, as well as increase the energy efficiency of the subway rolling stock and improve its technical and operational characteristics. According to the results of mathematical modeling of energy-exchange processes during the operation of the subway rolling stock on a specific line, it has been established that the implementation of the developed technical solution will increase the energy efficiency of the subway rolling stock with recovery systems at the level of 7%.

Keywords: onboard capacity storage devices, power, energy capacity, metro rolling stock.

Сулим Андрій Олександрович – кандидат технічних наук, заступник директора, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», sulim1.ua@gmail.com

Хозя Павло Олександрович – кандидат технічних наук, старший дослідник, завідувач науково-дослідної лабораторії експериментальних досліджень залізничної техніки, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», pavlo.khozia@gmail.com

Мельник Олександр Олександрович – завідувач науково-дослідної групи досліджень мікропроцесорних систем управління, тягово-енергетичного обладнання, електричного обладнання та комфорту залізничної техніки, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», om.oleksandrmelnyk@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-93-97>

УДК 007.51:005.74+37:0022

МОРФОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ КОМУНІКАЦІЯМИ В ОСВІТНІХ ПРОЕКТАХ

Ткаченко В.А.

MORPHOLOGICAL MODEL OF COMMUNICATION MANAGEMENT IN EDUCATIONAL PROJECTS

Tkachenko V.A.

Стаття присвячена вирішенню проблеми підвищення ефективності управління комунікаціями в освітніх проектах методами системного аналізу. Автором розроблена морфологічна модель управління комунікаціями в освітніх проектах, яка дозволяє сформулювати метод управління комунікаціями між зацікавленими сторонами проекту. На основі аналізу основних підсистем процесу комунікації сформована загальна система комунікацій проекту, включаючи підсистеми «люди», «інформація» і «техніка», які є головними в ланцюзі здійснення комунікаційного зв'язку у внутрішньому та зовнішньому середовищі проекту. Ці підсистеми пов'язані між собою і дозволяють з більшою ефективністю використовувати робочий час і зменшити кількість конфліктів і ризиків. Для підвищення ефективності управління комунікаціями запропоновано використовувати метод морфологічного аналізу, як один з ефективних інструментів системного аналізу. Морфологічний аналіз дозволяє здійснити декомпозицію проблеми на відносно незалежні частини, а потім здійснити пошук усіх можливих рішень для практичної реалізації кожної з частин. Результатом морфологічного аналізу є морфологічна матриця управління комунікаціями для освітнього проекту, в яку включені такі елементи підсистем процесів комунікації як документи, засоби зв'язку, переговори, зустрічі, наради і обговорення. Кожен елемент процесу управління комунікаціями представлений у вигляді множин, що характеризують цей елемент. Аналіз морфологічної матриці дозволив сформувати морфологічні моделі для управління комунікаціями в освітніх проектах для задоволення вимог зацікавлених сторін проекту. Запропоновано модель взаємодії процесів комунікацій в освітньому проекті, яка характеризує взаємодію основних видів комунікаційних процесів і елементи системи обміну інформацією між учасниками та зацікавленими сторонами.

Ключові слова: морфологічна модель, освітній проект, управління комунікаціями.

Вступ. Розвиток системи потребує постійного пошуку інноваційних рішень, які можуть впроваджуватися через інноваційні освітні проекти. За ре-

зультатами досліджень Іванюк І.В. та Овчарук О.В. [1], інноваційним визнано проект з розробки, виробництва і реалізація інноваційної продукції [2]. Значна кількість освітніх проектів реалізовувалась через програму співробітництва Європейського Союзу у сфері вищої освіти Темпус, яка надавала фінансування з метою заохочення взаємодії та збалансованого співробітництва між вищими навчальним закладами у країнах-партнерах та в Європейському Союзі. Україна є країною-партнером програми Еразмус+, що охоплює освіту, професійну підготовку, молодіжну політику та спорт. У сфері вищої освіти українські вищі навчальні заклади можуть брати участь у таких проектах міжнародного виміру програми Еразмус+, як навчальна мобільність працівників та студентів ВНЗ на основі міжінституційних угод, розвиток потенціалу вищої освіти – реформування вищої освіти, стратегічні партнерства, альянси знань. Основні три типи грантів програми - спільні європейські проекти (Joint European Projects) (групам університетів – «консорціумам», що співпрацюють разом впродовж двох-трьох років для отримання результатів, що визначені проектами), індивідуальні гранти на стажування та додаткові і структурні заходи [3].

Основою успішного впровадження таких проектів є спільні дії всіх зацікавлених сторін (стейкхолдерів), що потребує чітко сформованої процедури управління комунікаціями в проекті.

Багатьма дослідниками [4 - 7] виділяються різні типи комунікацій. При цьому і самі засоби комунікацій (зокрема, їхні недоліки) можуть стати причиною неефективності комунікаційного процесу, у т. ч. і всередині підприємства. Для детального розгляду комунікаційних проблем М.Х. Мескон, М. Альберт і Ф. Хедоурі [8] запропонували циклічну модель, що дозволяє досліджувати різні типи проблем у комуні-

каціях, ґрунтуючись на структурі моделі та зв'язках між її елементами.

Проте єдиного методу управління комунікаціями не існує. Для кожного типу проекту загальний підхід вимагає його адаптації до особливостей проекту. Ефективним інструментом для розробки методу управління комунікаціями є морфологічний аналіз та розробка для цього морфологічної моделі.

Метою роботи є розробка морфологічної моделі управління комунікаціями в освітніх проектах, яка дозволить запропонувати метод управління комунікаціями між зацікавленими сторонами проекту.

Для досягнення поставленої мети вирішувались такі завдання:

- проаналізувати основні підсистеми процесу комунікації;
- вибрати метод, що дозволяє запропонувати метод управління комунікаціями;
- розробити морфологічну модель для управління комунікаціями в освітніх проектах.

Викладення основного матеріалу. Задоволення вимог замовника та розуміння їх виконавцем є передумовою реалізації проекту, отже ефективні комунікації між зацікавленими сторонами є передумовою ефективної проектної діяльності. До системи комунікацій проекту належать підсистеми, що забезпечують якісне отримання інформації та її швидкісну доставку від відправника до отримувача (рис.1).

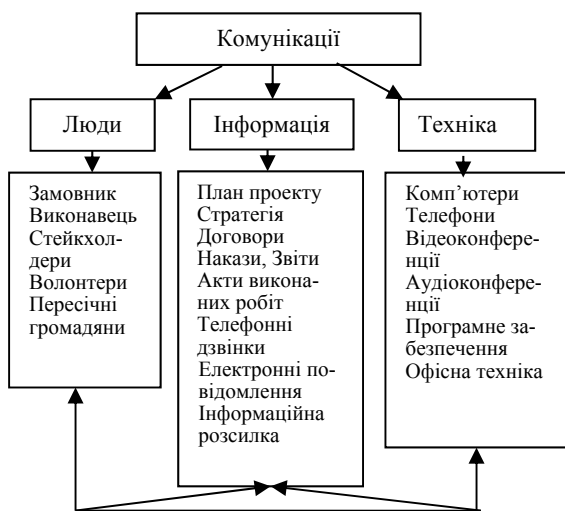


Рис. 1. Загальна система комунікацій проекту

Основними з них є підсистеми «люди», «інформація» та «техніка». Ці три елемента є головними у ланцюзі здійснення комунікаційного зв'язку у внутрішньому та зовнішньому середовищі проекту. Вони по парно пов'язані між собою, що дозволяє з більшою ефективністю використовувати робочий час та зменшити кількість конфліктів та ризиків.

Підсистема «люди» це елемент системи комунікацій, яка включає в себе замовника та виконавця проекту, а також зацікавлені сторони. Тобто це відправники та отримувачі інформаційних потоків ззовні

та всередині системи комунікацій. Наявність зацікавлених сторін та їх кількість залежить від цілі проекту та основних завдань, виконавця, замовника та сфери реалізації.

Підсистема «інформація» є забезпечує взаємодію між підсистемою «люди» з використанням підсистеми «техніка». Види інформаційних потоків у внутрішньому середовищі підсистеми найчастіше використовуються у вербальному та невербальному форматах, залежно від мети повідомлення та кількості «отримувачів». Одна і та ж інформація, отримана будь-яким певним способом, сприймається кожною людиною по-різному. Ці відмінності визначають особливості сприйняття інформації людьми, кожен з яких властиві певному типу. Тому одним із шляхів підвищення ефективності є поєднання двох і більше типів надання інформації. Це значно покращує подальшу співпрацю між членами команди, замовником та виконавцем, а також між стейкхолдерами проекту, дає можливість максимально швидко і повно донести потрібні відомості до свого співрозмовника. Така робота є передумовою уникнення конфліктів.

Підсистема «техніка» забезпечує досягнення головної мети комунікації – обмін різного роду інформацією. Кожне підприємство має мережу різних каналів, які призначені для її збору, аналізу та систематизації інформації. При цьому керівник у може вибирати і використовувати найбільш зручні канали спілкування з іншими учасниками проекту, виконавцями та підлеглими. Застосування конкретного каналу визначається природою повідомлення. Наприклад, обговорювати проблему можна в особистій бесіді або по телефону; допускається передати працівникам інформацію, написавши записку або лист, або повісити повідомлення на дошку оголошень. Взаємодія між підсистемами дозволяє визначити процеси, які є необхідними для співпраці зацікавлених сторін та стейкхолдерів проекту між собою та необхідних параметрів оцінки доцільного використання різних видів та методів комунікацій, а також технічний супровід у внутрішньому середовищі проекту. Класифікація комунікаційних каналів за їх пропускну здатністю приведена на рис.2.

Класифікація, як елемент пізнавальної діяльності, дозволяє швидше і точніше орієнтуватися у різноманітності понять і факторів. Тому для пошуку рішень ефективного управління комунікаціями будемо застосовувати морфологічний аналіз, як один з найбільш розповсюджених методів, що базується на класифікації.

Для оцінювання нових ідей і їх вдосконалення було використано метод морфологічного аналізу технічних рішень [9]. Термін «морфологія» вживається в багатьох науках стосовно дослідження форм і структури об'єктів, що вивчаються. Сутність цього методу полягає у поділі будь-якої проблеми на відносно незалежні частини, а потім в здійсненні пошуку всіх можливих рішень для практичної реалізації кожної з частин. В поставленому завданні виді-

ляються основні ознаки в окремі групи. Ознаки аналізуються і обираються можливі варіанти їх виконання чи реалізації, а потім здійснюється їх поступове комбінування один з одним, при цьому виділяються ті, які можуть найбільше зацікавити. Результати оформляють у вигляді матриці ідей. Наступне сортування відбувається за критеріями можливості здійснення комбінації ознак, новизни, результативності і т. д.

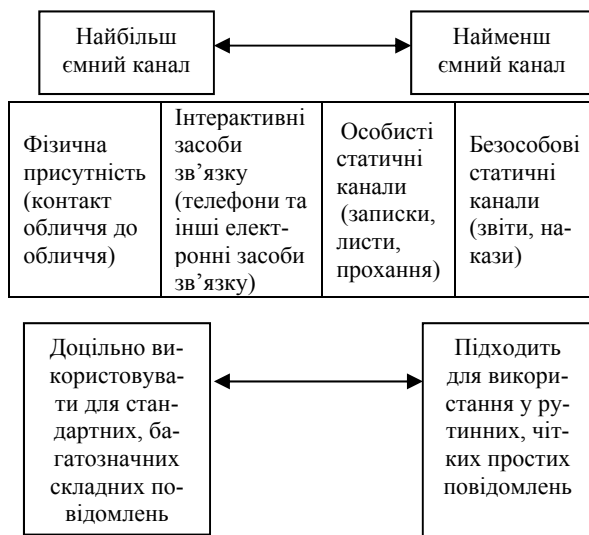


Рис. 2. Класифікація комунікаційних каналів за їх пропускну здатністю

Морфологічний аналіз починається з певного рівня знань про об'єкт, що досліджується. Необхідність перебору всіх можливих альтернатив вирішення проблеми і вибір найбільш оптимального напрямку вимагає від дослідника різнобічні знання з різних галузей. Все це сприяє підвищенню знань про об'єкт, що досліджується, на якісно новий рівень.

Види комунікацій, що застосовуються в освітніх проектах є необхідними елементами для морфологічного аналізу комунікацій в залежності від сфери застосування та взаємозв'язку з іншими процесами [10]. Це дозволяє визначити засоби та способи зв'язку, які будуть використовуватися найчастіше. Позначимо окремі елементи підсистем процесів комунікації як X_1 – документи, X_2 – засоби зв'язку, X_3 – переговори, X_4 – зустрічі, X_5 – наради, X_6 – обговорення. Проведемо морфологічний аналіз процесів комунікації у проектах приведено в табл.

Така форма побудови морфологічної структури була обрано не випадково, тому що види зв'язку розташовані у порядку поєднання кількох методів отримання та надсилання інформації. Наприклад, документи – це вид комунікацій, який переносить інформацію у форматі із чіткою структурою у вигляді тексту та набору зрозумілих загально прийнятих символів. В кінці морфологічної структури розміщені обговорення, де форма отримання інформації не має певного формату і застосовуються як вербальні так і невербальні комунікації.

Таблиця

Морфологічний аналіз процесів комунікації у проектах

X_1 Документи	1.1 технічне завдання 1.2 звіт 1.3 фінансова звітність 1.4 акти виконання робіт 1.5 фото та відео – звіти
X_2 Засоби зв'язку	2.1 вербальні 2.1.1 телефонний дзвінок 2.1.2 відео конференція 2.1.3 аудіо повідомлення 2.1.4 електронні листи 2.2 невербальні 2.2.1 міміка 2.2.2 жести 2.2.3 місце проведення зустрічі, переговорів та ін. 2.2.4 екстра вербальні сигнали (голос, інтонація, смислові наголоси)
X_3 Переговори	3.1 організаційні 3.1.1 переговори для продовження дії домовленостей 3.1.2 переговори для нормалізації відносин 3.2 комерційні 3.2.1 переговори з метою перегляду угоди 3.2.2 переговори для підписання нової угоди 3.2.3 переговори для отримання не зазначених результатів
X_4 Зустрічі	4.1 ділова 4.1.1 внутрішньо організаційна 4.1.2 зовнішньо організаційна 4.2 особиста 4.3 формальна 4.4 неформальна
X_5 Наради	5.1 інструктивна 5.2 проблемна 5.3 оперативна 5.4 інформаційна 5.5 дискусійна 5.6 диспетчерська 5.7 авторитарна (планується заздалегідь) 5.8 відокремлена (повідомляється особа та тема виступу)
X_6 Обговорення	6.1 традиційні 6.1.1 початкове 6.1.2 інструктивна 6.1.3 конкретизація 6.1.4 узагальнююча 6.2 нетрадиційні 6.2.1 міні-спілкування 6.2.2 конференція 6.2.3 диспут 6.2.3 бесіда 6.2.4 відеоконференція 6.2.5 візуалізація

Кожен елемент процесу управління комунікаціями можна представити у вигляді множин:

$$X_1 = (X_{1.1}, X_{1.2}, X_{1.3}, X_{1.4}, X_{1.5})$$

$$X_2 = (X_{2.1}, X_{2.2})$$

$$X_3 = (X_{3.1}, X_{3.2})$$

(1)

$$X_4 = (X_{4.1}, X_{4.2}, X_{4.3}, X_{4.4})$$

$$X_5 = (X_{5.1}, X_{5.2}, X_{5.3}, X_{5.4}, X_{5.5}, X_{5.6}, X_{5.7}, X_{5.8})$$

$$X_6 = (X_{6.1}, X_{6.2})$$

Взаємодію процесів комунікацій в освітньому проекті можна записати у вигляді формули (1), що характеризує взаємодію основних видів комунікаційних процесів та елементів системи обміну інформацією між учасниками та зацікавленими сторонами.

$$E = \sum (X_{n1}, X_{n2}, \dots, X_{n \rightarrow \infty}) \quad (2)$$

E – ефективність комунікацій у процесі реалізації проекту, що визначається сумою всіх видів комунікацій, які застосовувалися впродовж всього життєвого циклу проекту

X_n – вид комунікації, який застосовувався на певному етапі реалізації проекту, кількість видів може бути довільною.

На основі морфологічного аналізу та морфологічної матриці оцінки комунікацій було визначено групи показників, що найчастіше використовуються в управлінні комунікаціями освітніх проектів. Взаємодія різних елементів процесу комунікацій дозволила сформувати морфологічну модель управління комунікаціями освітнього проекту.

$$E = \sum (X_{1.1}, X_{1.2}, X_{1.3}, X_{1.4}, X_{1.5}) + (X_{2.1}, X_{2.2}) + (X_{3.1.1}, X_{3.1.2}, X_{3.2.2}, X_{3.2.3}, X_{3.2.4}, X_{3.2.5}) + (X_{4.1.1}, X_{4.2.1}, X_{4.3.1}, X_{4.3.2}) + (X_{5.1}, X_{5.2}, X_{5.3}, X_{5.4}, X_{5.5}, X_{5.7}) + (X_{6.1.1}, X_{6.1.2}, X_{6.1.3}, X_{6.1.4})$$

Дані морфологічного аналізу дозволяють здійснити перебір всіх елементів процесу управління комунікаціями в освітніх проектах для вибору елементів, які будуть забезпечувати ефективність процесів управління комунікаціями в проекті відповідно всім визначеним цінностям та вимогам зацікавлених сторін. Однією з основних переваг методу є те, що він дозволяє розглядати не тільки існуючі підходи управління, але й за рахунок комбінування їх ознак створювати нові, гіпотетично можливі. За результатами такого підбору можна здійснювати заміну одного елемента процесу на інший і розробити ефективний метод управління комунікаціями в освітніх інноваційних проектах.

Висновки. Розроблена морфологічна матриця комунікацій в освітніх проектах включає в себе елементи процесу управління комунікаціями, такі як документи, засоби зв'язку, переговори, зустрічі, наради та обговорення. Аналіз складових морфологічної матриці дозволив сформувати морфологічну моделі для управління комунікаціями освітніх проектів для задоволення цінностей та вимог зацікавлених сторін проекту.

Література

1. Каталог освітніх інноваційних проектів та освітніх інновацій. Інститут інформаційних технологій і засобів навчання НАПН України. 2013. URL: http://www.ime.edu-ua.net/osv_pr.html
2. Про інноваційну діяльність: Закон України N 380-IV (380-15) від 26.12.2002 Дата оновлення: 16.10.2012. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/40-15>
3. Виконавцям проектів Еразмус+ і Темпус. URL: <http://erasmusplus.org.ua/tempus-iv.html>.
4. Сагеп Л.Ю. Научно-методические аспекты управления коммуникациями на промышленном предприятии Маркетинг і менеджмент інновацій, 2012, № 4 <http://mmi.fem.sumdu.edu.ua/>
5. Хрутьба В.О., Лукьянова В.В. Рибак М.П., Хрутьба А.С. Запровадження механізму управління комунікаціями в зонах діяльності природо-заповідних об'єктів Екологічні науки, випуск 24, 2019. – с.89-96
6. Морозова Н.А. Управление коммуникациями в организации / Н.А. Морозова // Вестник ВГУ. Серия : Экономика и управление. – 2010. – № 2. – С. 173-181.
7. Босак А.О. Економічне оцінювання та розвиток комунікацій в управлінні машинобудівними підприємствами : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. екон. наук : спец. 08.00.04 «Економіка та управління підприємствами (за видами економічної діяльності)» / А.О. Босак. – Львів, 2007. – 25 с.
8. Мескон М.Х. Основы менеджмента : пер. с англ. / М.Х. Мескон, М. Альберт, Ф. Хедоури. – М. : Дело, 1997. – 704 с.
9. Згуровский М. Системный анализ: проблемы, методология, приложения: Проект «Наукова книга»/ Михаил Згуровский, Наталья Панкратова,; НАН Украины, Мин-во образования и науки Украины, Ин-т прикладного системного анализа, Нац. технический ун-т Украины «Киевский политехнический институт». - К.: Наук. думка, 2005. - 743 с.
10. Придатко О. В. Освітні проекти та програми як об'єкт проектного менеджменту [Текст] / О. В. Придатко // Управління розвитком складних систем. – 2015. – № 24. – С. 42 – 48.

References

1. Katalog osvithnikh innovatsiynykh proektiv ta osvithnikh innovatsii [Catalog of educational innovation projects and educational innovations]. (2013). Retrieved from: http://www.ime.edu-ua.net/osv_pr.html [in Ukrainian].
2. Pro innovatsiynu diyal'nist': Zakon Ukrayiny N 380-IV (380-15) vid 26.12.2002 Data onovlennya: 16.10.2012. [On innovative activity: Law of Ukraine N 380-IV (380-15) of 26.12.2002 Date of updating: 16.10.2012]. Retrieved from: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/40-15> [in Ukrainian].
3. Vkonavtsyam proektiv Erazmus+ i Tempus. [To Erasmus + and Tempus executors.] Retrieved from: <http://erasmusplus.org.ua/tempus-iv.html> [in Ukrainian].
4. Saher L.YU. (2012) Nauchno-metodicheskiye aspekty upravleniya kommunikatsiyami na promyshlennom predpriyatii Marketing i menedzhment innovatsiy [Scientific and methodological aspects of communications management in an industrial enterprise Marketing and innovation management.], № 4 Retrieved from: <http://mmi.fem.sumdu.edu.ua/> [in Russian].
5. Khrut'ba V.O., Luk'yanova V.V. Rybak M.P., Khrut'ba A.S. (2019) Zaprovadzhennya mekhanizmu upravlinnya komunikatsiyamy v zonakh diyal'nosti pryrodo-

- zapovidnykh ob'yektiv [Introduction of a communication management mechanism in the areas of activity of nature reserves]. *Ekologichni nauky*, випуск 24 - Environmental Sciences, Issue 24, 89-96 [in Ukrainian].
6. Morozova N.A. Upravleniye kommunikatsiyami v organiza-tsii (2010) [Management of communications in the organization]. *Vestnik VGU. Seriya : Ekonomika i upravleniye* - Bulletin of the Voronezh State University. Series: Economics and Management № 2, 173-181[in Russian].
 7. Bosak A.O. Ekonomichne otsinyuvannya ta rozvytok komunikatsiy v upravlinni mashynobudivnyy pidpryyemstvamy (2007). [Economic evaluation and development of communications in the management of machine-building enterprises]. Avtoref. dys. na zdobuttya nauk. stupenya kand. ekon. nauk : spets. 08.00.04 «Ekonomika ta upravlinnya pidpryyemstvamy (za vydamy ekonomichnoyi diyal'nosti)- author's abstract. diss. for the sciences. degree of Cand. econom. Sciences: Special. 08.00.04 «Economics and Management of Enterprises (by type of economic activity), 25. L'viv. [in Ukrainian].
 8. Meskon M.KH. Osnovy menedzhmenta (1997), per. s anhl. / M.KH. Meskon, M. Al'bert, F. Khedoury. [Fundamentals of management: trans. from English]. Delo, 704. Moskoy [in Russian].
 9. Zgurovskiy M. Sistemnyy analiz: problemy, metodologiya, prilozheniya: Proyeckt «Naukova kniga»/ Mikhail Zgurovskiy, Natal'ya Pankratova,; NAN Ukrainy , Min-vo obrazovaniya i nauki Ukrainy, In-t prikladnogo sistemnogo analiza, Nats. tekhnicheskii un-t Ukrainy «Kiyevskiy politekhnicheskii institut» (2005), [System analysis: problems, methodology, applications: Project "Science Book" / Mikhail Zgurovsky, Natalya Pankratova ,; NAS of Ukraine, Ministry of Education and Science of Ukraine, Institute of Applied System Analysis, Nat. Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute"]. *Nauk. Dumka – Scientific Thought*, 743. Kiev [in Ukrainian].
 10. Prydatko O. V. Osvitni proekty ta prohramy yak ob'yekt proektnoho menedzhmentu [Tekst] / O. V. Prydatko (2015). [Educational projects and programs as object of project management] *Upravlinnya rozvytkom skladnykh system - Management of complex systems development* № 24, 42-48 [in Ukrainian].

Ткаченко В.А. Морфологическая модель управления коммуникациями в образовательных проектах

Статья посвящена решению проблемы повышения эффективности управления коммуникациями в образовательных проектах методами системного анализа. Автором разработана морфологическая модель управления коммуникациями в образовательных проектах, которая позволяет сформировать метод управления коммуникациями между заинтересованными сторонами проекта. На основе анализа основных подсистем процесса коммуникации сформирована общая система коммуникаций проекта, включая подсистемы «люди», «информация» и «техника», которые являются главными в цепи осуществления коммуникационной связи во внутренней и внешней среде проекта. Эти подсистемы связаны между собой и позволяют с большей эффективностью использовать рабочее время и уменьшить количество конфликтов и рисков. Для повышения эффективности управления коммуникациями предложено использовать метод морфологического анализа, как один из эффективных инструментов системного анализа.

Морфологический анализ позволяет осуществить декомпозицию проблемы на относительно независимые

части, а затем осуществить поиск всех возможных решений для практической реализации каждой из частей. Результатом морфологического анализа является морфологическая матрица управления коммуникациями для образовательного проекта, в которую включены такие элементы подсистем процессов коммуникации как документы, средства связи, переговоры, встречи, совещания и обсуждения. Каждый элемент процесса управления коммуникациями представлен в виде множеств, характеризующих этот элемент. Анализ морфологической матрицы позволил сформировать морфологические модели для управления коммуникациями образовательных проектах для удовлетворения требований заинтересованных сторон проекта. Предложена модель взаимодействия процессов коммуникаций в образовательном проекте, которая характеризует взаимодействие основных видов коммуникационных процессов и элементы системы обмена информацией между участниками и заинтересованными сторонами.

Ключевые слова: морфологическая модель, образовательный проект, управление коммуникациями.

Tkachenko V.A. Morphological model of communication management in educational projects

The article is devoted to solving the problem of improving the effectiveness of communication management in educational projects by methods of system analysis. The author has developed a morphological model of communication management in educational projects, which allows to form a method of communication management between project stakeholders. Based on the analysis of the main subsystems of the communication process, a common system of communication of the project, including the subsystems "people," "information" and "technique," which are the main in the chain of communication relations in the internal and external environment of the project, is formed. These subsystems are interconnected and allow for more efficient use of working time and reduce the number of conflicts and risks. To improve the effectiveness of communication management, it is proposed to use the method of morphological analysis as one of the effective tools of system analysis. One of the main advantages of the method is that it allows considering not only existing management approaches, but also by combining their features to create new, hypothetically possible. Morphological analysis allows decomposition of problems into relatively independent parts, and then search for all possible solutions for practical implementation of each part. The result of the morphological analysis is the morphological matrix of communication management for the educational project, which includes such elements of the subsystems of communication processes as documents, communications, negotiations, meetings, meetings and discussions. Each element of the communication management process is represented as sets that characterize this element. The analysis of the morphological matrix allowed us to form morphological models for managing communications in educational projects to meet the requirements of project stakeholders. The model of interaction of communication processes in the educational project is proposed, which characterizes the interaction of the main types of communication processes and elements of the system of information exchange between participants and stakeholders.

Keywords: morphological model, educational project, communication management.

Ткаченко В.А. – доцент кафедри транспортного права та логістики Національного транспортного університету.

Статья подана 12.02.2020 г.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-98-108>

УДК 001.8/621.3:625.42

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ З ВПРОВАДЖЕННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ НА РУХОМОМУ СКЛАДІ МЕТРОПОЛІТЕНУ

Третяк Е.В.

ANALYSIS OF RESEARCH ON THE INTRODUCTION OF ENERGY STORAGE DEVICES ON METRO ROLLING STOCK

Tretiak E.V.

У статті розглянуто можливі місця розміщення накопичувачів енергії в системі енергозабезпечення метрополітену. Визначено, що основною перевагою застосування накопичувачів енергії в метрополітені є особливість експлуатації його рухомого складу. Обґрунтовано необхідність застосування накопичувачів на рухомому складі метрополітену, сформульовано переваги саме застосування бортових накопичувачів енергії. Сформульовано комплекс задач, які можливо вирішити в метрополітені, за рахунок впровадження бортових накопичувачів енергії. Описано основні маловивчені та актуальні задачі, які розв'язують вчені під час впровадження накопичувачів енергії на рухомому складі метрополітену, зокрема при створенні та модернізації рухомого складу метрополітену з бортовими накопичувачами енергії. З'ясовано, що значна кількість існуючих досліджень направлено на функціонування бортових накопичувачів енергії у силовому колі рухомого складу. В цих дослідженнях розглянуто енергообмінні процеси між накопичувачем, електроприводом та контактною мережею, за яких енергія рекупераційного гальмування використовується на тягу рухомого складу.

Встановлено, що одним з маловивчених напрямків досліджень залишається використання енергії рекуперації з бортового накопичувача енергії на живлення споживачів власних потреб поїзда під час його експлуатації. Запропоновано в подальшому зосередити зусилля на дослідженні енергообмінних процесів, які виникають між бортовим накопичувачем, споживачами власних потреб та контактною мережею.

Ключові слова: бортовий накопичувач енергії, рухомий склад, метрополітен, енергозбереження.

Вступ. Для всіх розвинутих країн, питання енергозбереження та енергоефективності перевізного процесу в метрополітені було і є однією з важливих проблем, яка потребує своєчасного вирішення і є пріоритетним напрямком діяльності [1–5]. Одним з основних напрямів вирішення зазначеної проблеми є більш ефективне використання ресурсів за рахунок

впровадження накопичувачів енергії [6, 7]. При цьому важливим та актуальним є вивчення сучасного стану і перспектив розвитку метрополітену за умов впровадження в ньому накопичувачів енергії.

З наведених досліджень [8–13] відомо, що накопичувачі енергії можуть розміщуватись як в системі енергозабезпечення метрополітену (стаціонарні накопичувачі), так і на рухомому складі (бортові накопичувачі). Стаціонарні накопичувачі можуть бути розміщені перед тяговою підстанцією, на фідерах тягової підстанції, в середині фідерної зони. Структурну схему системи енергозабезпечення метрополітену з можливими місцями розміщення накопичувачів енергії зображено на рис. 1. В структурній схемі (рис. 1) прийнято наступний перелік умовних позначень: ТЕС – теплоелектростанція; ЛЕП – лінія електропередач; РП – районна підстанція; ПС – пост секціонування; НЕ – накопичувач енергії; ТП – тягова підстанція; РС – рухомий склад; КР – контактна рейка; ХК – ходова колія.

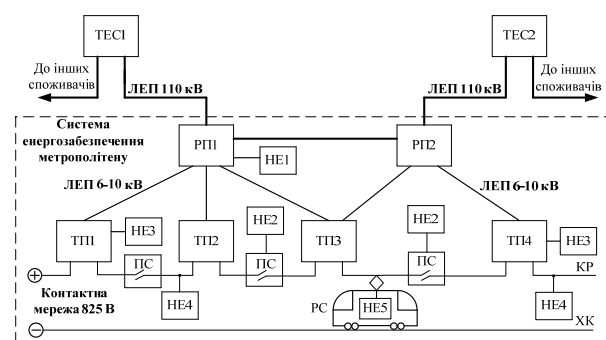


Рис. 1. Структурна схема системи енергозабезпечення метрополітену з можливими місцями розміщення накопичувачів енергії

На даний час існують різні думки серед вчених та практикуючих спеціалістів щодо раціонального

місця розташування накопичувачів енергії в метрополітені. Одні наголошують на необхідності розміщення стаціонарних накопичувачів, інші – бортових. В дійсності кожен з них має ряд переваг та недоліків.

Зовнішній вигляд стаціонарного та бортового накопичувачів енергії зображено на рис. 2.



а



б

Рис. 2. Зовнішній вигляд стаціонарного (а) та бортового (б) накопичувачів енергії

Стаціонарний накопичувач, виробництва АО «ЕНЕРГІЯ», зібраний із 154 конденсаторних модулів (рис. 2, а); бортовий накопичувач, виробництва ЗАО «ЕЛТОН» (ЕСМА), зібраний із 60 конденсаторних модулів типу 60ЭК406 (рис. 2, б).

Основні технічні характеристики даних накопичувачів енергії наведені в табл.

Таблиця

Основні технічні характеристики стаціонарного (а) та бортового (б) накопичувачів енергії

Параметр	Показник	
	а	б
Робоча напруга, В	990-495	900-450
Ємність, Ф	187	147
Робоча енергоємність, МДж	68,7	0,447
Маса, кг	18000	82
Робоча температура, °С	-50...+60	-50...+60

В дійсності за результатами розгляду та аналізу ряду досліджень [8–13] встановлено, що раціональним є застосування бортових накопичувачів енергії, у порівнянні зі стаціонарними, в силу наступних переваг:

– циркуляція електроенергії рекуперативного гальмування відбувається безпосередньо у спожива-

ча, що з точки зору енергообміну є позитивним моментом, оскільки дозволяє мінімізувати втрати під час транспортування енергії рекуперації;

– втрати електроенергії під час транспортування енергії менші на 10-18 % у порівнянні зі стаціонарними накопичувачами енергії;

– коефіцієнт корисної дії використання електроенергії найвищий і складає близько 80-85%;

– з'являється можливість аварійного виведення вагонів метрополітену з тунелю при повному або частковому знятті напруги на шинах тягової підстанції, а також під час виникнення аварійних режимів в контактній мережі;

– мінімальний вплив на якість електроенергії зовнішнього електропостачання;

– відбувається максимальне підвищення та стабілізування рівня напруги в контактній мережі та струмоприймачах вагонів метрополітену, що дозволить збільшити пропускну здатність перегону;

– мінімальні струмові та теплові навантаження на шини та кабелі контактної мережі, що дозволить підвищити термін їх служби.

Тому подальший аналіз сучасних тенденцій розвитку метрополітену з накопичувачами енергії запропоновано здійснити саме за умов їх бортового розміщення.

Метою роботи є аналіз сучасних тенденцій розвитку рухомого складу метрополітену з накопичувачами енергії.

Викладення основного матеріалу дослідження. Основні тенденції розвитку рухомого складу метрополітену з накопичувачами енергії проаналізовано шляхом огляду значної кількості досліджень [8–65]. За результатами їх аналізу встановлено, що в розробку наукових основ створення рухомого складу метрополітену з накопичувачами енергії, значний вклад внесли колективи наукових та навчальних закладів країн СНД: Білоруського державного університету транспорту, Всеросійського науково-дослідного інституту залізничного транспорту, Державного економіко-технологічного університету транспорту, ДП «Українського науково-дослідного інституту вагонобудування», філія «Науково-дослідного та конструкторсько-технологічного інституту залізничного транспорту АТ «Укрзалізниця»), Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка Лазаряна, Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Московського державного університету шляхів сполучення, Московського енергетичного інституту, Науково-дослідного інституту енергозбереження на залізничному транспорті (м. Омськ), Національного гірничого університету (м. Дніпро), Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Новосибірського державного технічного університету, Омського державного університету шляхів сполучення, Петербурзького державного університету шляхів сполучення, Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, Українського державного університету залізничного транспорту (м. Харків), Харківського національного уні-

верситету міського господарства імені О. М. Бекетова та підприємств: ТОВ «KMLabs» (м. Київ), фірми YUNASKO (м. Дніпро), БАТ «Електропривод» (м. Москва), ДП «Електротяжмаш» (м. Харків), ЗАТ «Елтон» та інші.

В розробку наукових основ модернізації та створення енергоефективного рухомого складу метрополітену з накопичувачами енергії внесли вклад відомі вчені: Бичкова М.П., Денщиков К.К., Колб А.А., Пупинін В.М. [14-17].

Окремої уваги заслуговують дослідження Варакіна А.І., Варакіна І.М., Менухова В.В., Самітіна В.В., направлені на проектування та виготовлення накопичувачів енергії для різного типу транспорту, в першу чергу автомобільного та залізничного. Їхні дослідження представлені у вигляді статей, патентів і численних проектів на міжнародних виставках [18-19].

Представники Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» у своїх роботах приділяли увагу питанням оцінки енергоефективності та дослідження енергообмінних процесів у системах енергозабезпечення електрифікованого залізничного транспорту з накопичувачами енергії. Професор Омеляненко В.І. та його послідовники (Любарський Б.Г., Овер'янова Л.В., Омеляненко Г.В., Рябов Є.С.) присвятили значну кількість досліджень за напрямом використання накопичувачів енергії в системі енергозабезпечення електрорухомого складу, зокрема приміських електропоїздів та поїздів метрополітену [20-26]. Праці зазначених дослідників останнього періоду направлені на створення приміського електропоїзда з бортовим електромеханічним накопичувачем енергії. В даних дослідженнях запропоновано технічне рішення ефективного управління енергообмінними процесами під час роботи тягового електропривода електропоїзда з бортовим накопичувачем енергії шляхом використання реверсивного перетворювача [21-26]. Професор Жемеров Г.Г. в своїх роботах розглядав питання зменшення втрат енергії в системах електропостачання рухомого складу метрополітену при використанні накопичувачів, зокрема при її транспортуванні. Праці Жемерова Г.Г. останнього часу направлені на оцінку енергоефективності можливих систем енергопостачання рухомого складу метрополітену при застосуванні накопичувачів енергії [27-28].

Представники Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка Лазаряна (доктори технічних наук Костін О.М., Артемчук В.В., Кузнецов В.Г., Саблін О.І.) у своїх дослідженнях приділяли значну увагу питанням щодо оцінки потенціалу заощаджень ресурсів, підвищення якості електроенергії в контактній мережі за рахунок впровадження накопичувачів енергії на різного типу неавтономного залізничного транспорту (в тому числі і метрополітені), а також визначенню необхідних параметрів накопичувача [29-32].

Значну кількість робіт підготовлено за участю професора Шевлюгіна М.В., який приділяв увагу проблемі підвищення енергоефективності неавтономного залізничного транспорту, насамперед метро-

політену, за рахунок впровадження різного типу накопичувачів енергії (інерційних, електрохімічних, зверхпровідникових індуктивних, ємнісних накопичувачів) [33-36].

Науковці Державного підприємства «Український науково-дослідний інститут вагонобудування» Сулим А.О., Донченко А.В., Хозя П.О., Мельник О.О. приділили багато уваги як теоретичним так і практично-експериментальним дослідженням, щодо оцінки резервів додаткових заощаджень енергоресурсів за рахунок ефективного використання електроенергії рекуперативного гальмування рухомого складу, а також визначення раціональних параметрів ємнісних накопичувачів енергії для рухомого складу метрополітену [37-41].

Розробки вчених Штанга А.А., Щурова М.І., Улітіна В.Г. присвячені вирішенню питань щодо оцінки заощаджень енергетичних ресурсів на міському залізничному транспорті за рахунок впровадження різного типу накопичувачів енергії та розробки ефективних технічних рішень по управлінню процесами їх заряду та розряду [42-44].

Для вивчення перспектив розвитку рухомого складу з бортовими накопичувачами енергії запропоновано більш детально розглянути деякі схематичні рішення, які наведено в вищезазначених працях. Нижче наведено результат розгляду та аналізу цих праць.

В роботі [45], авторами Омеляненко В.І., Любарський Б.Г., Овер'янова Л.В., Рябов Є.С. запропоновано концептуальний проект електропоїзда з бортовим інерційним накопичувачем енергії. Енергообмінні процеси між тяговим приводом та бортовим накопичувачем енергії здійснюється через конвертор постійного струму. Цей проект передбачає зниження споживання до 28 % електроенергії за рахунок використання електроенергії рекуперації під час розгону поїзда.

За дослідженням [46] Родькіна Д.І. та Величко Т.В. було запропоновано схему підключення тягового асинхронного двигуна до бортового ємнісного накопичувача енергії через статичний перетворювач. Розглянуто роботу цього статичного перетворювача в режимах широтно-імпульсного регулювання під час заряду та розряду накопичувача.

З аналізу роботи [47] Васильєва В.А. проаналізовано варіанти роботи тягового приводу з бортовим ємнісним накопичувачем енергії під час розгону та електричному гальмуванні електрорухомого складу. Представлено імітаційні схематичні моделі основних режимів роботи, а також результати моделювання. Схематичні моделі передбачають розміщення бортового ємнісного накопичувача енергії в силовому колі електрорухомого складу.

Бялобржеський О.В. та Шикунова І.В. у своїй роботі [48] передбачали застосування ємнісного накопичувача енергії в силовому контурі тягового електроприводу за умови здійснення релейного керування.

Дослідники Афанасов А.М., Арпуль С.В., Демчук Р.Н. у своїй роботі [49] запропонували використовувати в силовому колі статичний перетворювач

напруги конверторного типу. Наведено схему статичного перетворювача та характер зміни напруги на ємнісному накопичувачі та тяговому електроприводі.

Відомі також роботи дослідників Європи, Китаю, США, Японії (Li X., Allègre A.-L., Barrero R., Moninger F., Negishi H., Iannuzzi D., Tricoli P., Shimada M. Та інші) в галузі підвищення ефективності використання електроенергії рекуперативного гальмування рухомого складу метрополітену шляхом використання накопичувачів енергії [50-60]. У своїх дослідженнях іноземні вчені значну увагу приділяють питанню вибору раціонального типу накопичувача. Значна кількість цих досліджень присвячена питанню оцінки заощаджень ресурсів за рахунок різних місць розміщення накопичувачів енергії в системі енергозабезпечення метрополітену.

В роботах відомих вітчизняних та іноземних вчених [61-65] розглянуто схемотехнічні рішення, де електроенергія рекуперативного гальмування використовується на розгін поїзда. Схемотехнічні рішення статичних перетворювачів, за яких у переважній більшості відбувається керування енергообмінними процесами, зображено на рис. 3. В зазначених роботах наводяться результати математичного моделювання та техніко-економічний ефект від застосування цих схемотехнічних рішень.

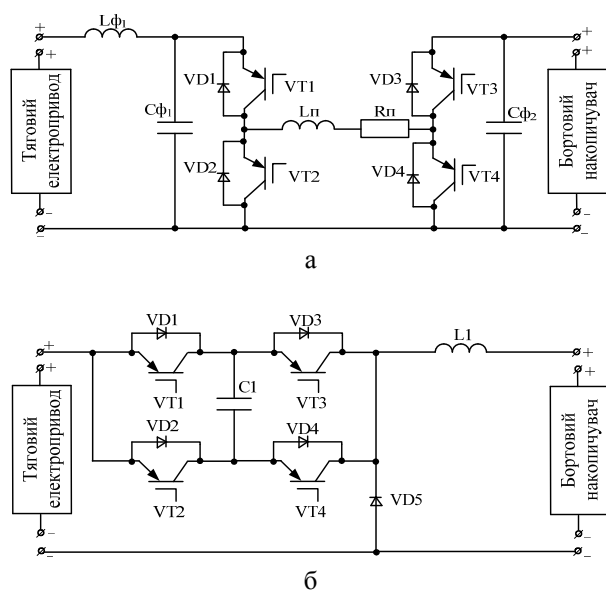


Рис. 3. Силові типові схеми статичних перетворювачів регульованого типу: VT1–VT8 – IGBT-транзистори; VD1–VD8 – діоди; L1, C1 – індуктивність та ємність дозатора енергії в схемі перетворювача; $L_{\phi 1}$, $C_{\phi 1}$, $C_{\phi 2}$ – індуктивність та ємність фільтра; R_{π} , L_{π} – опір та індуктивність перетворювача

При розгляді наукової літератури [8-65] стало зрозумілим, що одним з найбільш перспективних видів транспорту для впровадження накопичувачів енергії є метрополітен в силу особливостей умов експлуатації його рухомого складу: стабільний графік руху у порівнянні з іншими видами залізничного

транспорту; незначні відстані між перегонами, як наслідок, часті пуски та гальмування; часто змінюваний профіль колії; необхідність частого розгону та сповільнення внаслідок зміни обмежень швидкості для різних ділянок колії. Вищевказане свідчить, що при впровадженні накопичувачів енергії в метрополітені можна досягти значного техніко-економічного ефекту, який можливо оцінити точніше від інших видів залізничного транспорту на етапі теоретичних досліджень за рахунок стабільних умов експлуатації рухомого складу метрополітену.

За результатами узагальненого аналізу існуючих досліджень [8-65] можна сказати, що впровадження бортових накопичувачів енергії в метрополітені дозволить вирішити комплекс задач, а саме:

- зменшити споживання електроенергії з мережі і знизити встановлену потужність силових установок, що здійснюють подачу та перетворення електроенергії (трансформаторів, перетворювачів, розподільчих підстанцій тощо) за рахунок збереження та повторного використання енергії рекуперативного гальмування;
- спрямити хвилинні та годинні графіки споживання електроенергії внаслідок чого забезпечується статична і динамічна стійкість енергосистеми;
- підвищити і стабілізувати рівень напруги в контактній мережі та струмоприймачах вагонів метрополітену внаслідок чого збільшиться пропускна здатність перегону;
- зменшити струмові навантаження та відповідно температури нагріву силових агрегатів, що дозволить підвищити їх термін служби;
- підвищити якість електроенергії в системі зовнішнього електроживлення (контактній мережі);
- забезпечити автономне ведення вагонів метрополітену за умов виникнення аварійних режимів роботи в основних джерелах живлення (системі енергозабезпечення метрополітену), що дозволить підвищити безпеку перевезень пасажирів;
- знизити теплові викиди в тунель, і відповідно, знизити витрати на вентиляцію і кондиціювання повітря, поліпшити клімат на станціях, в тунелях та вагонах метрополітену.

Отже, в наведених роботах за умов застосування бортових накопичувачів розглядаються технічні рішення, за яких енергія рекуперативного гальмування використовується на тягу поїзда.

Аналіз зазначених досліджень [8-65], у яких розглянуто впровадження бортових накопичувачів енергії на рухомому складі метрополітену, дозволить визначити наступні маловивчені та актуальні питання:

- дослідження енергообмінних процесів під час експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації для визначення кількості витраченої електроенергії на споживачі власних потреб;
- формулювання вимог до бортового накопичувача енергії, який повинен зберігати електроенергію рекуперативного гальмування рухомого складу в

режимі заряду та віддавати її споживачам власних потреб в режимі розряду;

- обґрунтування застосування (вибору) раціонального типу бортового накопичувача енергії рухомого складу метрополітену з метою ефективного використання його електроенергії рекуперативного гальмування на споживачів власних потреб;

- пошук нових режимів функціонування енергетичної системи живлення метрополітену з бортовим накопичувачем енергії, за яких забезпечується підвищення безпеки перевезень в метрополітені та підвищення ефективності використання електроенергії рекуперації;

- розробка алгоритмів для здійснення ефективного керування енергообмінними процесами на рухомому складі метрополітену з бортовим накопичувачем енергії, який здійснює живлення споживачів власних потреб;

- розробка комплексного підходу щодо визначення раціональних параметрів накопичувача енергії (потужності та енергоємності) для заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену, який дозволить здійснювати вибір його параметрів за критеріями забезпечення заданого часу живлення споживачів власних потреб та максимальної ефективності використання електроенергії рекуперації відповідно в аварійних та штатних режимах роботи системи енергозабезпечення метрополітену;

- створення системи керування енергообмінними процесами на рухомому складі метрополітену з бортовим накопичувачем енергії під час штатних та аварійних режимів роботи системи енергозабезпечення метрополітену;

- теоретичні та експериментальні дослідження енергопроцесів в системі енергозбереження метрополітену під час заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену з раціональними параметрами бортового накопичувача енергії;

- оцінка підвищення енергоефективності рухомого складу метрополітену за рахунок впровадження бортового накопичувача енергії з раціональними параметрами;

- дослідження впливу бортового накопичувача енергії з визначеними раціональними параметрами на масу та динамічні якості рухомого складу метрополітену;

- дослідження техніко-економічного ефекту від впровадження в експлуатацію інноваційного рухомого складу метрополітену з бортовим накопичувачем енергії;

- створення концептуального проекту інноваційного рухомого складу метрополітену з бортовим накопичувачем енергії який має раціональні енергетичні параметри.

Висновки. Визначено комплекс основних задач, які можливо вирішити шляхом впровадження накопичувачів енергії в метрополітені. Одними з головних є зменшення споживання електроенергії з мережі і зниження встановленої потужності силових

установок, що здійснюють подачу та перетворення електроенергії.

Перспективними бортовими накопичувачами енергії за умов їх розміщення на рухомому складі метрополітену, є електрохімічні, індуктивні, ємнісні та електромеханічні (інерційні).

У кожного перспективного накопичувача енергії є свої переваги та недоліки, тому однозначно відповісти на питання раціонального типу накопичувача для умов його розміщення на рухомому складі метрополітену неможливо.

Впровадження рухомого складу метрополітену з бортовими накопичувачами енергії в експлуатацію дозволить підвищити енергоефективність та покращити енергозбереження в метрополітені за рахунок ефективного використання електроенергії рекуперативного гальмування, зменшення встановленої потужності тягових підстанцій, стабілізації напруги контактної мережі, а також можливості забезпечення автономного ведення рухомого складу.

Аналіз вищевказаних статей та досліджень дозволив встановити, що багато робіт за напрямком впровадження бортових накопичувачів енергії присвячено питанням та технічним рішенням за якими накопичена енергія рекупераційного гальмування використовується на тягу при розгоні поїзда. Але чомусь мало уваги приділяється питанню використання енергії рекуперації для живлення споживачів власних потреб поїзда під час його руху, тобто енергію рекуперативного гальмування можна використовувати не тільки на тягу поїзда, а і на власні потреби (освітлення, компресори, бортові системи та інше). Тому це питання є маловивченим і потребує подальшого розвитку.

Окреслено маловивчені та актуальні питання за умов застосування на рухомому складі метрополітену бортового накопичувача енергії, вирішення яких сприятиме розширенню його функціональних можливостей та покращенню техніко-експлуатаційних показників, що в цілому дозволить підвищити безпеку та економічність пасажирських перевезень в метрополітені, а також підвищити використання електроенергії рекуперативного гальмування.

Тому подальші дослідження необхідно направити на розвиток теорії впровадження бортових накопичувачів енергії в метрополітені, за якої накопичена енергія рекуперативного гальмування буде використовуватись для живлення власних потреб рухомого складу.

Л і т е р а т у р а

1. Комплексна програма оновлення залізничного рухомого складу України на 2008-2020 р.р., затверджена Наказом Міністерства транспорту і зв'язку України № 1259 від 14.10.2008 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://uz.gov.ua>.
2. Державна програма розвитку міського електротранспорту на 2007-2015 роки, затверджена Постановою Кабінету Міністрів України № 1855 від 29.12.2006 р. [Електронний ресурс]. – Режим досту-

- пу: http://www.uazakon.com/documents/date_8o/pg_grgfoxl/index.htm.
3. Про енергозбереження : [Закон України : офіц. текст: прийнятий Постановою Верховної Ради України № 75/94-ВР від 01.07.2014 р. зі змінами і доповненнями, внесеними Законами України]. – К.: Парламентське вид-во, 2014. – 15 с.
 4. Про пріоритетні напрямки інноваційної діяльності в Україні: [Закон України: офіц. текст: прийнятий Постановою Верховної Ради України № 3715-VI від 08.09.2011 р. зі змінами і доповненнями, внесеними Законом України № 5460-VI від 16.10.2012 р.]. – К.: Відомості Верховної Ради України, 2012. – Вип. № 19-20. – стаття 166. – С. 799.
 5. Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки : [Закон України: офіц. текст: прийнятий Постановою Верховної Ради України № 2519-VI від 09.09.2010 р. зі змінами і доповненнями, внесеними Законами України]. – К.: Офіційний вісник України, 2010. – Вип. № 77. – стаття 2721. – С. 29.
 6. Накопители энергии : учеб. пособие для вузов / Д.А. Бут, Б.Л. Алиевский, С.Р. Мизюрин, П.В. Васюкевич: под ред. Д.А. Бута. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.
 7. Астахов Ю.Н. Накопители энергии в электрических системах: Учеб. пособие для электроэнерг. спец. вузов / Ю.Н. Астахов, В.А. Веников, А.Г. Тер-Газарян. – М.: Высш. школа, 1989. – 159 с.
 8. Сулим А.А. Обоснование места установки емкостных накопителей энергии в системах тягового электроснабжения метрополитена / А. А. Сулим // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – 2013. – № 2/2013 (22), ч. 2. – С. 282-285.
 9. Штанг А.А. Применение накопителей энергии в системах электроснабжения городского электрического транспорта / А.А. Штанг, Е.А. Спиридонов, М.В. Ярославцев // *Транспорт Российской Федерации*. – 2012. – № 3 – 4 (40 – 41). – С. 68 – 70.
 10. Шевлюгин М.В. Ресурсо – и энергосбережение технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии; автореф. Дис... д-ра техн. наук: 05.09.03 / Шевлюгин Максим Валерьевич; Моск. гос. ун-т путей сообщения. – М., 2013. – 49с.
 11. Жемеров Г.Г. Энергия и мощность в системах энергоснабжения с полупроводниковыми преобразователями и накопителями энергии / Г.Г. Жемеров, Д.В. Тугай // *Електротехніка і електромеханіка*. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 1. – С. 45 – 57.
 12. Черемисин В.Т. Выбор мест установки накопителей электроэнергии на полигоне постоянного тока по критерию энергоэффективности / В.Т. Черемисин, М.М. Никифоров, В.Л. Незевак // *Наука и транспорт. Модернизация железнодорожного транспорта*. – 2013. – № 2 (6). – С. 48 – 52.
 13. Sulym A. Determination of rational placement for energy storages in the power supply system of the underground/A. Sulym//*Metallurgical and Mining Industry*. –Dnipro, 2016. – No 10. – P. 24-30.
 14. Бычкова М.П. Система накопителей электроэнергии для повышения энергоэффективности в метро / М.П. Бычкова // *Энергосовет*. – 2011. – № 3(16). – С. 74–76.
 15. Деньщиков К.К. Комбинированные энергетические установки на основе суперконденсаторов / К.К. Деньщиков // *Конференция ОИВТ РАН «Результаты фундаментальных исследований в области энергетики и их практическое значение»* – М., 24-26 марта 2008.
 16. Колб А.А. Аккумуляирование энергии рекуперации электрифицированного транспорта с помощью емкостных энергонакопителей / *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна*. – Д., 2010. – Вип. 31. – С. 89–94.
 17. Пупынин В.Н. Разработка энергосберегающих схем тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока 3,3 кВ с использованием накопителей энергии / В.Н. Пупынин, М.В. Шевлюгин // *Сборник научных трудов. Фундаментальные и поисковые научно-исследовательские работы в области железнодорожного транспорта*. – М.: МГУПС (МИИТ), 1997. – Вип. 916. – С. 149–152.
 18. Варакин И.Н. Применение электрохимических конденсаторов ЗАО «ЭЛТОН» в составе гибридных энергосиловых установок на карьерном автотранспорте / И.Н. Варакин, В.В. Менухов, В.В. Самитин // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2008. – Отдельный выпуск 8: Горные машины. – С. 106–115.
 19. Пат. RU 2296383 С2 Российская Федерация, МПК H01G 9/155. Электрохимический конденсатор / Варакин И.Н., Кильганова Е.А., Менухов В.В., Разумов С.Н., Самитин В.В., Тарасов С.В.; патентообладатель: Разумов С.Н. – № 2004137643/09; заявка 23.12.2004; опубл. 27.03.2007, Бюл. № 9. – 9 с.
 20. Омеляненко В.И. Инерционный накопитель энергии для систем тягового электроснабжения / В.И. Омеляненко, Г.В. Омеляненко // *Техническая электродинамика*. – 2002. – № 4. – С. 83–88.
 21. Омеляненко В.И. Концептуальный проект пригородного электропоезда с инерционным накопителем энергии / В.И. Омеляненко, Б.Г. Любарский, Л.В. Оверьянова, Е.С. Рябов // *Локомотив-информ*. – 2013. – № 11. – С. 6–11.
 22. Оверьянова Л.В. Визначення параметрів та оцінка властивостей електромеханічних інерційних накопичувачів енергії для приміських електропоїздів: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.09 / Оверьянова Лілія Вікторівна; Національний техн. ун-т «Харківський політехнічний інститут». – Х., 2014. – 20 с.
 23. Рябов Е.С. Определение параметров накопителя энергии для электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом в режиме ограничения тока тяговой сети / Е.С. Рябов // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 6 (1115). – С. 132–137.
 24. Оверьянова Л.В. Моделирование работы электромеханического инерционного накопителя энергии в системе тягового привода при торможении электропоезда / Л.В. Оверьянова, О.В. Омеляненко, И.В. Новофастовский // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 18 (1127). – С. 115–119.
 25. Северин В.П. Управление потоком мощности в тяговом приводе электропоезда при питании от контактной сети и инерционных накопителей энергии / В.П. Северин, Л.В. Оверьянова, О.В. Омеляненко // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 58 (1167). – С. 29–32.
 26. Любарский Б.Г. Сравнительный анализ накопителей энергии для транспортных средств / Б.Г. Любарский, В.П. Шайда, С.Г. Бураковский // *Залізничний транспорт України*. – 2015. – № 6. – С. 13–21.

27. Жемеров Г.Г. Энергия и мощность в системах электро-снабжения с полупроводниковыми преобразователями и накопителями энергии / Г.Г. Жемеров, Д.В. Тугай // *Электротехника і електромеханіка*. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 1. – С. 45–57.
28. Жемеров Г.Г. Уменьшение потерь энергии в системах электроснабжения подвижного состава метрополитена при использовании энергоемких накопителей электро-энергии / Г.Г. Жемеров, Н.А. Ильина, Д.В. Тугай, // *Техн. электродинамика*. – 2014. – № 5. – С. 137–138.
29. Костин Н.А. Автономность рекуперативного торможе-ния – основа надежной энергоэффективной рекупера-ции на электроподвижном составе постоянного тока / Н.А. Костин, А.В. Никитенко // *Залізничний транспорт України*. – 2014. – Вип. 3. – С. 15–23.
30. Саблін О.І. Дослідження ефективності процесу реку-ператії електроенергії в умовах метрополітену / О.І. Саблін // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2014. – Вип. 8 (72) / том 6/. – С. 9–13.
31. Саблін О.І. Моделювання взаємодії електро рухомого складу в режимі рекуператії електроенергії / О.І. Саб-лін, В.Г. Кузнецов, О.І. Бондар, В.В. Артемчук // *Елек-трифікація транспорту*. – 2014. – № 7. – С. 34–41.
32. Кузнецов В.Г. Анализ резервов энергосбережения при внедрении системы рекуперации энергии на поездах Днепропетровского метрополитена / В.Г. Кузнецов, О.И. Саблин, П.В. Губский, Е.Г. Колыхаев // *Гірничя електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. Нац. гірничого ун-ту*. – Д., 2015. – № 95. – С. 68–73.
33. Шевлюгин М.В. Ресурс- и энергосберегающие техно-логии на железнодорожном транспорте и метрополи-тенах, реализуемые с использованием накопителей энергии : автореф. Дис д-ра техн. наук : 05.09.03 / Ше-влюгин Максим Валерьевич ; Моск. гос. ун-т путей сообщения. – М., 2013. – 49 с.
34. Шевлюгин М.В. Снижение расхода электроэнергии на движение поездов в Московском метрополитене при использовании емкостных накопителей энергии / М.В. Шевлюгин, К.С. Желтов // *НТГ – Наука и техника тран-спорта*. – 2008. – Вып. № 1. – С. 15–20.
35. Шевлюгин М.В. Повышение энергетических показате-лей работы системы тягового электроснабжения желе-зных дорог с помощью накопителей энергии / М.В. Шевлюгин // *НТГ – Наука и техника транспорта*. – 2007. – № 1. – С. 68–72.
36. Шевлюгин М.В. Снижение расхода энергии и рабочей мощности основного силового оборудования тяговых подстанций электрических железных дорог с помо-щью накопителей энергии / М.В. Шевлюгин // *Моногра-фия*. – 2007. – 151 с.
37. Sulym A. Development of a comprehensive approach to determining the rational parameters of an onboard capac-itive energy accumulator for a subway train / A. Sulym, O. Fomin, P. Khozia, V. Stamation // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2019. Vol. 102. – Is- sue 3. – P. 28 – 38.
38. Sulym A. Theoretical and practical determination of on- board capacitive energy storage of the rolling stock / A. Sulym, O. Fomin, P. Khozia, A. Mastepan // *Geotechnical and mining mechanical engineering, machine building*. – 2018. – № 5. – P. 79 – 87.
39. Донченко А.В. Аналіз питань енергозбереження та енергоефективності під час експлуатації рухомого складу метрополітену / А.В.Донченко, А.О.Сулим, О.С. Сіора, О.О. Мельник, В.В.Федоров // *Наука та прогрес транспорту*. – 2016. – № 3 (63). – С. 108–119.
40. Сулим А.О. Дослідження енергообмінних процесів під час штатних умов експлуатації рухомого складу мет-рополітену з системами рекуперації / А.О. Сулим, С.О. Мужичук, П.О.Хозя, О.О. Мельник, В.В. Федоров // *Наука та прогрес транспорту*. – 2017. – № 5 (71). – С. 28 – 46.
41. Сулим А.О. Перспективи застосування накопичувачів енергії на тяговому залізничному транспорті / А.О. Сулим, А.В. Донченко, О.В. Фомін, П.О. Хозя // *Збір-ник наукових праць ДЕТУТ*. – 2017. – вип. 30. – С. 32 – 51.
42. Щуров Н.И. Применение накопителей энергии в систе-мах электрической тяги / Н.И. Щуров, К.В. Щеглов, А.А. Штанг // *Сборник научных трудов НГТУ*. – Ново-сибирск, 2008. – № 1(51). –С. 99–104.
43. Штанг А.А. Применение накопителей энергии в систе-мах электроснабжения городского электрического транспорта / А.А. Штанг, Е.А. Спиридонов, М.В. Яро-славцев // *Транспорт Российской Федерации*. – 2012. – № 3–4 (40–41). – С. 68–70.
44. Улитин В.Г. Проблема использования избыточной эне-ргии рекуперации на городском электрическом тран-спорте / В.Г. Улитин // *Коммунальное хозяйство горо-дов*. – 2009. – № 88. – С. 266–271.
45. Омеляненко В.И., Любарский Б.Г., Рябов Е.С. Концеп-туальный проект пригородного электропоезда с инер-ционным накопителем энергии. / В.И. Омеляненко, Б.Г. Любарский, Л.В. Оверьянова, Е.С. Рябов // *Локо-мотив-информ*. – 2013. – № 11. – С. 6–11.
46. Родькин Д.И., Особенности осуществления электропри-вода с накопителями энергии / Родькин Д.И., Т.В. Ве-личко // *Вісник КДПУ. Наукові праці Кременчуцького державного політехнічного університету*. – Кременчук: КДПУ. – 2000. – Вип. 2/2000 (9). – С. 124 – 132.
47. Васильев В.А. Анализ возможности применения емко-стных накопителей энергии на электрическом подвиж-ном составе / В.А. Васильев // *Известия ПГУПС*. – Спб, – 2011. – № 1. – С – 35 – 44.
48. Бялобржеський О.В. Енергетичні показники ркжиму гальмування машини постійного струму з передачею енергії на конденсаторний накопичувач / О.В. Бялобр-жеський, І.В. Шипунова // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Елект-ротехніка і енергетика»*. – Донецьк: ДонНТУ, 2013. - № 1 (14). – С. 53 – 58.
49. Афанасов А.М., Арпуть С.В., Демчук Р.Н. Пусковые режимы автономного электропоезда с бортовым нако-пителем энергии / А.М. Афанасов, С.В. Арпуть, Р.Н. Демчук // *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. – 2016. – Вип. № 11. – С. 18 – 23.
50. Domínguez M. Energy efficiency on train control: design of metro ATO driving and impact of energy accumulation devices / M. Domínguez, A. P. Cucala, A. Fernández, R. R. Pecharrromán, J. Blanquer // *9th World Congress on Railway Research (22.05–26.05.2011)*. – Madrid, 2011. – P. 1–12. – Режим доступу: http://www.vialibreffe.com/pdf/Dominguez_Maria.pdf. – Назва з екрану. – Перевірено 26.05.2016.
51. Li X. An energy-efficient scheduling and speed control approach for metro rail operations / X. Li, H.K. Lo // *Transportation Research*. – 2014. – Part B (64). – P. 73–89.
52. Yang X. An energy-efficient scheduling approach to im-prove the utilization of regenerative energy for metro sys-tems / X. Yang, A. Chen, X. Li, B. Ning, T. Tang // *Trans- portation Research*. – 2015. – Part C (57). – P. 13–29.

53. Szelağ A. Aspekty efektywności i energooszczędności w procesie modernizacji układów zasilania trakcji tramwajowej / A. Szelağ, T. Maciołek, Z. Dążek, M. Patoka // *Pojazdy szynowe. Kwartalnik naukowotechniczny poświęcony zagadnieniom konstrukcji, budowy i badań taboru szynowego.* – 2011. – № 3. – P. 34–42.
54. Allègre A.-L. Energy Storage System With Supercapacitor for an Innovative Subway / A.-L. Allègre, A. Bouscayrol, P. Delarue, P. Barrade, E. Chattot, S. El-Fassi // *IEEE Transactions on Industrial Electronics.* – Vol. 57. – Issue 12. – 2010. – P. 4001–4012.
55. Barrero R. Energy saving in public transport: enhanced energy storage systems for improved on-board light rail vehicle efficiency / R. Barrero, X. Tackoen, J. Van Mierlo. *IEEE Vehicular Tech. Magazin.* – 2008. – № 3 (3). – P. 26–36.
56. Pavel D. The energy storage system with supercapacitor for public transport / D. Pavel, S. Lubos // *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. IEEE.* – P. 1826–1830.
57. Iannuzzi D. The use of energy storage systems for supporting the voltage needs of urban and suburban railway contact lines / D. Iannuzzi, E. Pagano, P. Tricoli // *Energies.* – 2013. – № 6 (4). – P. 1802–1820.
58. Ciccarelli F. Stationary ultracapacitors storage device for improving energy saving and voltage profile of light transportation networks / F. Ciccarelli, D. Iannuzzi, D. Lauria // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies.* – 2012. – № 21 (1). – P. 321–337.
59. Iannuzzi D. Optimal Design of Stationary Supercapacitors Storage Devices for Light Electrical Transportation Systems / D. Iannuzzi, D. Lauria, P. Tricoli // *Journal of Optimization and Engineering.* – 2012. – № 13 (4). – P. 689–704.
60. Shimada M. Energy storage system for effective use of regenerative energy in electrified railways / M. Shimada, R. Oishi, D. Araki // *Hitachi Review.* – 2010. – № 59 (1). – P. 33–38.
61. Ciccarelli F. Control of metro-trains equipped with onboard supercapacitors for energy saving and reduction of power peak demand / F. Ciccarelli, D. Iannuzzi, P. Tricoli // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies.* – 2012. – № 24. – P. 36–49.
62. Sekijima Y. Development of an energy storage system for DC electric rolling stock by applying electric double layer capacitors / Y. Sekijima, M. Inui, Y. Monden, I. Aoyama // *Japanese Railway Engineering.* – 2005. – № 156. – P. 35–41.
63. Szénásy I. New Energy Management of Capacitive Energy Storage in Metro Railcar by Simulation / I. Szénásy // *Acta Technica Jaurinensis.* – 2009. – Vol. 2. – N 1. – P. 117–131.
64. Ratniyomchai, T. Recent developments and applications of energy storage devices on electrified railways / T. Ratniyomchai, St. Hillmansén, P. Tricoli // *IET Electr. Syst. Transp.* – 2014. – Vol. 4. – Iss. 1. – pp. 9–20. – doi 10.1049/iet-est.2013.0031.
65. Iannuzzi, D. Speed-based state-of-charge tracking control for metro trains with onboard supercapacitors / D. Iannuzzi, P. Tricoli // *IEEE Trans. Power Electron.* – 2012. – № 27 (3–4). – P. 2129–2140.

References

1. Kompleksna programma onovlennja zaliznichnogo ruhomogo skladu Ukraïni na 2008–2020 r.r., zatverdzhena Nakazom Ministerstva transportu i zv'jazku Ukraïni № 1259 vid 14.10.2008 r. [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu: <http://uz.gov.ua>.
2. Derzhavna programma rozvitku mis'kogo elek-trotransportu na 2007–2015 roki, zatverdzhena Postano-voju Kabinetu Ministriv Ukraïni № 1855 vid 29.12.2006 r. [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu: http://www.uazakon.com/documents/date_8o/pg_grgfoxl/index.htm.
3. Pro energoberezhennja : [Zakon Ukraïni : ofic. tekst: priijnjatij Postanovoju Verhovnoi Radi Ukraïni № 75/94-VR vid 01.07.2014 r. zi zminami i dopovnennjami, vnesenimi Zakonami Ukraïni]. – K.: Parlaments'ke vid-vo, 2014. – 15 s.
4. Pro prioritetni naprjamki innovacijnoi dijal'-nosti v Ukraïni: [Zakon Ukraïni: ofic. tekst: priijnjatij Postanovoju Verhovnoi Radi Ukraïni № 3715-VI vid 08.09.2011 r. zi zminami i dopovnennjami, vnesenimi Zakonami Ukraïni № 5460-VI vid 16.10.2012 r.]. – K.: Vidomosti Verhovnoi Radi Ukraïni, 2012. – Vip. № 19–20. – stat'ja 166. – S. 799.
5. Pro prioritetni naprjamki rozvitku nauki i tehniki : [Zakon Ukraïni: ofic. tekst: priijnjatij Posta-novoju Verhovnoi Radi Ukraïni № 2519-VI vid 09.09.2010 r. zi zminami i dopovnennjami, vnesenimi Zakonami Ukraïni]. – K.: Oficijnij visnik Ukraïni, 2010. – Vip. № 77. – stat'ja 2721. – S. 29.
6. Nakopiteli jenergii : ucheb. posobie dlja vuzov / D.A. But, B.L. Alievskij, S.R. Mizjurin, P.V. Vasjuevich: pod red. D.A. Buta. – M.: Jenergoatomizdat, 1991. – 400 s.
7. Astahov Ju.N. Nakopiteli jenergii v jelektri-cheskikh sistemah: Ucheb. posobie dlja jelektroenerg.spec. vuzov / Ju.N. Astahov, V.A. Venikov, A.G. Ter-Gazarjan. – M.: Vyssh. shkola, 1989. – 159 s.
8. Sulim A.A. Obosnovanie mesta ustanovki em-kostnyh nakopitelej jenergii v sistemah t'jagovogo jelektro-snabzhenija metropolitena / A. A. Sulim // *Elektromehanichni i energoberegajuchi sistemi.* – 2013. – № 2/2013 (22), ch. 2. – S. 282–285.
9. Shtang A.A. Primenenie nakopitelej jenergii v sistemah jelektro-snabzhenija gorodskogo jelektricheskogo transporta / A.A. Shtang, E.A. Spiridonov, M.V. Jaroslavcev // *Transport Rosijskoj Federacii.* – 2012. – № 3 – 4 (40 – 41). – S. 68 – 70.
10. Shevljugin M.V. Resurso – i jenergosberezhenie tehnologii na zheleznodorozhnom transporte i metro-politenah, realizuemye s ispol'zovaniem nakopitelej jenergii; avtoref. Dis... d-ra tehn. nauk: 05.09.03 / Shevljugin Maksim Valer'evich; Mosk. gos. un-t putej soob-shhenija. – M., 2013. – 49s.
11. Zhemerov G.G. Jenergija i moshhnost' v sistemah jenergosnabzhenija s poluprovodnikovymi preobrazovateljami i nakopiteljami jenergii / G.G. Zhemerov, D.V. Tugaj // *Elektrotehnika i elektromehanika.* – H.: NTU «HPI», 2014. – № 1. – S. 45 – 57.
12. Cheremisin V.T. Vybor mest ustanovki nako-pitelej jelektroenergii na poligone postojannogo toka po kriteriju jenergoefektivnosti / V.T. Cheremisin, M.M. Nikiiforov, V.L. Nezevak // *Nauka i transport. Modernizacija zheleznodorozhnogo transporta.* – 2013. – № 2 (6). – S. 48 – 52.
13. Sulym A. Determination of rational placement for energy storages in the power supply system of the underground/A. Sulym//*Metallurgical and Mining Industry.* – Dnipro, 2016. – No 10. – P. 24–30.

14. Bychkova M.P. Sistema nakopitelej jelektrо-jenergii dlja povyshenija jenergoeffektivnosti v metro / M.P. Bychkova // Jenergosovet. – 2011. – № 3(16). – S. 74–76.
15. Den'shnikov K.K. Kombinirovannye jenergeticheskie ustanovki na osnove superkondensatorov / K.K. Den'shnikov // Konferencija OIVT RAN «Rezultaty fundamental'nyh issledovanij v oblasti jenergetiki i ih prakticheskoe znachenie» – M., 24–26 marta 2008.
16. Kolb A.A. Akkumulirovanie jenergii rekupe-racii jelektrifitsirovannogo transporta s pomoshh'ju em-kostnyh jenergonakopitelej / Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu im. akademika V. Lazarjana. – D., 2010. – Vip. 31. – S. 89–94.
17. Pupynin V.N. Razrabotka jenergosberegajushhih shem tјagovogo jelektrоsnabzhenija zheleznyh dorog postojannogo toka 3,3 kV s ispol'zovanіem nakopitelej jenergii / V.N. Pupynin, M.V. Shevljugin // Sbornik nauchnyh trudov. Fundamental'nye i poiskovyje nauchno-issledovatel'skie raboty v oblasti zheleznodorozhnogo transporta. – M.: MGUPS (MIIT), 1997. – Vyp. 916. – S. 149–152.
18. Varakin I.N. Primenenie jelektrohimicheskikh kondensatorov ZAO «JeLTON» v sostave gibridnyh jenergosilovyh ustanovok na kar'ernom avtotransporte / I.N. Varakin, V.V. Menuhov, V.V. Samitin // Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal). – 2008. – Otdel'nyj vypusk 8: Gornye mashiny. – S. 106–115.
19. Pat. RU 2296383 C2 Rossijskaja Federacija, MPK H01G 9/155. Jelektrohimicheskij kondensator / Va-rakin I.N., Kil'ganova E.A., Menuhov V.V., Razumov S.N., Samitin V.V., Tarasov S.V.; patentoobladatel': Razumov S.N. – № 2004137643/09; zajavka 23.12.2004; opubl. 27.03.2007, Bjul. № 9. – 9 s.
20. Omel'janenko V.I. Inercionnyj nakopitel' jenergii dlja sistem tјagovogo jelektrоsnabzhenija / V.I. Omel'janenko, G.V. Omel'janenko // Tehnicheskaja jelektrо-dinamika. – 2002. – № 4. – S. 83–88.
21. Omel'janenko V.I. Konceptual'nyj proekt prigorodnogo jelektrоpoezda s inercionnym nakopitelem jenergii / V.I. Omel'janenko, B.G. Ljubarskij, L.V. Over'-janova, E.S. Rjabov // Lokomotiv-inform. – 2013. – № 11. – S. 6–11.
22. Over'-janova L.V. Vznachennja parametrov ta ocinka vlastivostej elektromehaničnyh inercijnyh nakopichuvachiv energii dlja primis'kih elektro-poizdiv: avtoref. dis. kand. tehn. nauk: 05.22.09 / Over'-janova Lilija Viktorivna; Nacional'nij tehn. un-t «Harkivs'kij politehničnij institut». – H., 2014. – 20 s.
23. Rjabov E.S. Opredelenie parametrov nakopi-telja jenergii dlja jelektrоpodvizhnogo sostava s asinhron-nym tјagovym privodom v rezhime ogranichenija toka tјagovoj seti / E.S. Rjabov // Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «Harkivs'kij politehničnij institut». – H.: NTU «HPI», 2015. – № 6 (1115). – S. 132–137.
24. Over'-janova L.V. Modelirovanie raboty jelektrоmehaničeskogo inercionnogo nakopitelja jenergii v sisteme tјagovogo privoda pri tormozhenii jelektrоpoezda / L.V. Over'-janova, O.V. Omel'janenko, I.V. Novofa-stovskij // Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «Harkivs'kij politehničnij institut». – H.: NTU «HPI», 2015. – № 18 (1127). – S. 115–119.
25. Severin V.P. Upravlenie potokom moshhnosti v tјagovom privode jelektrоpoezda pri pitanii ot kontakt-noj seti i inercionnyh nakopitelej jenergii / V.P. Se-verin, L.V. Over'-janova, O.V. Omel'janenko // Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «Harkivs'kij politehničnij institut». – H.: NTU «HPI», 2015. – № 58 (1167). – S. 29–32.
26. Ljubarskij B.G. Sravnitel'nyj analiz nako-pitelej jenergii dlja transportnyh sredstv / B.G. Ljubar-skij, V.P. Shajda, S.G. Burjakovskij // Zaliznichnij trans-port Ukraїni. – 2015. – № 6. – S. 13–21.
27. Zhemerov G.G. Jenergija i moshhnost' v sistemah jelektrоsnabzhenija s poluprovodnikovymi preobrazovate-ljami i nakopiteljami jenergii / G.G. Zhemerov, D.V. Tugaj // Elektrotehnika i elektromehaniка. – H.: NTU «HPI», 2014. – № 1. – S. 45–57.
28. Zhemerov G.G. Umen'shenie poter' jenergii v sistemah jelektrоsnabzhenija podvizhnogo sostava metropo-litena pri ispol'zovanii jenergoemkiх nakopitelej jelektrоjenergii / G.G. Zhemerov, N.A. Il'ina, D.V. Tugaj, // Tehn. elektrodinamika. – 2014. – № 5. – S. 137–138.
29. Kostin N.A. Avtonomnost' rekuperativnogo tormozhenija – osnova nadezhnoj jenergoeffektivnoj reku-peracii na jelektrоpodvizhnom sostave postojannogo toka / N.A. Kostin, A.V. Nikitenko // Zaliznichnij transport Ukraїni. – 2014. – Vip. 3. – S. 15–23.
30. Sablin O.I. Doslidzhennja effektivnosti procesu rekuperacii elektroenergii v umovah metropolitenu / O.I. Sablin // Vostochno-Evropskij zhurnal передovyh tehnologij. – 2014. – Vip. 8 (72) / tom 6/. – S. 9–13.
31. Sablin O.I. Modeljuvannja vzajemodii elektro-ruhomogo skladu v rezhimi rekuperacii elektroenergii / O.I. Sablin, V.G. Kuznecov, O.I. Bondar, V.V. Artemchuk // Elek-trifikacija transportu. – 2014. – № 7. – S. 34–41.
32. Kuznecov V.G. Analiz rezervov jenergosbere-zhenija pri vnedrenii sistemy rekuperacii jenergii na poezdah Dnepropetrovskogo metropolitena / V.G. Kuzne-cov, O.I. Sablin, P.V. Gubskij, E.G. Kolyhaev // Gіrnicha elektromehaniка ta avtomatika: nauk.-tehn. zb. Nac. gіrnichogo un-tu. – D., 2015. – № 95. – S. 68–73.
33. Shevljugin M.V. Resurso- i jenergosberegaju-shhie tehnologii na zheleznodorozhnom transporte i metropolitenaх, realizuemye s ispol'zovanіem nakopitelej jenergii : avtoref. Dis d-ra tehn. nauk : 05.09.03 / Shevljugin Maksim Valer'evich ; Mosk. gos. un-t putej soobshhenija. – M., 2013. – 49 s.
34. Shevljugin M.V. Snizhenie rashoda jelektrо-jenergii na dvizhenie poezdov v Moskovskom metropolitene pri ispol'zovanii emkostnyh nakopitelej jenergii / M.V. Shevljugin, K.S. Zheltov // NTT – Nauka i tehnika transporta. – 2008. – Vyp. № 1. – S. 15–20.
35. Shevljugin M.V. Povyshenie jenergeticheskikh pokazatelej raboty sistemy tјagovogo jelektrоsnabzhenija zheleznyh dorog s pomoshh'ju nakopitelej jenergii / M.V. Shevljugin // NTT – Nauka i tehnika transporta. – 2007. – № 1. – S. 68–72.
36. Shevljugin M.V. Snizhenie rashoda jenergii i rabochej moshhnosti osnovnogo silovogo oborudovanija tja-govyh podstancij jelektricheskikh zheleznyh dorog s po-moshh'ju nakopitelej jenergii / M.V. Shevljugin // Mono-grafija. – 2007. – 151 s.
37. Sulym A. Development of a comprehensive ap-proach to determining the rational parameters of an onboard capacitive energy accumulator for a subway train / A. Sulym, O. Fomin, P. Khozia, V. Stamation // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. Vol. 102. – Issue 3. – P. 28 – 38.
38. Sulym A. Theoretical and practical determination of on-board capacitive energy storage of the rolling stock / A. Sulym, O. Fomin, P. Khozia, A. Mastepan // Geotechnical and mining mechanical engineering, machine building. – 2018. – № 5. – P. 79 – 87.
39. Donchenko A.V. Analiz pitan' energozbere-zhennja ta energoeffektivnosti pid chas ekspluatacii ruhomogo skladu metropolitenu / A.V. Donchenko, A.O. Sulim, O.S. Siora,

- O.O. Mel'nik, V.V. Fedorov // *Nauka ta progres transportu*. – 2016. – № 3 (63). – S. 108–119.
40. Sulim A.O. Doslidzhennja energoobminnih procesiv pid chas shtatnih umov ekspluatacii ruhomogo skladu metropolitenu z sistemami rekuperacii / A.O. Su-lim, S.O. Muzhichuk, P.O. Hozja, O.O. Mel'nik, V.V. Fedo-rov // *Nauka ta progres transportu*. – 2017. – № 5 (71). – S. 28 – 46.
 41. Sulim A.O. Perspektivi zastosuvannja nako-pichuvachiv energii na tjavovomu zaliznichnomu transporti / A.O. Sulim, A.V. Donchenko, O.V. Fomin, P.O. Hozja // *Zbi-nnik naukovih prac' DETUT*. – 2017. – vip. 30. – S. 32 – 51.
 42. Shhurov N.I. Primenenie nakopitelej jenerгии v sistemah jelektricheskoi tjagi / N.I. Shhurov, K.V. Shheglov, A.A. Shtang // *Sbornik nauchnyh trudov NGTU*. – Novosi-birsk, 2008. – № 1(51). – S. 99–104.
 43. Shtang A.A. Primenenie nakopitelej jenerгии v sistemah jelektrosnabzhenija gorodskogo jelektricheskogo transporta / A.A. Shtang, E.A. Spiridonov, M.V. Jaroslavcev // *Transport Rossijskoj Federacii*. – 2012. – № 3–4 (40–41). – S. 68–70.
 44. Ulitin V.G. Problema ispol'zovanija izby-tochnoj jenerгии rekuperacii na gorodskom jelektricheskom transporte / V.G. Ulitin // *Kommunal'noe hozjajstvo go-rodov*. – 2009. – № 88. – S. 266–271.
 45. Omel'janenko V.I., Ljubarskij B.G., Rjabov E.S. Konceptual'nyj proekt prigorodnogo jelektropoezda s inercionnym nakopitelem jenerгии. / V.I. Omel'janenko, B.G. Ljubarskij, L.V. Over'janova, E.S. Rjabov // *Lokomo-tiv-inform*. – 2013. – № 11. – S. 6–11.
 46. Rod'kin D.I., Osobenosti osushhestvlenija jelektroprivoda s nakopiteljami jenerгии / Rod'kin D.I., T.V. Velichko // *Visnik KDPU. Naukovi pracj Kremenčuc'-kogo derzhavnogo politehničnogo universitetu*. – Kremen-chuk: KDPU. – 2000. – Vip. 2/2000 (9). – S. 124 – 132.
 47. Vasil'ev V.A. Analiz vozmozhnosti prime-nenija emkostnyh nakopitelej jenerгии na jelektricheskom podvizhnom sostave / V.A. Vasil'ev // *Izvestija PGUPS*. – Spb, – 2011. – № 1. – S – 35 – 44.
 48. Bjalobrzhes'kij O.V. Energetični pokazniki rkzhimu gal'muvannja mashini postijnogo strumu z pereda-cheju energii na kondensatornij nakopichuvach / O.V. Bjalob-rzhes'kij, I.V. Shipunova // *Naukovi pracj Donec'kogo na-cional'nogo tehničnogo universitetu. Serija: «Elektroteh-nika i energetika»*. – Donec'k: DonNTU, 2013. – № 1 (14). – S. 53 – 58.
 49. Afanasov A.M., Arpul' S.V., Demchuk R.N. Puskovyje rezhimy avtonomnogo jelektropoezda s bortovym nakopitelem jenerгии / A.M. Afanasov, S.V. Arpul', R.N. Demchuk // *Elektromagnitna sumisnist' ta bezpeka na zaliznichnomu transporti*. – 2016. – Vip. № 11. – S. 18 – 23.
 50. Domínguez M. Energy efficiency on train control: design of metro ATO driving and impact of energy ac-cumulation devices / M. Domínguez, A. P. Cucala, A. Fernán-dez, R. R. Pecharrmán, J. Blanquer // *9th World Congress on Railway Research (22.05–26.05.2011)*. – Madrid, 2011. – P. 1–12. – Rezhim dostupu: http://www.vialibreffe.com/pdf/Dominguez_Maria.pdf. – Nazva z ekranu. – Pe-revireno 26.05.2016.
 51. Li X. An energy-efficient scheduling and speed control approach for metro rail operations / X. Li, H.K. Lo // *Transportation Research*. – 2014. – Part B (64). – P. 73–89.
 52. Yang X. An energy-efficient scheduling approach to improve the utilization of regenerative energy for metro systems / X. Yang, A. Chen, X. Li, B. Ning, T. Tang // *Trans-Portation Research*. – 2015. – Part C (57). – P. 13–29.
 53. Szelağ A. Aspekty efektywności i ener-gooszczędności w procesie modernizacji układów zasilania trakcji tramwajowej / A. Szelağ, T. Maciołek, Z. Drązek, M. Patoka // *Pojazdy szynowe. Kwartalnik naukowotechniczny poświęcony zagadnieniom konstrukcji, budowy i badań taboru szynowego*. – 2011. – № 3. – R. 34–42.
 54. Allègre A.-L. Energy Storage System With Supercapacitor for an Innovative Subway / A.-L. Allègre, A. Bouscayrol, P. Delarue, P. Barrade, E. Chattot, S. El-Fassi // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – Vol. 57. – Issue 12. – 2010. – P. 4001–4012.
 55. Barrero R. Energy saving in public transport: enhanced energy storage systems for improved on-board light rail vehicle efficiency / R. Barrero, X. Tackoen, J. Van Mierlo. *IEEE Vehicular Tech. Magazin*. – 2008. – № 3 (3). – P. 26–36.
 56. Pavel D. The energy storage system with super-capacitor for public transport / D. Pavel, S. Lubos // *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. IEEE*. – P. 1826–1830.
 57. Iannuzzi D. The use of energy storage systems for supporting the voltage needs of urban and suburban railway contact lines / D. Iannuzzi, E. Pagano, P. Tricoli // *Energies*. – 2013. – № 6 (4). – P. 1802–1820.
 58. Ciccirelli F. Stationary ultracapacitors storage device for improving energy saving and voltage profile of light transportation networks / F. Ciccirelli, D. Iannuzzi, D. Lauria // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. – 2012. – № 21 (1). – P. 321–337.
 59. Iannuzzi D. Optimal Design of Stationary Super-capacitors Storage Devices for Light Electrical Transportation Systems / D. Iannuzzi, D. Lauria, P. Tricoli // *Journal of Op-timization and Engineering*. – 2012. – № 13 (4). – P. 689–704.
 60. Shimada M. Energy storage system for effective use of regenerative energy in electrified railways / M. Shimada, R. Oishi, D. Araki // *Hitachi Review*. – 2010. – № 59 (1). – P. 33–38.
 61. Ciccirelli F. Control of metro-trains equipped with onboard supercapacitors for energy saving and reduction of power peak demand / F. Ciccirelli, D. Iannuzzi, P. Tricoli // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. – 2012. – № 24. – P. 36–49.
 62. Sekijima Y. Development of an energy storage system for DC electric rolling stock by applying electric double layer capacitors / Y. Sekijima, M. Inui, Y. Monden, I. Aoyama // *Japanese Railway Engineering*. – 2005. – № 156. – P. 35–41.
 63. Szénásy I. New Energy Management of Capacitive Energy Storage in Metro Railcar by Simulation / I. Szénásy // *Acta Technica Jaurinensis*. – 2009. – Vol. 2. – N 1. – P. 117–131.
 64. Ratniyomchai, T. Recent developments and ap-plications of energy storage devices sn electrified raslways / T. Ratniyomchai, St. Hillmansén, P. Tricoli // *IET Electr. Syst. Transp*. – 2014. – Vol. 4. - lss. 1. – pp. 9-20. – doi 10.1049/iet-est.2013.0031.
 65. Iannuzzi, D. Speed-based state-of-change traking control for metro trains with onboard supercapacitors / D. Iannuzzi, P. Tricoli // *IEEE Trans. Power Electron*. – 2012. – № 27 (3-4). – P. 2129–2140.

Третьяк Э.В. Анализ исследований по внедрению накопителей энергии на подвижном составе метрополитена.

В статье рассмотрены возможные места размещения накопителей энергии в системе энергообеспечения метрополитена. Определено, что основным преимуществом применения накопителей энергии в метрополитене есть особенность эксплуатации его подвижного состава. Обоснованно необходимость применения накопителей на подвижном составе метрополитена, сформулированы преимущества именно применение бортовых накопителей энергии. Сформулировано комплекс задач, которые можно решить в метрополитене, за счет внедрения бортовых накопителей энергии. Описаны основные малоизученные и актуальные задачи, которые решают ученые при внедрении накопителей энергии на подвижном составе метрополитена, в частности при создании и модернизации подвижного состава метрополитена с бортовыми накопителями энергии. Выяснено, что значительное количество существующих исследований направлено на функционирование бортовых накопителей энергии в силовой цепи подвижного состава. В этих исследованиях рассмотрены энергообменные процессы между накопителем, электроприводом и контактной сетью, при которых энергия рекуперативного торможения используется на тягу подвижного состава.

Установлено, что одним из малоизученных направлений исследований остается использование энергии рекуперации с бортового накопителя энергии на питание потребителей собственных нужд поезда во время его эксплуатации. Предложено в дальнейшем сосредоточить усилия на направление исследований энергообменных процессов, которые возникают между бортовым накопителем, потребителями собственных нужд и контактной сети.

Ключевые слова: бортовой накопитель энергии, подвижной состав, метрополитен, энергообеспечение.

Tretiak E.V. Analysis of research on the introduction of energy storage devices on metro rolling stock.

This paper describes the possible locations of energy storage devices in metro power supply system. The necessity and priority of introduction of on-board energy storage devices on metro rolling stock is described. According to the review and analysis results of a number of studies, the advantages of using on-board energy storage devices in comparison with sta-

tionary ones have been stated. The use of on-board energy storage devices circulation of the regenerative braking electrical energy is carried out directly by consumer, decreases energy losses to a minimal value, maximize the efficiency of energy exchange processes, allow store move metro cars from the tunnel with full or partial removal of voltage on the traction substation bus in emergency cases with the minimal impact on the quality of external power supply, maximum rise and voltage regulation in the overhead line and current collectors of the metro cars, minimal voltage and thermal loading on buses and cables of the overhead line. The main advantage of using energy storage in the metro is the distinctiveness of the metro rolling stock operation, which will reduce electricity consumption from the network, flatten minute and hour schedules of electricity consumption, improve the safety of passenger transportation. The paper describes the main insufficiently studied and priority tasks under investigation concerning the solving of problems of increasing the energy efficiency of the metro. A considerable amount of these studies focuses on the operation of on-board energy storage devices in a rolling stock in which the regenerative energy is supplied for traction when the metro train accelerates. The current area of research is the problem of using regenerative energy for the own needs of train users' under normal and emergency modes of operation of the power supply system. Further studies should address the study of energy exchange processes between consumers for their own needs, the contact network and the on-board energy storage devices provided that the energy is used by non-traction consumers, which in perspective will increase energy efficiency of the metro rolling stock, improve its technical and operational characteristics and develop a theory of use of energy storage devices in the metro, which allows to obtain positive results, that can be used by railway car building enterprises during designing and creation of the metro rolling stock.

Keywords: onboard energy storage devices, rolling stock, metro, energy saving.

Третьяк Едуард В'ячеславович – провідний інженер науково-дослідної лабораторії експериментальних досліджень залізничної техніки, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», edgarkremenchug@ukr.net

Стаття подана 04.02.2020 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-109-119>

УДК 621.793

ПРО МОЖЛИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ГОРІННЯ МЕТАЛЕВИХ ЧАСТИНОК 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.

Розглянуто особливості отримання композиційних покриттів, в тому числі алюмокерамічних, газотермічними методами напилення. Зіставлені технологічні характеристики сучасних методів напилення, показана позитивна роль у формуванні покриттів високої швидкості напилюваних частинок. Особливий інтерес для отримання захисних і функціональних покриттів представляє алюміній, найпоширеніший метал на Землі. Робота присвячена аналізу можливостей отримання металооксидних покриттів методами газотермічного напилення порошками чистих металів в режимі горіння й експериментальна перевірка отримання алюмокерамічних покриттів методом детонаційно-газового напилення порошками алюмінію. Показана можливість використання горіння металів при газотермічному напиленні для отримання металооксидних і оксидних покриттів. Зіставлені значення параметрів, що визначають схильність до утворення покриттів, а саме, температури плавлення, густини, параметра складності плавлення і коефіцієнта акумуляції тепла для деяких металів і їх оксидів. Були проведені експерименти з детонаційно-газового напилювання покриттів порошками алюмінію. Показана можливість отримання композиційних покриттів алюміній-оксид алюмінію. Встановлено, що властивості одержуваних покриттів визначаються відносним вмістом в покриттях оксидів алюмінію, що залежить від ступеня окислення частинок алюмінію, їх вихідного розміру та вмісту кисню в детонаційній суміші газів. Розроблено рекомендації щодо створення спеціалізованого обладнання, а також розглянуті перспективні напрямки дослідження процесів горіння частинок металів і сплавів при детонаційно-газовому і газополумєневих методах напилення.

Ключові слова: газотермічне напилення покриттів, детонаційно-газове напилення покриттів, алюміній, температура плавлення, густина, параметр складності плавлення, коефіцієнт акумуляції тепла, частка порошку.

Вступ. Для багатьох технічних застосувань потрібні композиційні покриття з підвищеними експлуатаційними властивостями, при цьому технологічними у виробництві. У сучасній промисловості

набувають поширення газотермічні покриття на основі алюмінію і його сплавів. Це пояснюється низькою температурою плавлення алюмінію, стійкістю в різних агресивних середовищах і більш низьким, ніж у сталі, електрохімічним потенціалом [1]. Високі антикорозійні характеристики алюмінієвих покриттів забезпечують їх довготривалу стійкість в атмосфері промислових міст і селищ, морській воді, залізобетонних конструкціях і ін. [2]. Проте характерною особливістю таких покриттів є їх низька стійкість проти стирання. Для підвищення зносостійкості відомі спроби використання суміші алюмінію з оксидом алюмінію [2].

Для ряду технічних застосувань перспективно використання алюмокерамічних покриттів, одержуваних методами газотермічного напилення [1, 2]. Так, алюмокерамічні покриття забезпечують захист від зносу і корозії конструкцій з чорних металів різного призначення, що експлуатуються в агресивних середовищах з pH 2 ... 12 і розчинах солей трубопроводів, резервуарів, корпусів судів, мостів і естакад, портових та інших гідротехнічних споруд, нафтових платформ і ін. Алюмокерамічні покриття захищають від корозії зварні шви та підвищують їх опір зародженню корозійно-втомних тріщин [3]. Для отримання алюмокерамічних покриттів відомо застосування плазмового напилення сумішами порошків алюмінію з титаном заліза, коли формується покриття з утворенням включень інтерметалідів з мікротвердістю ≈ 11000 МПа [2]. Досить високих показників якості алюмокерамічного покриття досягають при плазмовому напиленні алюмінієвим порошковим дротом, в якій керамічний сердечник розташовується в алюмінієвій оболонці [4]. Відомо також застосування плазмового напилення порошками, плакованими алюмінієм [5]. Однак ці методи отримання покриттів відрізняються високою енерго- і трудомісткістю, вимагають організації виробництва спеціальних витратних матеріалів, що обумовлює

пошук і розробку більш ефективних методів отримання алюмокерамічних та інших видів композиційних покриттів.

Недостатня корозійна стійкість газотермічних покриттів з металів і сплавів найчастіше пов'язана з такими основними чинниками, як [1, 2]: досить високе окиснення матеріалу розплавлених частинок, що формують покриття, іноді досягає 30–60 %; пористість покриттів може досягати 10–20 %; деградація вихідного матеріалу покриття при напilenні; низька адгезійна і когезійна міцність. Усунення цих недоліків ведеться по ряду напрямків, в тому числі: використання механічних сумішей порошків металів і кераміки й порошкових дрітків з металевою (алюмінієвою) оболонкою [2, 3, 6]; застосування установок плазмового надзвукового напilenня (робочий газ – суміш повітря з метаном) [6, 7]; застосування установок надзвуковий електродугової металізації (робочий газ – суміш повітря з метаном) [4]; впровадження холодного газодинамічного напilenня.

Надзвукові методи напilenня забезпечують високу продуктивність (до 50 м²/год) при незначних поточних витратах (вартість покриття становить 2–3 вартості витраченого алюмінію). Питомі витрати електроенергії становлять 1 ... 3 кВт·ч/м². При цьому пористість знижується до 0,5–2 %, окиснення до 2 ... 5 %, міцність зчеплення підвищується до 35 МПа. Таке поліпшення якості покриттів пов'язано в основному з високою швидкістю польоту частинок [4, 8]. Наявність кераміки в алюмінієвій матриці підвищує механічну міцність покриттів і стійкість до газоабразивного та ерозійного зносу. Алюмокерамічні покриття знайшли застосування для захисту труб, в основному теплових мереж, від корозії [6]. За даними [9] розрахунковий об'ємний вміст оксидів в частинках при електродуговому напilenні становить в середньому від 3,3 до 12,7 %.

Перспективним є метод холодного газодинамічного напilenня [10]. У структурі одержуваних покриттів практично відсутні тендітні оксидні плівки, що утворюються при взаємодії розплавленого алюмінію з киснем повітря в плазмовому струмені або розряді електродуги. Частинки в цьому методі не розплавляються і, отже, додаткових оксидів не утворюють. Однак висока вартість технологічного обладнання та низька продуктивність обмежують застосування цього способу.

Таким чином, для ряду застосувань бажано отримання чистих алюмінієвих покриттів, проте в багатьох випадках наявність у покриттях, керамічних складових робить позитивний вплив на властивості покриттів. Тоді можна припустити, що процеси окиснення металевих частинок при напilenні в кисневмісних середовищах можуть бути використані для отримання композиційних покриттів. Тим більше відомо, що горіння частинок металу знаходить застосування в різних додатках, включаючи космічну галузь, підводний реактивний рух, вибухові роботи, піротехніку, отримання водню та ін. [11]. Особливий інтерес представляє алюміній – найпоширеніший метал на Землі й відносно безпечний в вико-

ристанні. Одна з основних проблем при організації горіння мікрочастинок алюмінію – висока температура запалювання. Для частинок діаметром понад 100 мкм запалювання відбувається тільки після плавлення оксидної плівки Al_2O_3 – при 2350 К. Розплавлена оксидна плівка під дією сил поверхневого натягу збирається в шапочку, оголюючи ядро алюмінію і тим самим дозволяючи запалюватися металу.

Метою роботи є аналіз можливостей отримання металооксидних покриттів методами газотермічного напilenня порошками чистих металів в режимі горіння та експериментальна перевірка отримання алюмокерамічних покриттів методом детонаційно-газового напilenня порошками алюмінію.

Обґрунтування можливості отримання металооксидних покриттів при напilenні металевими порошками. Схильність до формування якісних покриттів з металів при напilenні значною мірою залежить від розчинності в них кисню [1, 12, 13]. Деякі метали, наприклад *Al*, практично не розчиняють кисень ні у твердому, ні в рідкому стані. При окисленні таких частинок утворюється відособлена фаза у вигляді поверхневих плівок оксидів. Інші метали (*Fe*, *Cu*, *Ni*, *Ti*) розчиняють кисень. При нанесенні покриттів з порошків сплавів крім окислення елемента – основи сплаву – може відбуватися й окислення домішок. У ряді випадків теплота хімічних реакцій (екзотермічна або ендотермічна) може зробити істотний вплив на процеси нагрівання, плавлення і перегріву частинок. При глибині хімічних перетворень приблизно 1 мкм на частці діаметром 100 мкм хімічна теплота може скласти 30 ... 50 % від сумарної теплоти, що йде на нагрівання і плавлення частинки [14]. Реакції, що протікають на поверхні металевих частинок в струмені напильовального потоку, можуть призводити до утворення оксидів, нітрідів, карбідів, однак в практиці такі реакції цілеспрямовано не використовуються. Напilenня покриттів порошками оксидів утруднено їх високою температурою плавлення і низькою теплопровідністю. Процеси горіння металів є екзотермічними, протікають при високій температурі та з великими швидкостями. Спалюванням розпорошених в активному газі порошкоподібних металів синтезує нові порошкові матеріали [15–17]. Все це зумовлює можливість використання горіння металів при газотермічному напilenні для отримання металооксидних і оксидних покриттів.

Найбільшу схильність до утворення газотермічних покриттів мають матеріали, що мають мінімальне значення параметра складності плавлення $D = c_m^2 \rho T_m^2$ і максимальне значення коефіцієнта акумуляції тепла $b = \sqrt{c \rho \lambda}$, Вт·м⁻² × К·с^{-0,5} де *c*, *ρ*, *T_m*, *λ* – теплоємність, щільність, температура плавлення і теплопровідність матеріалу. У табл. 1 наведені значення цих характеристик для деяких металів.

Параметр складності плавлення виражає відношення кількості тепла, необхідного для розплав-

лення одиниці об'єму частинки порошку, до часу перебування частинки в зоні нагріву. Це час характеризує щільність матеріалу, що визначає інерційність частки в струмені напилувального потоку. В даний час існує велика кількість публікацій щодо застосування дисперсних порошоків алюмінію як джерела енергії для двигунів, а також вихідного матеріалу для синтезу нанодисперсних порошоків оксиду алюмінію [15–17]. В обох випадках застосування порошокподібного алюмінію обумовлено процесом екзотермічної реакції окислення в турбулентному потоці активного газу. Одна з основних проблем при організації горіння мікрочастинок алюмінію – це висока температура запалювання.

Таблиця

Температура плавлення, щільність, параметр складності плавлення і коефіцієнт акумуляції тепла для деяких металів

Матеріал	$T_m, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{г/см}^3$	$D, 10^{10} \text{кДж}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{м}^{-3}$	$b, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{с}^{0,5}$
Al	660,5	2,71	0,664	236
Al ₂ O ₃ (корунд)	2038 – 2054	3,97	6,88	56
B	2075	2,33	–	–
B ₂ O ₃	480	1,84	–	–
Mg	650	1,74	0,480	–
MgO	2787 – 2813	3,65	14,75	53
Ti	1668	4,5	1,310	83
TiO ₂ (рутил)	1855	4,24	3,85	36

Матеріали та методи дослідження. Проведено систематизацію та огляд наукових публікацій і патентів вітчизняних і закордонних вчених з газотермічного напilenня металевих і металооксидних покриттів, дослідженню займання і горіння порошоків металів і використання цих процесів для виробництва ультрадисперсних порошоків. Напilenня дослідних зразків виконували на детонаційно-газовій установці ДНП-3 з використанням ацетилено-кисневої суміші. У попередніх дослідженнях як вихідні порошки використовували алюмінієву пудру, сферичний порошок алюмінію з розміром частинок 100–250 мкм, а також порошки алюмінію із середнім розміром частинок 40 мкм. Навішування порошку масою 100 мг вводилися в стовбур вручну.

Результати вивчення напilenня порошками алюмінію. Попередні експерименти підтвердили можливість отримання покриттів з порошоків металевих алюмінію з інтенсивним протіканням реакції окиснення в потоці продуктів газової детонації ацетилено-кисневої суміші. У міру збільшення відносного вмісту кисню в суміші, що детонує спостерігаються такі зміни фазового складу покриттів з алюмінієвої пудри (рис. 1): 1) кількість $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$ покриття кілька збільшується, про що свідчить збільшення інтенсивності ліній цієї фази на рентгенограмах; 2) зростає вміст $\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$. У покриттях, отриманих при максимальному вмісті кисню, судячи по

співвідношенню інтенсивностей ліній $\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$, $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$ і Al (рис. 1, б) оксидної фази більше, ніж металевій. Основна складова цього покриття фаза $\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$, інтенсивність ліній Al і $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$ значно менше.

Основною фазою покриття з великодисперсного порошку Al ($d_p = 100 \dots 250$ мкм) є Al. При максимальному вмісті ацетилену на рентгенограмах покриттів є лінії $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$ і $\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$, однак інтенсивність їх на порядок нижче, ніж ліній Al (рис. 2). Також, як і при напilenні алюмінієвою пудрою, вміст $\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$ в порівнянні з $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$ в покриттях зростає зі збільшенням вмісту кисню.

При мікроскопічному дослідженні покриттів з порошку Al з розміром частинок близько 40 мкм виявлено, що вони містять ділянки з різною мікротвердістю ($P = 0,2$ Н). Мікротвердість світлих ділянок коливається в межах 508–928 МПа, сірих 1028–1770 МПа, темних 1770–1892 МПа. За даними рентгеноструктурного аналізу в покритті міститься ~20% $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$, а також $\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$.

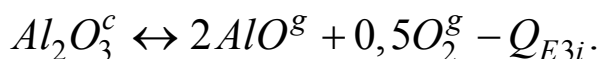
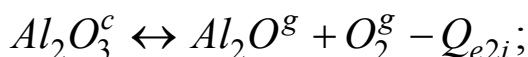
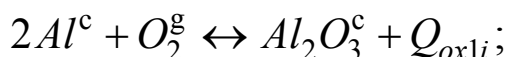
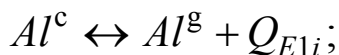
Управління процесами горіння частинок алюмінію. Технології, що використовують газову детонацію, є досить поширеними [18, 19], але використання горіння частинок металів в середовищі продуктів детонації є новим напрямком і вимагає аналізу можливих шляхів управління процесами горіння частинок металів, в тому числі їх займанням.

Один з найважливіших параметрів, що характеризує хімічну активність частинок алюмінію, це час горіння одиничної частинки. Для мікронних і більших частинок він визначається за формулою $t = ad_p^n$, де $n = 1,5 - 2,0$ [11]. Час горіння слабо залежить від температури та тиску навколишнього газу, тобто швидкість горіння контролюється дифузією в суміші газів. Температура запалювання знижується зі зменшенням розміру частинок: від 2350 К при $d_p = 100$ мкм до 933 К при $d_p = 100$ нм.

Тоді при проектуванні детонаційно-газових пристроїв необхідно в камері згорання передбачити зону займання довжиною $l_{\text{займан.}}$, достатню для забезпечення нагрівання частинок до цих температур. Ця довжина визначається комплексом чинників – діаметром частинок порошку і їх фракційним складом, температурою і швидкістю навколишнього газу, параметрами теплової та швидкісної релаксації частинок порошку, вихідною довжиною порошкової хмари в камері згорання і концентрацією в ній порошку металу $K_{\text{пор}} = \frac{M_{\text{Me}}}{S l_{\text{займан.}}}$, де M_{Me} – маса роз-

порошеного порошку металу; S – площа поперечного перерізу камери згорання; складом газової суміші в порошковій хмарці, критеріями Рейнольдса (*O. Reynolds*), Нуссельта (*W. Nußelt*), Біо (*J.B. Biot*) та ін. Чим більше частки порошку, тим більше час запалювання і, відповідно, необхідна довжина зони займання.

За останнє сторіччя світовою наукою накопичений величезний теоретичний і експериментальний матеріал по окисленню і горінню порошкоподібних металів в газоподібних середовищах і існують різні моделі горіння частинок. Стосовно до технологічних пристроїв ці моделі отримали подальший розвиток [15 – 17]. Горіння полідисперсних частинок алюмінію в кисневмісному середовищі супроводжується протіканням комплексу фізико-хімічних явищ:



При записах цих процесів прийняті наступні позначення: Q_{E1i} – теплота випаровування Al ; Q_{oxji} , Q_{Eji} – теплота реакцій окислення алюмінію і теплоти випаровування Al_2O_3 на поверхні частинок; Q_{oxV} – теплота реакції окислення в обсязі потоку; Q_{E2V} , Q_{E3V} – теплоти процесів випаровування (конденсації) оксиду в обсязі потоку; індекси: j – індекс поверхні ($j=1$ – вільна поверхня, $j=2$ – поверхня, покрита оксидом); i – номер фракції; E – випаровування; V – процеси в обсязі потоку; g – газоподібні продукти; c – конденсована фаза.

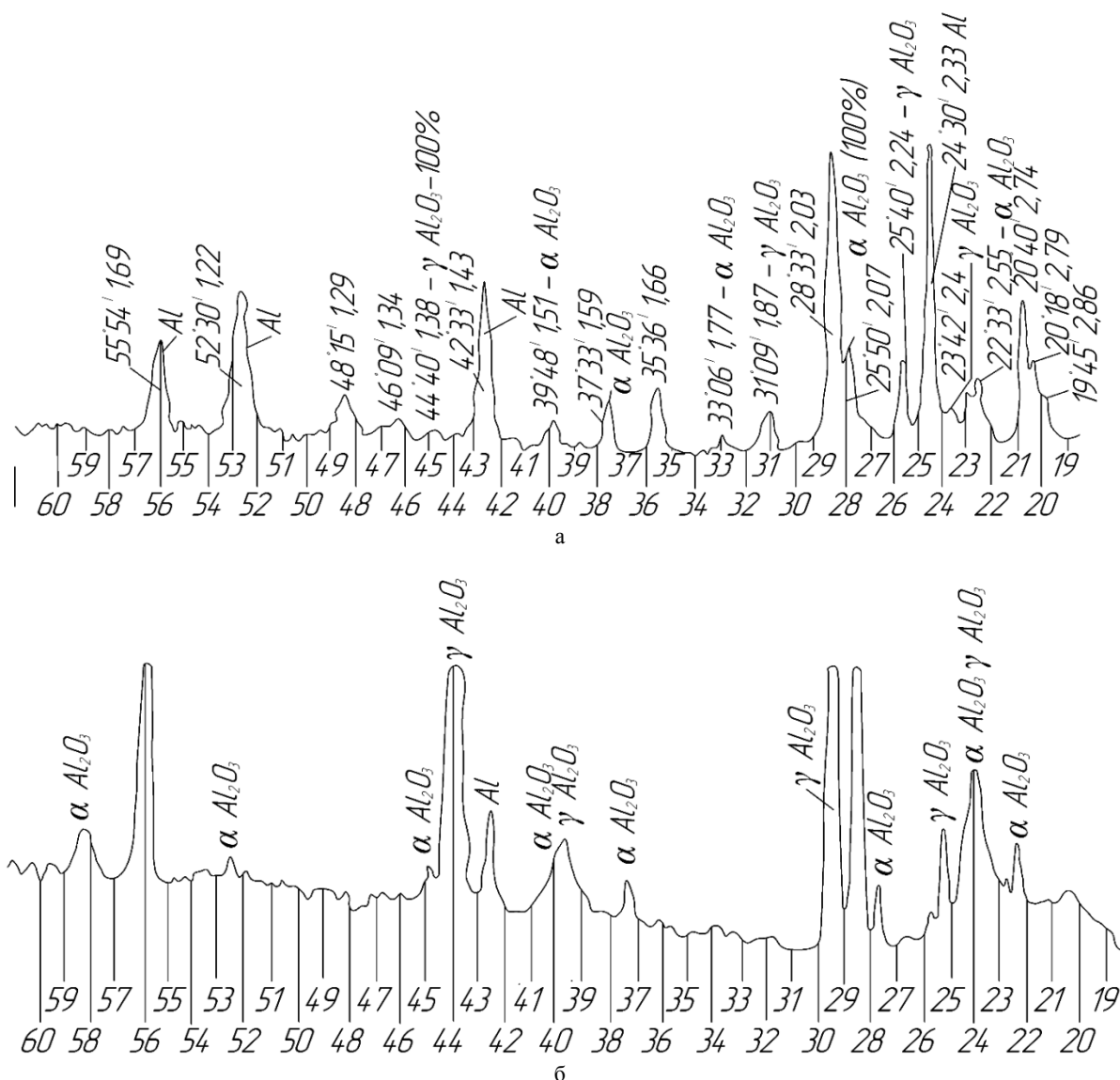
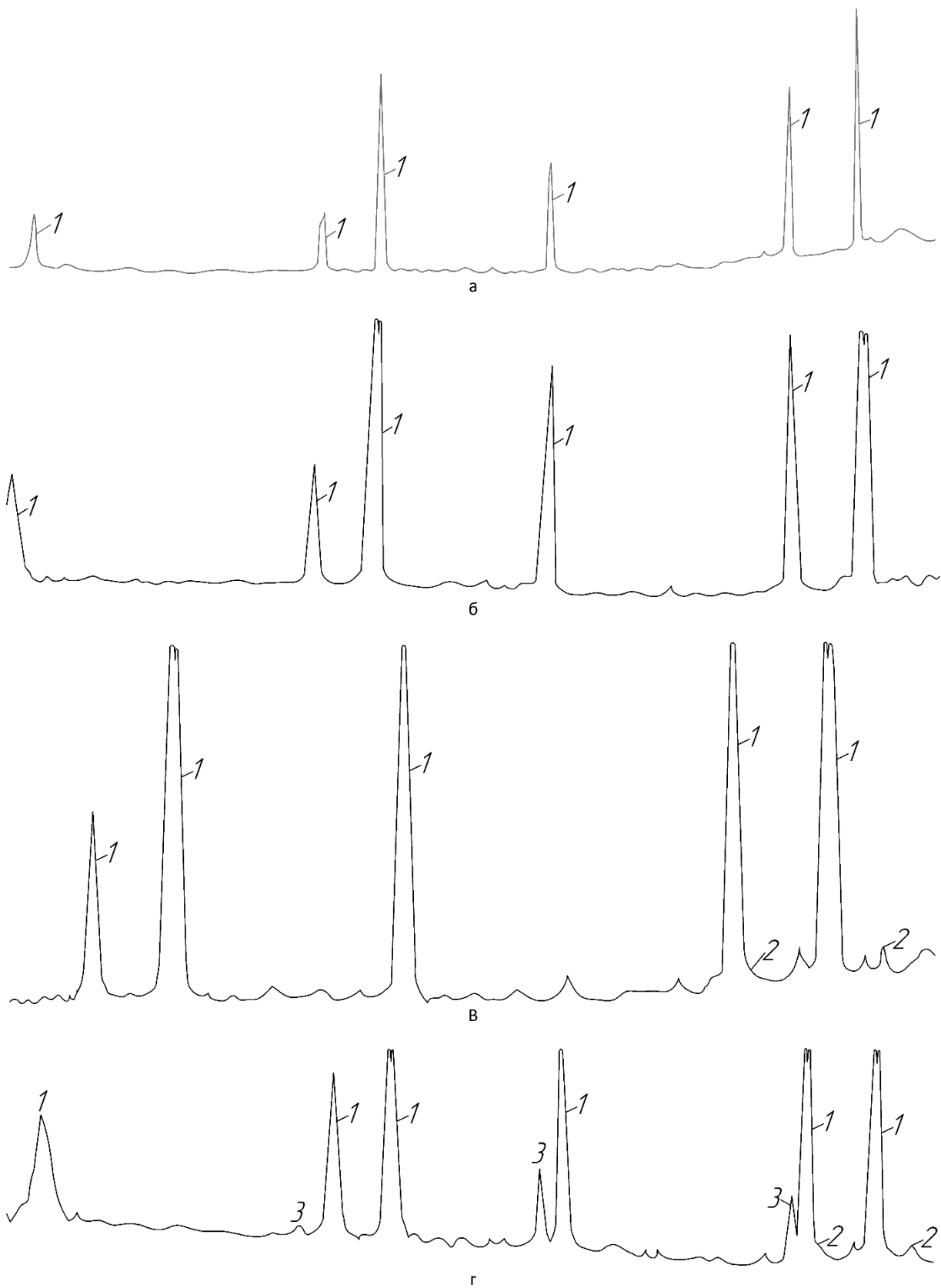


Рис. 1. Рентгенограми покриттів з алюмінієвої пудри. Витрата газів за робочий цикл, см³: кисень – 105; ацетилен – 300 (а), 120 (б)



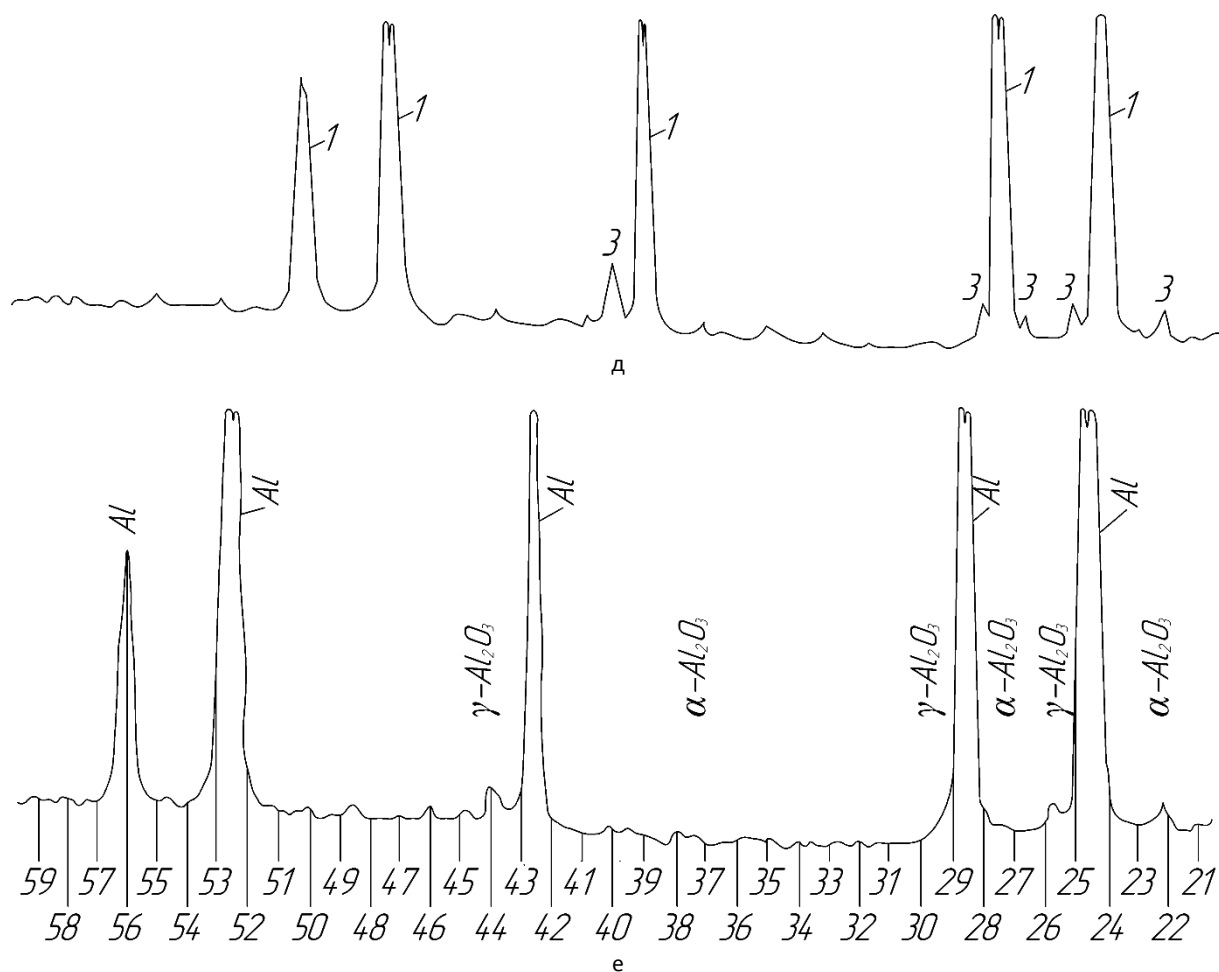


Рис. 2. Рентгенограми порошку (а) і покриттів (б, в, г, д, е) з алюмінію. Витрата ацетилену, см³/цикл: 226 (б), 325 (в), 132 (г), 158 (д), 186 (е). Позначення фаз: 1 – Al; 2 – α – Al_2O_3 ; 3 – γ – Al_2O_3

При плавленні оксид на поверхні збирається в утворення, за формою близькі до сферичних через перевищення поверхневого натягу рідкого оксиду над поверхневим натягом алюмінію. В результаті оголюється поверхня рідкого алюмінію, звільненого від оксиду. В цілому поверхня частинки складається з ділянок поверхні рідкого алюмінію (вільна поверхня) і зовнішньої поверхні оксиду (окислена поверхня). Передбачається, що окислення парів алюмінію відбувається не тільки в об'ємі навколо частинки, але і безпосередньо на зовнішній поверхні оксиду. В результаті хімічних реакцій і випаровування в частці відбувається збільшення маси оксиду і зменшення маси алюмінію. В результаті дії поверхневих сил знов утворений на вільній поверхні оксид безперервно з неї стікає і накопичується у сферичних утвореннях, що виникли в момент плавлення оксиду. Об'єм крапель оксиду постійно зростає, і вони зливаються в великі. Об'єм краплі алюмінію безперервно зменшується, надалі вона поділяється на окремі краплі. Частка окисленої поверхні частинки збільшується, а вільної – зменшується. В кінці процесу горіння частка майже повністю складається з оксиду [15, 16].

В [11] наведена залежність для часу горіння одиничної частинки, що враховує безліч експериментальних даних. Тоді умову отримання оксидних покриттів (при повному згорянні частинок Al) можна записати у вигляді

$$\left(L + l_n - l - \frac{l_{об}}{2} \right) \geq \bar{v} \frac{cd_p^{1,8}}{X_{eff} p^{0,1} T^{0,2}},$$

де L – довжина детонаційної камери згорання; l_n – дистанція напilenня; l – відстань між закритим торцем камери згорання і порошковою хмаркою; $l_{об}$ – довжина порошкової хмарки; d_p – діаметр частинок, мкм; a_k^0 – концентрація кисню; $\bar{v}$ – середня швидкість руху частинок; X_{eff} – ефективна концентрація окислювача, $X_{eff} = C_{O_2} + 0,6C_{H_2O} + 0,22C_{CO_2}$; p дано в атмосферах; T – в градусах Кельвіна; $c = 7,35 \cdot 10^{-6}$ – константа. Цей вираз дійсний тільки для мікронних і більших частинок, які горять в контрольованих дифузійних умовах.

Перспективи подальших досліджень. Отримані результати підтверджують доцільність продовження вивчення і розробки детонаційно-газових технологій [18, 19], в тому числі способів і пристроїв для практичного використання в промислових цілях горіння металевих частинок в потоках продуктів газової детонації.

Створення спеціалізованих детонаційно-газових установок, що використовують горіння металевих частинок, потребує вирішення низки завдань, пов'язаних з організацією робочого процесу в камері згоряння. В першу чергу це забезпечення надійного займання металевих частинок потоком продуктів газової детонації, запалювання хмарки металогазової суміші зі збереженням детонаційного режиму поширення горіння, стабілізації ефективного процесу горіння до повного вигорання частинок і формування напливального струменя, що забезпечує надійне зчеплення частинок з напилюваною поверхнею при утворенні покриттів.

Для створення детонаційно-газових установок для напилення порошками металів в режимі горіння висувається необхідність вирішення комплексу проблем:

1. Розробка систем подачі вихідних порошків активних металів в детонаційну камеру згоряння, а більш конкретно, в початкову ділянку зони реакції. Функція системи полягає в дозуванні необхідної дози порошку і транспортуванні її для розпилення в камері згоряння. Особливі труднощі представляє дозування дрібнодисперсних порошків типу алюмінієвої пудри. При цьому газ, який транспортує, не повинен істотно знижувати ступінь активності навколишньої атмосфери, чи призводити до відсутності кисню. Не виключається можливість подачі в зону створеної газопорошкової хмари кисню або іншого окислювача. Повинен бути також забезпечений захист системи від впливу продуктів газової детонації.

2. Детонаційна камера згоряння (ДКЗ) повинна забезпечити змішування суміші газів, що детонують, з вихідним порошком, виникнення детонаційного режиму горіння газової суміші й газопорошкової суміші з горінням частинок порошку і забезпечення необхідного коефіцієнта повноти їх згоряння,

$$K_{\text{ПГ}} = \frac{M_{\text{ОКС}}}{\beta M_{\text{Ме}}},$$

де $M_{\text{ОКС}}$ – маса оксидів, що утворюються; $M_{\text{Ме}}$ – маса розпорошених порошків металу; β – масовий стехіометричний коефіцієнт реакції окислення (відношення маси оксидів, що утворюються до маси згорілого металу), для реакції Al з O_2 $\beta = 1,89$ [17].

При необхідності ДКЗ повинна забезпечити можливість додаткової подачі вторинних кисневмісних газів в зону горіння металевих частинок для необхідного ступеня їх вигорання.

Можливе отримання оксиметалічних і оксидних покриттів з порошків металів і сплавів за спеціальними схемами детонаційно-газового напилення (рис. 3). В основу їх покладено ініціювання горіння і

розвиток детонації в прилеглий до закритого торця зоні стовбура, заповненої газовою сумішшю з досить багатим вмістом горючого газу. У зоні розпилення вихідного металевих порошку стовбур заповнюється збідненою по пальному газу детонаційною сумішшю. У схемі, а це досягається коштом зміни складу горючої суміші в процесі наповнення стовбура.

Схеми (рис. 3, а, б і в) реалізуються на звичайних ДГУ з розведенням горючої суміші в вихідній частині стовбура киснем або повітрям. Схема (рис. 3, г) передбачає наявність спеціальної перфорації на стінках вихідної ділянки стовбура, що забезпечує додатковий підсос повітря під час згоряння горючої суміші та витікання газосуспензії, що реагує. Схема (рис. 3, д) передбачає розпорошення вихідного порошку в суміші з досить багатим вмістом горючого газу і заповнення вихідної ділянки стовбура горючою сумішшю збагаченою киснем.

Організовуючи ту чи іншу схему горіння частинок Al і перериваючи її на тому чи іншому етапі, можна забезпечити різний стан частинок в момент зіткнення з поверхнею деталі, а тим самим фіксувати зміст оксидної фази в покритті та характер її розподілу. При нагріванні понад 1000°C спостерігається перетворення $\gamma - Al_2O_3$ в $\alpha - Al_2O_3$. При затвердінні рідких крапель в умовах значного переохолодження утворюється $\gamma - Al_2O_3$, а не $\alpha - Al_2O_3$. При ДГНП висока швидкість часток не обмежує можливості формування щільної структури та утворення міцних адгезійних і когезійних зв'язків між частинками, в т.ч. і між утвореними оксидними включеннями.

У методах газотермічного напилення, що використовують горіння газових сумішей (традиційне і високошвидкісне газополум'яні, детонаційно-газовий і ін.), формуються робочі середовища, що містять пари води, двоокис вуглецю, добавки різних газів, в тому числі інертних, які можуть брати участь в процесах окислення і горіння напилюваних частинок. Це підтверджують сучасні роботи з фізики горіння і вибуху. При експериментальних дослідженнях конденсованих продуктів горіння вільних одиничних частинок алюмінію, бору та їх композицій в сумішах кисню з азотом і кисню з аргоном в інтервалі тисків від 2 до 40 атм виявлено сильний вплив тиску і складу окислювального середовища на масову частку великих частинок в продуктах горіння алюмінію. Ця частка значно знижується для продуктів горіння частинок сплаву $90\% Al + 10\% B$ [20]. Горіння частинок алюмінію спостерігалось і в середовищі двоокису вуглецю [21, 22]. Це зумовлює доцільність вивчення можливого впливу подібних компонентів продуктів згоряння на поведінку напилюваних частинок.

Іншим важливим напрямком розвитку детонаційно-газового і газополум'яних методів напилення є вивчення та розробка технологій отримання наноструктурованих покриттів, а також отримання ультрадисперсних і нано-порошків.

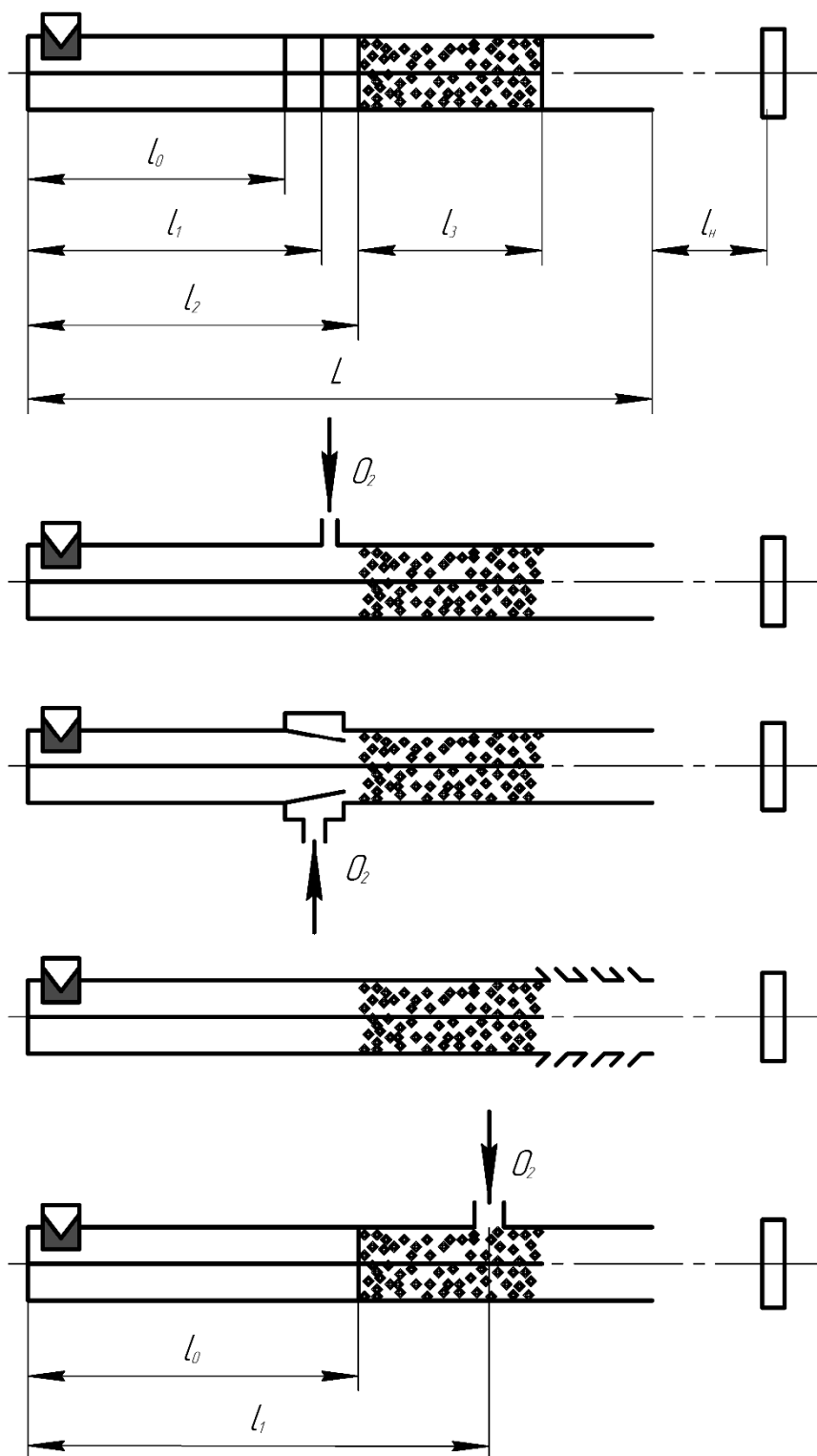


Рис. 3. Схеми нанесення оксиметалічних і оксидних покриттів з металевих порошків детонаційно-газовим способом:

l_0 – переддетонаційна відстань; l_1 – зона наповнення стовбура сумішшю з багатим вмістом горючого газу;

l_2 – початкове положення порошкової хмари; l_3 – довжина порошкової хмари; l_n – дистанція напильовання

Висновки

1. Обґрунтовано можливість отримання композиційних покриттів, зокрема оксидно-металевих, газотермічним напыленням металів і сплавів при використанні робочих кисневмісних середовищ.

2. Експериментально показана можливість композиційних покриттів алюміній-оксид алюмінію детонаційно-газовим напыленням. Показано, що властивості одержуваних покриттів визначаються відносним вмістом в покриттях оксидів алюмінію, що залежить від ступеня окислення частинок алюмінію, їх вихідного розміру та вмісту кисню в детонаційній суміші газів.

3. Сформульовано умови управління процесами горіння металевих частинок і рекомендації по створенню обладнання для напылення композиційних покриттів металевими порошками.

4. Розглянуто перспективні напрямки дослідження процесів горіння частинок металів і сплавів при детонаційно-газовому і газополум'яних методах напылення.

Литература

1. Газотермические покрытия из порошковых материалов / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.Н. Ардатовская: Справочник. — Киев: Наук. думка, 1987. — 544 с.
2. Плазменные алюмокерамические покрытия / Ю.С. Борисов, В.Ф. Гольник, З.Г. Ипатова и др. // Автоматическая сварка, 2006. № 7. — С. 26–30.
3. Алюмокерамика защищает черные металлы / С.В. Петров, А.Г. Сааков, А.А. Сиротинский, В.А. Ковеленов // Металлы. — 2000. — № 9. — С. 34–36.
4. Петров С.В., Коржик В.Н. Установка Plazer 15-SA для дугового сверхзвукового напыления // Сварщик, 2011. № 1. — С. 17–21.
5. Новиков Н.Н. Разработка металлизированных порошков тугоплавких окислов и карбидов для плазменного напыления и исследование свойств покрытий на их основе. Автореф. ... канд.тех.наук, Л., 1983. — 24 с.
6. Сиротинский А.А., Петров С.В., Сааков А.Г. Новое антикоррозионное алюмокерамическое покрытие на основе плазменного нанесения. // Новости теплоснабжения, 2001, №1 2, с. 40–41.
7. Петров С.В., Сааков А.Г. Плазма продуктов сгорания в инженерии поверхности. Киев: ТОПАС, 2000, — 218 с.
8. Hale D.L., Swank W.D., Haggard F.A. In-flight particle measurements of twin wire electric arc sprayed aluminum. Journal of Thermal Spray Technology. Vol. 7(1) March 1998, p. 59–63.
9. Donna Post Guillen, Brian G. Williams. Oxidation Behavior of In-Flight Molten Aluminum Droplets in the Twin-Wire Electric Arc Thermal Spray Process // 2005 International Thermal Spray Conference. <https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/3169832.pdf>
10. Структура и свойства алюминиевых покрытий, нанесенных методом холодного газодинамического напыления //Л.И. Тушинский, А.П. Алхимов, В.Ф. Косарев, А.В. Плохов, Н.С. Мочалина // Теплофизика и аэромеханика, 2006, т. 13, № 1. — С. 141–145.

11. Сандарам Д., Янг В., Зарко В.Е. Горение наночастиц алюминия (обзор) // Физика горения и взрыва, 2015, т. 51, № 2. — С. 37–63.
12. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. — М.: Металлургия, 1992. — 432 с.
13. Борисов Ю.С., Борисова А.Л. Плазменные порошковые покрытия. — Киев: Техніка, 1986. — 223 с.
14. Иванов Е.М. Влияние процессов химической кинетики на нагрев частиц при плазменном напылении. Теория и практика газотермического нанесения покрытий. Т. 1 (Тез. докл. X Всес. совещ., июнь 1985 г.). — Дмитров, 1985. — С.85–87.
15. Тизилов А.С. Методы и средства управления процессами горения в потоке аэрозвеси частиц алюминия. Диссерт. ... к.т.н. — Тольятти, 2017. — 166 с.
16. Малинин В.И. Внутрикамерные процессы в установках на порошкообразных металлических горючих [Текст] / В.И. Малинин // Пермь: УрО РАН. 2006. — 243 с.
17. Крюков А.Ю. Адаптация внутрикамерных процессов и элементов конструкции энергоустановок на порошковом горючем к технологиям получения ультра-и нанодисперсных материалов [Текст] / А.Ю. Крюков // Пермь: ПГТУ, 2004. 175 с.
18. Харламов Ю.А. Развитие детонационно-газовых технологий // Вісник Східноукр. нац. університету імені В. Даля, № 7 (237), 2017, с. 114–132.
19. Харламов Ю.А., Будагянц Н.А. Детонационно-газовые процессы в промышленности. — Луганск: изд-во Восточноукр. гос. ун-та, 1998. — 223 с.
20. Кузнецов Г.П., Колесников-Свинарев В.И., Ассовский И.Г. О горении алюминия, бора и их композиций в кислородсодержащих средах // Горение и взрыв, 2017. Т. 10. № 2. С. 111–114.
21. Колесников-Свинарев В.И., Ассовский И.Г., Кузнецов Г.П. Горение алюминия в двуокиси углерода. Влияние давления и размера частиц на продукты горения // Горение и взрыв, 2009, вып. 2. — С.52–54.
22. Ассовский И.Г., Колесников-Свинарев В.И., Кузнецов Г.П. Образование нанокмпозитов при горении алюминия и двуокиси углерода // Нанокмпозиты: исследования, производство и применение / Под ред. А.А. Берлина, И.Г. Ассовского. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2004. С. 113–116.

References

1. Gazotermicheskie pokrytija iz poroshkovyh materialov / Ju.S. Borisov, Ju.A. Harlamov, S.L. Sidorenko, E.N. Ardatovskaja: Spravochnik. — Kiev: Nauk. dumka, 1987. — 544 s.
2. Plazmennye aljumeramicheskie pokrytija / Ju.S. Borisov, V.F. Gol'nik, Z.G. Ipatova i dr. // Avtomaticheskaja svarka, 2006. № 7. — S. 26–30.
3. Aljumeramika zashchishhaet chernye metally / S.V. Petrov, A.G. Saakov, A.A. Sirotinskij, V.A. Kovelenov // Metally. — 2000. — № 9. — S. 34–36.
4. Petrov S.V., Korzhik V.N. Ustanovka Plazer 15-SA dlja dugovogo sverhzhukovogo napylenija // Svarshhik, 2011. № 1. — S. 17–21.
5. Novikov N.N. Razrabotka metallizirovannyh poroshkov tugoplavkih okislov i karbidov dlja plazmennogo napylenija i issledovanie svojstv pokrytij na ih osnove. Avtoref. ... kand.teh.nauk, L., 1983. — 24 s.
6. Sirotinskij A.A., Petrov S.V., Saakov A.G. Novoe antikorrozionnoe aljumeramicheskoe pokrytie na

- osnove plazmennogo nanesenija. / Novosti teplosnabzhenija, 2001, № 12, s. 40 – 41.
7. Petrov S.V., Saakov A.G. Plazma produktov sgoranija v inzhenerii poverhnosti. Kiev: TOPAS, 2000, – 218 s.
 8. Hale D.L., Swank W.D., Haggard F.A. In-flight particle measurements of twin wire electric arc sprayed aluminum. Journal of Thermal Spray Technology. Vol. 7(1) March 1998, p. 59 – 63.
 9. Donna Post Guillen, Brian G. Williams. Oxidation Behavior of In-Flight Molten Aluminum Droplets in the Twin-Wire Electric Arc Thermal Spray Process // 2005 International Thermal Spray Conference. <https://indigitalibrary.inl.gov/sites/sti/sti/3169832.pdf>
 10. Struktura i svojstva aluminievych pokrytij, nanesennyh metodom holodnogo gazodinamicheskogo napylenija / L.I. Tushinskij, A.P. Alhimov, V.F. Kosarev, A.V. Plohov, N.S. Mochalina // Teplofizika i aeromehanika, 2006, t. 13, № 1. – S. 141 – 145.
 11. Sandaram D., Jang V., Zarko V.E. Gorenje nanochastic aluminija (obzor) // Fizika gorenija i vzryva, 2015, t. 51, № 2. – S. 37 – 63.
 12. Kudinov V.V., Bobrov G.V. Nanesenie pokrytii napyleniem. Teoriia, tekhnologija i oborudovanie. – M.: Metallurgija, 1992. – 432 s.
 13. Borisov Ju.S., Borisova A.L. Plazmennye poroshkovye pokrytija. – Kiev: Tehnika, 1986. – 223 s.
 14. Ivanov E.M. Vlijanie processov himicheskoi kinetiki na nagrev chastic pri plazmennom napylenii. Teoriia i praktika gazotermicheskogo nanesenija pokrytij. T. 1 (Tez. dokl. X Vses. soveshh., ijun' 1985 g.). – Dmitrov, 1985. – S. 85 – 87.
 15. Tizilov A.S. Metody i sredstva upravlenija processami gorenija v potoke aerovzvesi chastic aluminija. Dissert. ... k.t.n. – Tol'jatti, 2017. – 166 s.
 16. Malinin V.I. Vnutrikamernye processy v ustanovkah na poroshkoobraznyh metallicheskih gorjuchih [Tekst] / V.I. Malinin // Perm': UrO RAN. 2006. – 243 s.
 17. Krjukov A.Ju. Adaptacija vnutrikamernykh processov i jelementov konstrukcii jenergoustanovok na poroshkovom gorjuchem k tehnologijam poluchenija ul'tra-i nanodispersnykh materialov [Tekst] / A.Ju. Krjukov // Perm': PGU, 2004. 175 s.
 18. Harlamov Ju.A. Razvitie detonacionno-gazovykh tehnologij // Visnik Shidnoukr. nac. universitetu imeni V. Dalja, № 7 (237), 2017, s. 114 – 132.
 19. Harlamov Ju.A., Budag'janc N.A. Detonacionno-gazovyje processy v promyshlennosti. – Lugansk: izd-vo Vostochnoukr. gos. un-ta, 1998. – 223 s.
 20. Kuznecov G.P., Kolesnikov-Svinarev V.I., Assovskij I.G. O gorenii aluminija, bora i ih kompozicij v kislorodsoderzhashchih sredah // Gorenje i vzryv, 2017. T. 10. № 2. S. 111 – 114.
 21. Kolesnikov-Svinarev V.I., Assovskij I.G., Kuznecov G.P. Gorenje aluminija v dvoukisi ugleroda. Vlijanie davlenija i razmera chastic na produkty gorenija // Gorenje i vzryv, 2009, vyp. 2. – S. 52 – 54.
 22. Assovskij I.G., Kolesnikov-Svinarev V.I., Kuznecov G.P. Obrazovanie nanokompozitov pri gorenii aluminija i dvoukisi ugleroda // Nanokompozity: issledovanija, proizvodstvo i primenenie / Pod red. A.A. Berlina, I.G. Assovskogo. – M.: TORUS PRESS, 2004. S. 113 – 116.

Харламов Ю.А., Романченко А.В., Мицык А.В.
О возможности использования горения металлических частиц при газотермическом напылении

Рассмотрены особенности получения композиционных покрытий, в том числе алюмокерамических, газотермическими методами напыления. Сопоставлены технологические характеристики современных методов напыления, показана положительная роль в формировании покрытий высокой скорости напыляемых частиц. Особый интерес для получения защитных и функциональных покрытий представляет алюминий, самый распространенный металл на Земле. Работа посвящена анализу возможностей получения металлооксидных покрытий методами газотермического напыления порошками чистых металлов в режиме горения и экспериментальная проверка получения алюмокерамических покрытий методом детонационно-газового напыления порошками алюминия. Показана возможность использования горения металлов при газотермическом напылении для получения металлооксидных и оксидных покрытий. Сопоставлены значения параметров, определяющих склонность к образованию покрытий, а именно, температуры плавления, плотности, параметра трудности плавления и коэффициента аккумуляции тепла для некоторых металлов и их оксидов. Проведены эксперименты по детонационно-газовому напылению покрытий порошками алюминия. Показана возможность получения композиционных покрытий алюминий-оксид алюминия. Установлено, что свойства получаемых покрытий определяются относительным содержанием в покрытиях оксидов алюминия, зависящего от степени окисления частиц алюминия, их исходного размера и содержания кислорода в детонирующей смеси газов. Разработаны рекомендации по созданию специализированного оборудования, а также рассмотрены перспективные направления исследования процессов горения частиц металлов и сплавов при детонационно-газовом и газопламенных методах напыления.

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. Сєвєродонецьк) yuriy.kharlamov@gmail.com

Романченко Олексій Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк) alexvromanchenko@gmail.com

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

Стаття подана 18.02.2020 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-120-128>

УДК 621.793

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТОНАЦІЙНО-ГАЗОВИХ ПОКРИТТІВ МЕТОДОМ МІКРОІНДЕНТУВАННЯ

Харламов Ю.О., Міщик А.В., Романченко О.В.

THE STUDY OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF D-GUN SPRAYED COATINGS BY MICROINDENTATION TEST

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 чутливим 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. Для вимірювання механічних властивостей (твердості, модуля пружності, міцності та ін.) матеріалів і покриттів останнім часом отримує застосування метод вимірювального індентування, основи якого були розроблені в 1960–70 рр. М.Х. Шоршоровим, В.П. Алехіним, С.І. Буличовим в Інституті металургії ім. О.О. Байкова АН СРСР (відомого як метод «кінетичної твердості») [1–5]. Широке поширення у світі метод отримав після публікації роботи [5], в якій була запропонована найбільш узгоджена модель аналізу експериментальних залежностей. Розвиток методу випробування безпе-

рервним вдавненням індентора якісно часто порівнюють з розвитком випробування на розтягнення, коли був зроблений перехід від простого випробування на розрив до реєстрації безперервної діаграми «напруження-деформація» (рис. 1, а). По суті, діаграма «навантаження-розвантаження» (рис. 1, б) являє собою роботу, витрачену індентором на подолання опору матеріалу (площа під гілкою навантаження S_1), і роботу, витрачену матеріалом на відновлення своїх властивостей (площа під гілкою розвантаження S_2).

При звичайних випробуваннях мікротвердість знаходиться як відношення навантаження (прикладене до індентора) до площі відбитка після випробувань. Це призводить до втрати інформації про механічну поведінку матеріалу в процесі випробувань. При цих випробуваннях реєструється залежність переміщення алмазного індентора від навантаження, як при зростанні навантаження, так і при його зниженні [1]. Переміщення індентора вимірюється з надвисокою точністю, що дозволяє проводити випробування при малих навантаженнях і невеликих глибинах відбитка. В результаті відпадає необхідність в трудомісткому ненадійному вимірі розмірів відбитка, отриманого при малих навантаженнях на індентор. Твердість, виміряна по невідновленому відбитку з реєстрацією його глибини під навантаженням («невідновлена» твердість), не дорівнює твердості, яка вимірюється по відновленому (розвантаженому) відбитку за допомогою мікроскопа («відновлена» твердість). Твердість розраховується по першій гілці діаграми – залежності глибини проникнення індентора від навантаження, а оскільки процес розвантаження індентора є пружним, по кривих розвантаження визначається модуль пружності.

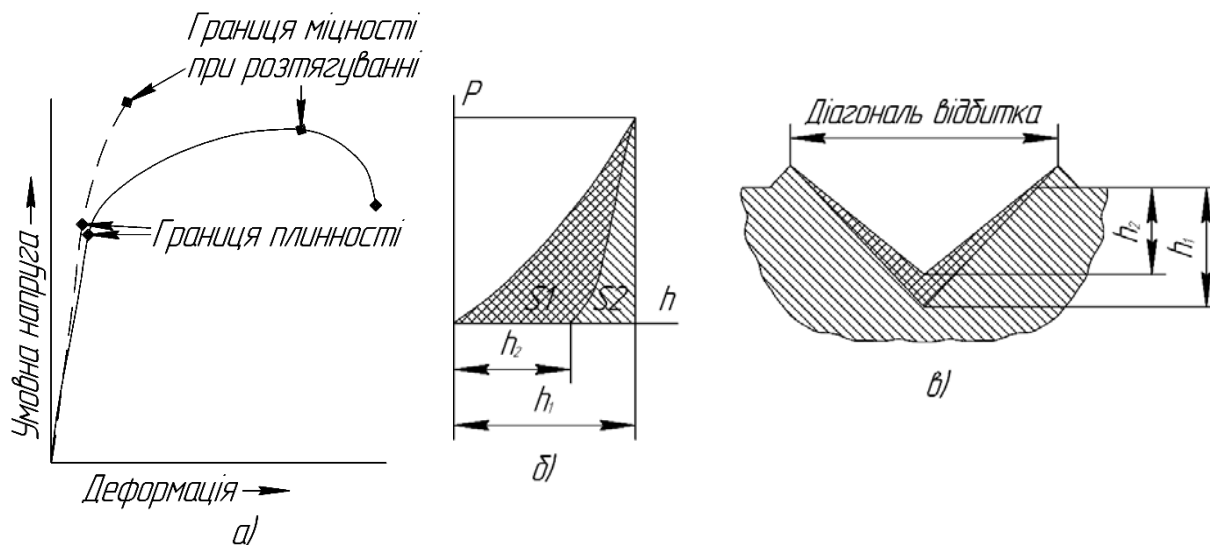


Рис. 1. Діаграма «напруга – деформація» при випробуванні на границю міцності (а) і діаграма «навантаження – розвантаження» (б) при індентуванні; в – профіль відбитка індентора в матеріалі

Сучасний аналіз діаграми проникнення індентора заснований на вирішенні задачі Снеддона про пружний контакт індентора з плоскою поверхнею, яке пов'язує навантаження, пружне переміщення індентора і площу контакту будь-якого штампа, який може бути описаний як тіло обертання [1]. За глибиною контакту можна знайти площу проекції відбитка A . Для ідеально гострого індентора Берковича $A = 24,5(h_c)^2$. Модуль пружності $E = \sqrt{\pi} (dP/dh) / (2\sqrt{24,5h_c^2})$ й твердість по глибині відбитка під максимальним навантаженням $H = P_{\max} / A$.

Метою роботи є експериментальне вивчення механічних характеристик детонаційно-газових покриттів на основі карбідів вольфраму і хрому методом мікротвердості з реєстрацією процесу вдавлювання наконечника у вигляді діаграми «навантаження на індентор – глибина його занурення».

Експериментальне дослідження механічних властивостей детонаційно-газових покриттів. Вивчали фізико-механічні властивості покриттів, що отримуються зі стандартної механічної суміші порошків сплаву ВК8 (WC + 8 % Co). Типові діаграми вдавлювання для напилених зразків, а також спеченого твердого сплаву ВК8 наведені на рис. 2. Вимірювання кінетичної мікротвердості на кожному зразку проводили не менше шести разів. Залежність середніх значень мікротвердості при різних глибинах відбитка для різних зразків наведена на рис. 3. При оптимальних режимах напилування мікротвердість покриттів близька до мікротвердості спечених твердих сплавів такого ж складу. Зміна характеру й інтенсивності фазових перетворень порошків при різних технологічних режимах призводить і до зміни механічних властивостей отриманих покриттів. На зразках для вимірювання мікротвердості були виконані рентгенографічні дослідження фазового складу пок-

риттів. Дані про фазовий склад покриттів наведені в табл. 1. Якісно фазовий склад покриттів відрізняється незначно, водночас середні значення мікротвердості зразків коливаються від 10418 до 22495 МН/м² через різний склад в покриттях фаз, що мають різні властивості.

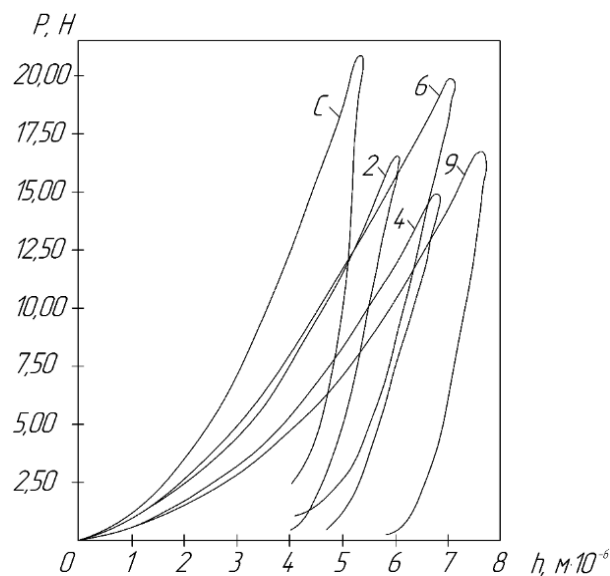


Рис. 2. Діаграми вдавлювання пірамідального індентора в детонаційно – газові покриття з порошку ВК8 і спечений твердий сплав такого ж складу (С). Умови нанесення покриттів наведені в табл. 1

З аналізу гілок навантаження на діаграмах мікромеханічних випробувань випливають важливі висновки:

- 1) Гілки навантаження для твердого сплаву, отриманого спіканням, крутіші, ніж для напилування покриттів. Отже, в покриттях містяться фази з меншою твердістю;
- 2) Твердість покриттів значною мірою залежить від складу детонуючої ацетилено-кисневої суміші,

що видно із зіставлення діаграм проникнення 2,6 (витрата C_2H_2 – 183 $cm^3/цикл$) і 4,9 (витрата C_2H_2 – 163 $cm^3/цикл$);

3) Помітно вплив витрати порошку, що підлягає контролю за товщині одиначної плями напilenня Δt_0 , і дистанції напilenня.

При збільшенні дистанції напilenня зі 120 до 150 мм і товщини одиначної плями напilenня з 7 до 13,7 мкм (зразки 2 і 6 відповідно) твердість покриттів дещо зростає, про що свідчить також більш крутий нахил гілки навантаження. Збільшення дистанції напilenня зі 150 до 180 мм і зниження товщини одиначної плями напilenня з 13 до 6,8 мкм призвело до зменшення твердості покриттів і крутості гілок навантаження на діаграмах 4 і 9 відповідно. Мабуть, існують оптимальні значення витрати порошку, при яких пригнічується інтенсивність небажаних фазових перетворень в вихідному порошку.

При оптимальних режимах напilenня (рис 3, крива 6) характер залежності середніх значень мікротвердості від глибини проникнення пірамідального індентора близький до аналогічної залежності для спеченого твердого сплаву (крива С). При цьому спостерігаються такі закономірності:

1) Є певна відповідність між співвідношенням параметрів кривих значень мікротвердості від глибини відбитка і співвідношенням параметрів гілок навантаження для однойменних зразків;

2) Зі зміною глибини відбитка для зразка з великими значеннями мікротвердості спостерігається більший перепад її значень на кривій;

3) Мікротвердість зразків зі спеченого твердого сплаву практично при всіх значеннях глибини відбитка вище, ніж у всіх напilenних зразків, за винятком зразка, відповідного кривій 6;

4) Величина і характер зміни значень мікротвердості зі збільшенням глибини відбитка залежать значною мірою від складу детонуючої суміші газів, витрати порошку і дистанції напilenня;

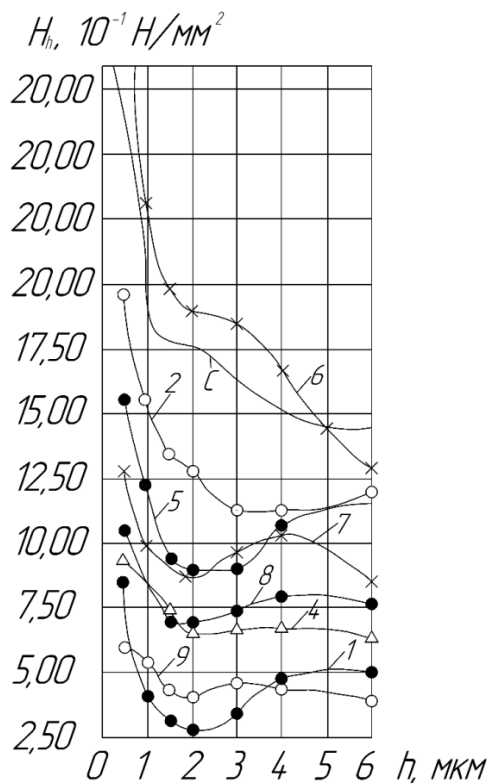


Рис. 3. Середні значення мікротвердості покриттів з порошку ВК8 і спеченого сплаву ВК8 (С) при різних глибинах відбитка.

Умови нанесення покриттів наведені в табл. 1

Таблиця 1

Властивості детонаційно-газових покриттів з порошку ВК8 при різних режимах напilenня

Режим	Витрата ацетилену, $cm^3/цикл$	Дистанція напilenня, мм	Число одиначних циклів напilenня	Товщина покриття, мм	Товщина одиначного шару покриття, мкм	Фазовий склад покриття за даними рентгеноструктурного аналізу	Модуль пружності, MH/m^2
1	200	120	30	0,5	16,7	W, W ₂ C, WC, Co ₃ W ₃ C	$1,99 \cdot 10^5$
2	183	120	80	0,56	7,0	W, W ₂ C, Co ₃ W ₃ C, WC	$3,0 \cdot 10^5$
3	179	120	50	0,42	8,4	W, W ₂ C, WC, Co ₇ W ₆	$3,2 \cdot 10^5$
4	163	150	80	1,04	13,0	W, W ₂ C, WC, Co ₇ W ₆	$2,2 \cdot 10^5$
5	179	150	50	0,71	14,2	W, WC, Co ₇ W ₆	$3,4 \cdot 10^5$
6	183	150	30	0,41	13,7	W, W ₂ C, WC, Co ₃ W ₃ C	$3,04 \cdot 10^5$
7	183	180	30	0,33	11,0	-----	$2,3 \cdot 10^5$
8	200	180	50	0,31	6,2	W ₂ C, Co ₃ W ₉ C ₄ , Co ₃ W ₃ C	$2,33 \cdot 10^5$
9	163	180	50	0,34	6,8	W ₂ C, WC, Co ₇ W ₆	$2,6 \cdot 10^5$

5) Для ряду зразків спостерігається характерна закономірність в наявності мінімуму на кривій мікротвердості при значеннях глибини відбитка 1,75 – 3,5 мкм.

На рис. 4 представлені графічні залежності, що характеризують зміну величини коефіцієнта варіації значень мікротвердості зі збільшенням глибини відбитка для зразків зі спеченого твердого сплаву і напилених покриттів. Коефіцієнт варіації визначали за формулою $\varepsilon_h = S_h / \bar{H}_h$, де S_h – середньоквадратичне відхилення значень мікротвердості при глибині впровадження індентора h ; $\bar{H}_h$ – середнє значення мікротвердості при даній глибині впровадження індентора h . Найбільших значень величина коефіцієнта варіації досягає при невеликій глибині відбитка. Частково це може бути пояснено похибками вимірювань, пов'язаними з мікрогеометрією поверхні оброблених покриттів. Найбільш стабільні результати вимірювань (низькі значення коефіцієнта) отримані для зразків, що показали високі значення мікротвердості (6,3 і С). Це свідчить про вищу однорідність їх механічних властивостей.

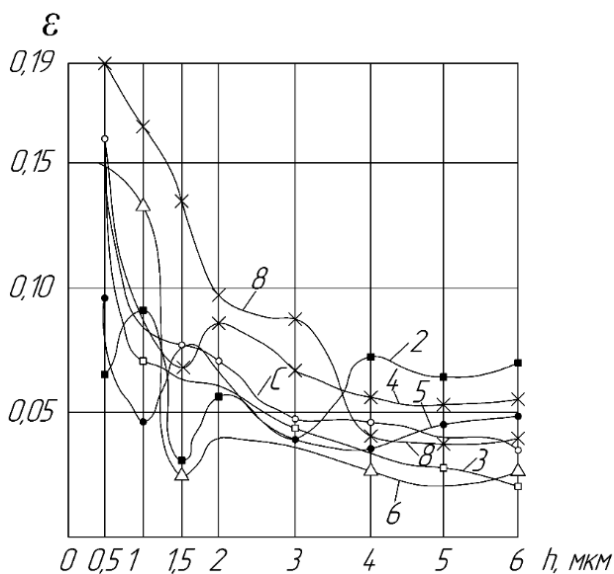


Рис. 4. Залежність коефіцієнта варіації мікротвердості покриттів з порошку ВК8 і спеченого сплаву ВК8 (С).
Умови нанесення покриттів наведені в табл. 1

Закономірність зниження твердості тугоплавких сполук зі збільшенням навантаження, особливо при значних 0 – 3 Н, є спільною [6]. Підвищений розкид значень мікротвердості покриттів в області малих навантажень може бути пояснений рухливістю кристалів поверхневого шару. Кристали поверхневого шару лише односторонньо пов'язані з сусідніми зернами та при деформації зразка в пружній області можуть плавно- або стрибкоподібно повертатися на кути в десятки хвилин і помітно зміщуватися. Істотне зростання величини мікротвердості зі зменшенням розміру відбитка може бути пояснено вищою

швидкістю і ступенем деформаційного зміцнення у зв'язку з полегшеними умовами зародження і руху дислокацій поблизу поверхонь.

Збільшення твердості при малих значеннях глибини проникнення індентора (а тим самим при малих навантаженнях) для покриттів на основі тугоплавких карбідів в залежності від глибини відбитка при проникненні індентора таке ж, як і для багатьох крихких тугоплавких сполук і твердих сплавів. Для карбіду вольфраму і його сплавів з вмістом Со 4 – 20 ваг. % при силі менш ніж 3 Н твердість істотно підвищується [7]. Однією з основних моделей пояснення факту підвищення «невідновленої» мікротвердості в області малих сил (відхилення від закону механічної подоби Кирпичова – Кіка) є уявлення про те, що загальна формозміна при вдавлюванні реалізується в основному внаслідок пружної деформації, що діє на відносно великих відстанях, і меншою мірою – внаслідок пластичної деформації, що протікає дислокаційним шляхом і локалізованою у вузькій області. Збільшення HV при малих силах пояснюють або збільшенням внеску роботи пружної деформації матеріалу, або впливом масштабного фактора, що визначається структурою [7 – 9]. Масштабний фактор, можливо, проявляється в тому, що в малокальтових сплавах велику кількість контактів WC-WC підвищує ефект «каркаса» сітки дислокацій під індентором.

Метод кінетичної мікротвердості може бути використаний для оцінки фазового складу покриттів. У табл. 2 наведені відомості про властивості та склад фазових складових вивчених покриттів [6, 10 – 13]. Оцінювальні розрахунки показують, що в покритті з порошку ВК8 зміст подвійного карбіду вольфраму $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ (фаза η_1) не може перевищувати 40 – 50 % ваги.

Для зразка, відповідного кривій 1 (рис. 3), характерний переважний вміст фази η_1 ($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$). Зразкам, представленим кривими 2 і 3, відповідає переважний вміст фаз W_2C і WC. Для зразка, відповідного кривій 4, характерний переважний вміст фази W_2C . Найкращі умови для збереження вихідного складу і властивості сплаву ВК8 досягаються при витраті ацетилену 179 – 183 $\text{см}^3/\text{цикл}$ і дистанції напилювання 120 – 150 мм. При збільшенні витрати ацетилену до 200 $\text{см}^3/\text{цикл}$ значення мікротвердості і модуля пружності покриття знижуються. Однак у випробуваних зразках, напилених при цьому витраті ацетилену, змінилися умови напилення. У зразку, відповідному кривій 1, було збільшено витрати порошку так, що середня товщина одиничного шару покриття склала 16,7 мкм. Це пов'язано зі зміною інтенсивності протікання фазових перетворень в вихідному порошку ВК8 при збільшенні його витрати. При напиленні зразка, відповідного кривій 8, дистанція напилювання була збільшена до 180 мм. При зменшенні витрати ацетилену до 163 $\text{см}^3/\text{цикл}$ і дистанції напилювання 180 мм покриття також мають низьку твердість. У цьому випадку збільшення трива-

лості перебування частинок порошку в гарячих продуктах детонації інтенсифікують протікання фазового перетворення $WC \rightarrow W_2C \rightarrow W$

Наявність мінімуму на кривих «мікротвердість – глибина» при глибині від 1,75 до 3,5 може бути викликано наступними причинами: впливом поверхневих дефектів в покритті, що утворюються між поодинокими шарами покриття, що формуються при кожному циклі напилювання; неоднорідним фазовим складом покриття по товщині одиничних шарів, пов'язаних як з розшаруванням механічної суміші порошку в процесі напилення, так і з відмінностями в термічному циклі частинок порошку, які формують єдиний шар, що знаходиться на внутрішній і зовнішній поверхневій границі шару; закономірним розподілом мікропор по товщині одиничного шару.

Однак найбільш прийнятним поясненням закономірності, що спостерігається, залежності мікротвердості від глибини відбитка є особливості процесів деформації порошкових і композиційних матеріалів [14]. Визначальним фактором при пластичній деформації таких матеріалів є наявність розривів властивостей по границях складових матеріал елементів. Пластичні зсуви в таких матеріалах розвиваються шляхом зміщення по поверхнях ковзання, що проходять переважно по слабких границях, що задає злами на поверхнях зсуву. Серед границь, властивих детонаційно-газовим покриттям, границі між поодинокими шарами покриття є одним зі слабких, причому їх міцність багато в чому залежить від осо-

бливостей технології та обладнання, що використовується.

Шляхом аналізу та статистичної обробки гілок розвантаження діаграм проникнення визначені модулі пружності покриттів. Для покриттів з великими значеннями мікротвердості характерні й великі значення модуля пружності. Для кривих 1, 4, 7, 8 і 9, розташованих в нижній частині рис. 2, характерні значення модулів пружності порядку $2 \cdot 10^5$ МН/м², для кривих 2, 5 і 6, розташованих у верхній частині рис. 2 значення E порядку $3 \cdot 10^5$ МН/м². Для цих же зразків характерні й великі значення твердості по Віккерсу – $(13,5 \dots 15,4) \cdot 10^3$ МН/м². Для покриттів, відповідних кривих в нижній частині рис. 2 характерні значення твердості по Віккерсу порядку $(7,6 \dots 12,48) \cdot 10^3$ МН/м². Слід мати на увазі, що технологічні режими нанесення покриттів можуть самі по собі впливати на рівень твердості та модуля пружності. Це пов'язано з впливом пористості, міцності міжчасткових контактів, рівномірності структури, форми й розташування пір і включень. Зокрема, спостерігається певний вплив складу горючої суміші. При збільшенні вмісту ацетилену модуль пружності, як правило, знижується. При детонації ацетилен – кисневих сумішей можливе утворення вільного вуглецю (сажі), включення якого є однією з причин зниження твердості й модуля пружності покриттів (криві 1 і 2 при витраті ацетилену відповідно

Таблиця 2

Склад і механічні властивості фазових складових покриттів на основі карбідів вольфраму і хрому

Метал або сполука	Хімічний склад					Температура, °C		Густина, 10^{-3} кг/м ³	Твердість, НВ Н/мм ²	Мікротвердість, H_{μ} Н/мм ²	Модуль пружності, E , ГН/м ²
	W	C	Co	Cr	Ni	початок утворення	розкладання фаз				
WC	Ост.	6,13	–	–	–			15,67	–	17000 – 18000	720
W ₂ C	Ост.	3,16	–	–	–			17,18	–	19900	420
Co ₃ W ₃ C	Ост.	1,4	18,0	–	–	750	1700	–	12000	–	–
	Ост.	1,5	21,0								
Co ₃ W ₉ C ₄	Ост.	1,9	10,0	–	–	1350	1870	–	15000	–	–
W	100	–	–	–	–			19,35	НВ 3500 – 4000	–	350 – 380
Co								8,9	НВ 1240	–	207,5
Cr ₂₃ C ₆								6,97	–	1000	–
Cr ₇ C ₃								6,92	–	16000	–
Cr ₃ C ₂								6,68	–	13000	–
Cr								7,19	7500	–	295
Ni								8,9	НВ 600 – 800	–	205

200 і 183 см³/цикл). Крім того, перший зразок напильовався з вищою витратою порошку, що призводило до більш повільного охолодження одиничного шару покриття і відповідної інтенсифікації фазових перетворень. Істотно відрізняється і характер кривих 1 і 2. Перша з них має яскраво виражений мінімум при глибині проникнення індентора 2 мкм, що можна пояснити, як збільшенням загальної пористості покриття, так і зниженням міцності міжшарових зв'язків між поодинокими шарами покриття. Зниження міжшарової міцності між поодинокими плямами напильнення посилюється при використанні дрібнодисперсних порошоків з розміром частинок до 5 мкм. Зі збільшенням одиничної дози порошку ймовірність осідання частинок порошку на поверхні поодиноких плям напильнення зростає, що ускладнює утворення міцних зв'язків між окремими одиничними шарами.

В цілому модуль пружності є більш структурно чутливою характеристикою. Якщо залежності мікротвердості від глибини проникнення для покриттів (крива 6) і різальної пластинки зі спеченого сплаву ВК8 відрізняються мало, то відмінності в значеннях модуля пружності більш суттєві, для покриття $E = 3,04 \cdot 10^5$ МН/м², а для спеченої пластинки модуль пружності за результатами вимірювань кінетичної мікротвердості $E = 5,03 \cdot 10^5$ МН/м². Це пов'язано з пористістю й іншими особливостями структури напильних покриттів. Вплив вмісту ацетилену на структуру покриттів більш наочно проявляється з порівняння кривих 8 і 9 на рис. 2. Зростання вмісту C₂H₂ збільшує твердість покриттів, однак модуль пружності знижується.

На рис. 5 представлені діаграми вдавнення індентора в покриття зі сфероїдизованих порошоків карбідів хрому з нікелем КХН-15С (крива 1), механічної суміші порошоків WC + 15 % Co (BK15, крива 2) і сфероїдизованого порошку WC + 18 % Co (BK18C, крива 3). Зіставлення їх з аналогічними даними рис. 2 показує, що гілки навантаження для цих покриттів менш круті. Твердість їх, особливо при малих навантаженнях, значно нижче. Збільшення твердості випробовуваного матеріалу призводить до закономірного збільшення темпу зростання мікротвердості при зменшенні розміру відбитка [15]. Це підтверджується й експериментальними даними рис. 2. В останньому випадку покриття містять більше металевої зв'язки, що знижує загальну твердість покриття, а також збільшує ймовірність початкового контактування індентора з металевою складовою сплаву. Подібне явище спостерігалось при мікроіндентуванні твердих сплавів системи WC – Co [7]. Для твердого розчину на основі кобальту і висококобальтового сплаву BK50 твердість не залежить від сили в діапазоні 1 ... 12,5 Н. Для карбиду вольфраму і малокобальтових сплавів (вміст кобальту 4 ... 20 ваг. %) відбувається відхилення, при силі менше ніж 3 Н твердість істотно підвищується.

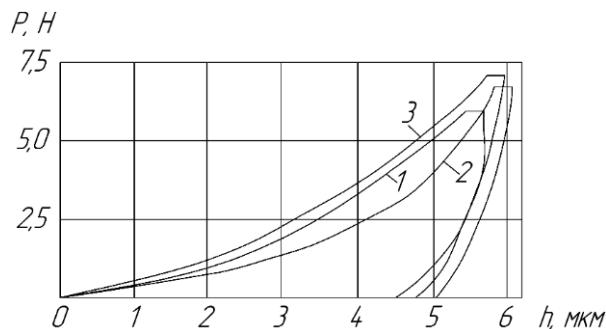


Рис. 5. Діаграми вдавнення пірамідального індентора в покриття з порошоків: сфероїдизованого карбиду хрому з нікелем КХН-15С (1); механічної суміші карбиду вольфраму з кобальтом BK15 (2); сфероїдизованого карбиду вольфраму з кобальтом BK18C (3)

На рис. 6, а представлені залежності мікротвердості покриттів з порошку BK15 в центрі та на периферії плями напильнення від глибини проникнення індентора. Твердість покриттів на периферії плями трохи вище, що можна пояснити менш інтенсивним перетворенням WC $\rightarrow$ W₂C $\rightarrow$ W в процесі охолодження одиничного шару покриття. У центрі плями напильнення товщина одиничного шару вище, а на периферії плями швидше охолодження покриття пов'язане з його меншою товщиною, але і можливістю відводу тепла в глиб і уздовж поверхні підкладки. Причому, мабуть, в покритті міститься значна кількість W. Неоднорідність структури покриття значно вище, ніж покриттів з порошку BK8.

Коефіцієнт варіації мікротвердості приблизно у два рази вище, ніж у покриттів з порошку BK8. Якщо виходити зі складу вихідного порошку, то слід було б очікувати зі збільшенням вмісту Co зростання однорідності структури, а тим самим мікротвердості покриттів, особливо в області великих навантажень. Однак слід врахувати відмінності в технології отримання покриттів. Покриття з порошку BK8 наносилися на установці з коротким стволом змінного перерізу і системою подачі порошку, що забезпечує його рівномірний розподіл по поперечному перерізу на обмеженій по довжині ділянці ствола. Решта покриття наносилися на установці з циліндричним стволом, рівномірного розподілу порошку по перерізу ствола не забезпечувалося. Крім того, порошок вводився безперервно по відкритій трубці, тому частина його зазнавала впливу гарячих продуктів згоряння до надходження в ствол.

На рис. 6, б представлені залежності мікротвердості покриттів зі сфероїдизованого порошку карбиду вольфраму з кобальтом BK18C (WC – Co 18 %) з розміром частинок близько 50 мкм. В цьому випадку перетворення WC $\rightarrow$ W₂C $\rightarrow$ W протікає менш інтенсивно. Спостерігаються відмінності у твердості покриттів в центрі й на периферії плями напильнення. У центрі плями напильнення яскраво виражений мінімум значення мікротвердості при глибині проникнення індентора 1,5 мкм. Вища концентрація порошку в центрі детонаційно – газового струменя призводить до більш повільного остигання центральної

зони одиничного шару й інтенсифікації взаємодії її з навколишнім газовим середовищем, а тим самим окислення і перетворення $WC \rightarrow W_2C \rightarrow W$. Тому в межах товщини одиничного шару можливе утворення ослабленої поверхневої зони, яка визначає надалі структуру граничної зони між поодинокими шарами. Крім того, вища концентрація порошку в центрі струменя сприяє зростанню пористості формованого покриття. Це підтверджується і вищими значеннями коефіцієнта варіації мікротвердості при глибині проникнення 1,5 мкм.

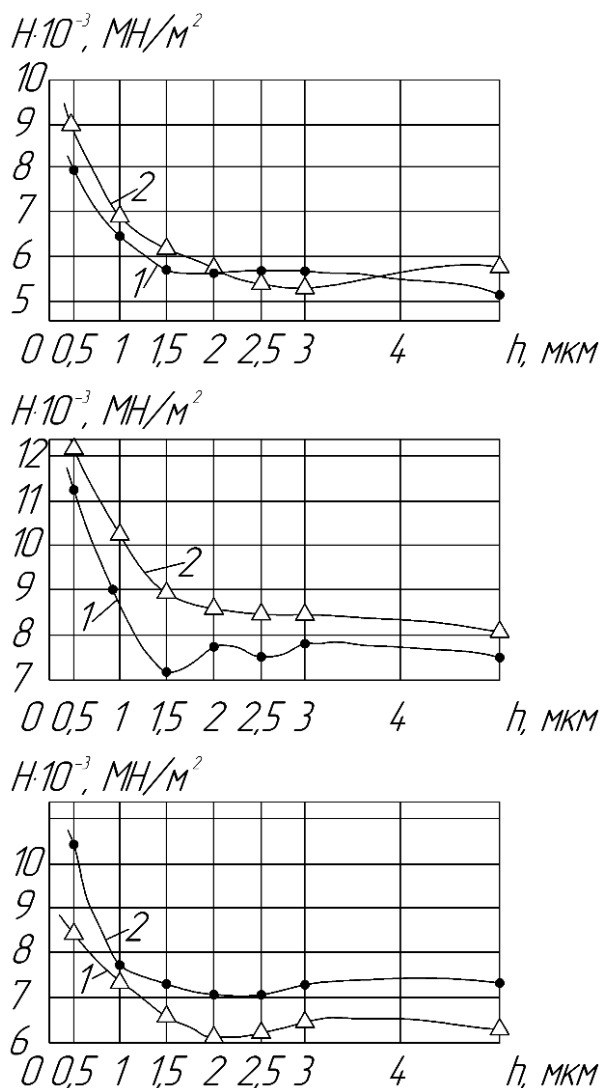


Рис. 6. Залежності мікротвердості покриттів від глибини проникнення індентора в центрі плями напilenня (1) і на периферії плями (2). Порошок: а – механічна суміш карбиду вольфраму з кобальтом ВК15; б – сфероїдизований карбід вольфраму з кобальтом ВК18С; в – сфероїдизований карбід хрому з нікелем КХН-15С

На рис. 6, в представлені аналогічні залежності мікротвердості покриттів зі сфероїдизованого порошку КХН15С. У цьому випадку залежність твердості від глибини проникнення індентора менш виражена, особливо в центрі плями напilenня. Це ціл-

ком узгоджується з раніше описаними залежностями твердості матеріалів в області малих навантажень. Твердість карбідів хрому значно нижче, ніж карбідів вольфраму (табл. 2). Характерний також ширший прогин кривої мікротвердості в діапазоні глибин проникнення 1,5 – 3 мкм, що можна пояснити зниженою твердістю карбідів хрому, вищою пористістю покриттів, а також підвищеною крихкістю. У більшості випадків навколо відбитків утворюються тріщини.

Висновки. 1. Механічні випробування безперервним вдавненням індентора є зручним експрес-методом визначення мікротвердості та модуля пружності Юнга (*T. Young*) твердих покриттів на основі тугоплавких карбідів, одержуваних детонаційно-газовим і іншими способами газотермічного напilenня.

2. При оптимальних режимах детонаційно-газового напilenня дрібнодисперсними порошками сплаву WC – Co механічні властивості одержуваних покриттів близькі до спечених сплавів такого ж складу. На мікротвердість покриттів істотний вплив роблять склад детонуючої ацетилен-кисневої суміші, дистанція напilenня і витрата порошку за одиничний цикл напilenня. Для покриттів, отриманих на оптимальних режимах, характерна вища однорідність механічних властивостей, тобто низькі значення коефіцієнта варіації.

3. Оскільки модуль пружності є більш структурно чутливою характеристикою, випробування на кінетичну мікротвердість дозволяють отримати більш вірогідні дані про вплив технологічних параметрів на фазові перетворення та структуру одержуваних покриттів.

Література

1. Хохлова Ю.А., Ищенко Д.А., Хохлов М.А. Индентирование от макро- до нанометрового уровня и примеры исследования свойств материалов с особой структурой // Техн. диагностика и неразруш. контроль, 2017, № 1. – С. 30 – 36.
2. Гоголинский К.В., Сясько В.А. Методы и средства контроля механических свойств микро- и нанометровых покрытий и модифицированных приповерхностных слоев // В мире неразрушающего контроля, 2013, № 3(61). – С.43 – 48.
3. Керамические материалы на основе диоксида циркония / А.О. Жигачев, Ю.И. Головин, А.В. Умрихин и др. – М.: Техносфера, 2018. – 357 с.
4. Булычев С.И., Алехин В.П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
5. Oliver W.C., Pharr G.M. An Improved technique for determining the hardness and elastic modulus using load displacement sensing indentation experiments, // J Mater. Res., 1992, 7. – P. 1564 – 1583.
6. Андриевский Р.А., Ланин А.Г., Рымашевский Г.А. Прочность тугоплавких соединений. – М.: Металлургия, 1974. – 232 с.
7. Деформационные и упругие свойства твердых сплавов системы WC-Co при микро- и макроиндентировании / В.И. Туманов, Л.А. Конюхова, Н.Н. Герасечко и др. // Проблемы прочности, 1985, № 3. – С. 99 – 103.

8. Мотт Б.В. Испытание на твердость микровдавливани-ем / Пер. с англ. под ред. Е.С. Берковича. – М.: Металлургиздат, 1960. – 338 с.
9. Сопротивление ковалентных кристаллов микровдавливанию / О.Н. Григорьев, Ю.В. Мильман, В.Н. Скворцов и др. // Порошковая металлургия, 1977, № 8. – С. 72 – 80.
10. Самсонов Г.В., Витрянюк В.К., Чаплыгин Ф.И. Карбиды вольфрама. – К.: Наук. думка, 1974. – 175 с.
11. Бабич М.М. Неоднородность твердых сплавов по содержанию углерода и ее устранение. – К.: Наук. думка, 1975. – 175 с.
12. Третьяков В.И. Основы металловедения и технологии производства спеченных сплавов. – М.: Металлургия, 1976. – 528 с.
13. Гольдшмидт Х.Дж. Сплавы внедрения. Т. 1. – М.: Мир, 1971. – 424 с.
14. Кипарисов С.С., Перельман В.Е. Некоторые аспекты теории деформации порошковых и композиционных материалов как основа совершенствования процессов прессования и спекания // Прогрессивные технологические процессы в порошковой металлургии. – Минск: Вышэйшая школа, 1982. – С. 61 – 76.
15. Характер зависимости микротвердости от размера отпечатка и особенности деформирования материалов в условиях сосредоточенного нагружения поверхности / А.Н. Терновский, В.П. Алехин, М.Х. Шоршоров и др. // Новое в области испытаний на микротвердость. – М.: Наука, 1974. – С. 71 – 81.
11. Babich M.M. Neodnorodnost' tverdyh splavov po sodержaniju ugljroda i ee ustranenie. – K.: Nauk. dumka, 1975. – 175 s.
12. Tret'jakov V.I. Osnovy metallovedenija i tehnologii proizvodstva spechennyh splavov. – M.: Metallurgija, 1976. – 528 s.
13. Gol'dshmidt H.Dzh. Splavy vnedrenija. T. 1. – M.: Mir, 1971. – 424 s.
14. Kiparisov S.S., Perel'man V.E. Nekotorye aspekty teorii deformacii poroshkovykh i kompozicionnykh materialov kak osnova sovershenstvovanija processov pressovanija i spekanija // Progressivnye tehnologicheskie processy v poroshkovoju metallurgii. – Minsk: Vyshhejschaja shkola, 1982. – S. 61 – 76.
15. Harakter zavisimosti mikrotverdosti ot razmera otpechatka i osobennosti deformirovanija materialov v uslovijah sosredotochennogo nagruzhenija poverhnosti / A.N. Ternovskij, V.P. Alehin, M.H. Shorshorov i dr. // Novoe v oblasti ispytanij na mikrotverdst'. – M.: Nauka, 1974. – S. 71 – 81.

References

1. Hohlova Ju.A., Ishhenko D.A., Hohlov M.A. Indentirovanie ot makro- do nanometrovogo urovnja i primery issledovanija svojstv materialov s osoboj strukturoj // Tehn. diagnostika i nerazrush. kontrol', 2017, № 1. – S. 30 – 36.
2. Gogolinskij K.V., Sjas'ko V.A. Metody i sredstva kontrolja mehanicheskikh svojstv mikro- i nanometrovyyh pokrytij i modifitsirovannyh pripoverhnostnyh sloev // V mire nerazrushajushhego kontrolja, 2013, № 3(61). – S. 43 – 48.
3. Keramicheskie materialy na osnove dioksida cirkonija / A.O. Zhigachev, Ju.I. Golovin, A.V. Umrihin i dr. – M.: Tehnosfera, 2018. – 357 s.
4. Bulychev S.I., Alehin V.P. Ispytanie materialov nepreryvnyym vдавливаниєм indentora. – M.: Mashinostroenie, 1990. – 224 s.
5. Oliver W.C., Pharr G.M. An Improved technique for determining the hardness and elastic modulus using load displacement sensing indentation experiments, // J Mater. Res., 1992, 7. – P. 1564 – 1583.
6. Andrievskij R.A., Lanin A.G., Rymashevskij G.A. Prochnost' tugoplavkih soedinenij. – M.: Metallurgija, 1974. – 232 s.
7. Deformacionnye i uprugie svojstva tverdyh splavov sistemy WC-Co pri mikro- i makroindentirovanii / V.I. Tumanov, L.A. Konjuhova, N.N. Gerasechko i dr. // Problemy prochnosti, 1985, № 3. – S. 99 – 103.
8. Mott B.V. Ispytanie na tverdst' mikrovдавливаниєм / Пер. с англ. под ред. Е.С. Берковича. – М.: Metallurgizdat, 1960. – 338 s.
9. Soprotivlenie kovalentnyh kristallov mikrovдавливанию / O.N. Grigor'ev, Ju.V. Mil'man, V.N. Skvorcov i dr. // Poroshkovaja metallurgija, 1977, № 8. – S. 72 – 80.
10. Samsonov G.V., Vitranjuk V.K., Chaplygin F.I. Karbidy vol'frama. – K.: Nauk. dumka, 1974. – 175 s.

Харламов Ю.О., Мицык А.В., Романченко А.В. Исследование механических свойств детонационно-газовых покрытий методом микроиндентирования

Рассмотрены перспективы использования метода неразрушающих испытаний непрерывным вдавливанием индентора для определения механических свойств газотермических покрытий. Проведены испытания по оценке микротвердости и модуля упругости композиционных покрытий на основе карбидов вольфрама и хрома, полученных методом детонационно-газового напыления. Рассмотрены диаграммы внедрения для покрытий из порошков ВК8, ВК15, ВК118С, КХН15С. Показано, что при оптимальных режимах напыления микротвердость получаемых покрытий близка к микротвердости спеченных твердых сплавов такого же состава. Определены значения коэффициентов вариации значений микротвердости с увеличением глубины отпечатка для образцов из спеченного твердого сплава и напыленных покрытий. При оптимальных режимах напыления достигаются не только максимальные значения микротвердости и модуля упругости покрытий, но и более однородные структура и механические свойства покрытий. Более чувствительными к изменениям технологических параметров являются значения модуля упругости напыленных покрытий, что более удобно при отработке технологических процессов.

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 (Cr₃C₂-15 % 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

Мічик 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 18.02.2020 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-129-140>

УДК 621.793

ОСОБЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ ОКСИДНИХ ПОКРИТТІВ ДЕТОНАЦІЙНО-ГАЗОВИМ НАПИЛЕННЯМ

Харламов Ю.О., Романченко О.В., Міцик А.В.

FEATURES OF OXIDE COATINGS DEPOSITION BY D-GUN SPRAYING

Kharlamov Y.O., Romanchenko O.V., Mitsyk A.V.

Захисні та функціональні покриття на основі оксидів становлять значний інтерес для наукомістких галузей промисловості. Особливий інтерес представляє оксид алюмінію, дешевий і доступний, виробництво порошків якого освоєно в промислових масштабах. У статті розглянуто особливості одержання оксидних покриттів методом детонаційно-газового напилення. Розглянуто можливості управління механізмами структуро- і фазоутворення при формуванні шарів покриття при детонаційно-газовому напиленні порошками оксидів алюмінію, цирконію, титану, заліза і кобальту. Вивчено закономірності формування покриттів при напиленні різними порошками оксиду алюмінію при різних умовах детонаційно-газового напилення. Вивчено залежності площі поперечного перерізу одиничної плями напилення і твердості покриттів з оксиду алюмінію від витрати кисню, об'ємного співвідношення газів – компонентів горючої суміші й коефіцієнта заповнення стовбура горючою сумішшю, а також дифузії напилювання. Розглянуто поліморфні перетворення при формуванні покриттів з оксиду алюмінію. Розглянуто також перетворення при формуванні покриттів на основі оксидів титану, цирконію, заліза і кобальту і їх залежність від технологічних параметрів.

Ключові слова: газотермічне напилення покриттів, горюча суміш, оксиди, параметр складності плавлення, порошки, твердість, функціональні покриття.

Вступ. Серед матеріалів, які використовуються для нанесення покриттів, тугоплавкі оксиди належать до найцікавішої групи матеріалів [1]. Для них характерна стабільність в окислювальному середовищі, висока температура плавлення, висока міцність на стиск. Покриття на основі оксиду алюмінію мають гарні трибологічні властивості, корозійну стійкість, високу електричну міцність і ін. [2] Порошок оксиду алюмінію приваблюють також дешевизною у порівнянні зі спеціальними порошками для газотермічного напилення. Освоєно промислове виробництво порошків оксиду алюмінію в різних інтервалах розмірів як абразивних матеріалів для інструментальної та обробної промисловості.

Розробці та дослідженню покриттів на основі оксиду алюмінію і технології їх отримання присвячено досить велику кількість робіт. Оксид алюмінію стійкий навіть в сильно відновлювальній атмосфері до 1700 °С, а в окислювальному – до 1800 °С, температура його плавлення близько 2050 °С [1]. Покриття на основі оксиду алюмінію наносять різними методами газотермічного напилення – плазовими, газополум'яними та ін. При цьому властивості покриттів, в тому числі експлуатаційні, істотно відрізняються. На початковому етапі основна увага дослідників займала проблема зниження пористості покриттів з метою підвищення їх стійкості до корозії. В [3] показано, що підвищення щільності газотермічних покриттів з оксиду алюмінію сприяє також підвищенню їх зносостійкості. Отриманню покриттів з покращеними властивостями сприяв розвиток високошвидкісних методів газотермічного напилення, і перш за все детонаційно-газового [4].

Уже в перших роботах було показано, що детонаційно-газові покриття Al_2O_3 мають типову шарувату структуру, характерну для газотермічних покриттів [5]. Властивості газотермічних покриттів з Al_2O_3 (пористість, мікротвердість, стійкість до зношування, в т.ч. до абразивного) безпосередньо визначаються їх мікроструктурою і технологічними параметрами напилення, причому для детонаційно-газових покриттів характерна вища щільність і однорідність структури, вища твердість і трибологічні властивості в порівнянні з плазовими [6, 7]. Експериментальні дослідження детонаційно-газового напилення звичайними (Metco 130) і наноструктурованими агломерованими порошками $Al_2O_3-TiO_2$ з розміром часток 10 ... 120 мкм показали істотний вплив технологічних параметрів на мікротвердість покриттів [8, 9]. Покриття з наноструктурованого порошку мають мікротвердість на 30 ... 60 % вище в порівнянні з одержуваними плазовим напиленням. Експериментально встановлено залежність вмісту фази $\alpha-Al_2O_3$ в детонаційному покритті від інтерва-

лу між накладенням поодиноких плям друг на друга, що дозволило вперше розробити технологію формування структур, що мають градієнтну дискретну будову (кілька шарів), в яких фазовий склад оксиду алюмінію поступово змінюється по товщині покриття (від 3 % α - Al_2O_3 на границі розділу покриття-основа до 20 % α - Al_2O_3 в зовнішньому шарі), що забезпечило поєднання високих значень твердості й міцності зчеплення [10]. Отримання детонаційно-газових покриттів з Al_2O_3 на маловуглецевої сталі, що поєднують високу мікротвердість, низьку пористість і хорошу фрикційну зносостійкість, підтверджено в [11].

Розвиваються дослідження поліморфних перетворень при газотермічному напиленні покриттів. В [12] показано, що при детонаційно-газовому напиленні порошками Al_2O_3 -13 % TiO_2 в покриттях може зберігатися фазовий склад розплавлених частинок, на відміну від плазмового напилення, що супроводжується процесами випаровування та виділення фаз твердих розчинів. Спостерігається гетерогенне утворення зародків α -фази на додаток до нормального зародкоутворення γ -фази. Висока швидкість охолодження сприяє формуванню всіх фаз в нанокристалічному стані. Через розчинення титану решітка метастабільної γ -фази сильно напружена, катіони титану нерозчинні в α -фазі. Результати досліджень фазового складу покриттів, нанесених на металеві поверхні зразків, отриманих газополуменевим і плазмовим напиленням, наведені в [13]. Перетворення Al_2O_3 в послідовності $\gamma - \delta - \theta - \alpha$ йдуть в інтервалі температур 950 ... 1250 °C і сильно залежать від часу. При дослідженні рентгенограм встановлено фазовий склад покриттів при напиленні корундової модифікації оксиду алюмінію з малими (не більше 2 % мас.) добавками оксидів перехідних металів і кремнію. Матеріали досліджуваних зразків після газополуменевого напилення становили собою переважно модифікації оксиду алюмінію γ - Al_2O_3 . У всіх зразках була присутня певна кількість (10 ... 20 % мас.) модифікації α - Al_2O_3 , що пояснюють нерозплавлені вихідним корундом.

Відповідно до робіт [2, 14] при детонаційно-газовому напиленні корунду на підкладці формується шар покриття, що складається в основному з модифікації γ - Al_2O_3 . Крім того, в покритті міститься і модифікація α - Al_2O_3 , але в значно меншій кількості. Стверджується, що за співвідношенням α - і γ -модифікацій оксиду алюмінію, що визначається за допомогою кількісного рентгеноструктурного аналізу, можна судити про ступінь проплавлення частинок вихідного порошку, тому, що нерозплавлені частинки являють собою α -модифікацію. В результаті проплавлення лазером плазмового покриття отримана також тетрагональна фаза δ - Al_2O_3 або її суміш з фазою γ - Al_2O_3 . В роботі [15] досліджено вплив ряду технологічних параметрів процесу детонаційно-газового напилення чистого оксиду алюмінію α - Al_2O_3 (корунду) на фазовий склад отриманих покриттів, що залежить від протікання поліморфних

перетворень в напилюваному матеріалі як під час його розгону і розігрівання в стовбурі детонаційної установки, так і в момент формування шару з подальшим охолодженням на підкладці. На відміну від інших видів газотермічного напилення в детонаційних покриттях встановлена можливість існування трифазної суміші: α - $\text{Al}_2\text{O}_3 + \gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3 + \delta$ - $\text{Al}_{196}\text{O}_{288}\text{N}_4$. Кількісне співвідношення цих фаз в покриттях значною мірою залежить від режимів процесу напилення та охолодження підкладки. За кількісним вмістом в покритті α - Al_2O_3 можна судити про ступінь проплавлення частинок напилюваного порошкового матеріалу. При цьому особливості динаміки розгону і розігрівання частинок в стовбурі детонаційної установки, а також розподіл часток у використовуваному порошок за розмірами можуть певною мірою спотворити очікувану картину фазових перетворень. Загальний обсяг корундової модифікації Al_2O_3 в покритті залежить не тільки від ступеня проплавлення частинок порошку при напиленні, але і від кількості α - Al_2O_3 , що утворилася в період охолодження з 2050 до 950 °C, тривалість якого обумовлена інтенсивністю тепловідведення із зони формування шару.

На механічні властивості, включаючи твердість покриття, може впливати ряд факторів [16]:

гранулометричний склад вихідного порошкового матеріалу, від якого залежить енергетичний стан частинок на виході зі ствола – їх температура і швидкість;

кількісне співвідношення модифікацій Al_2O_3 в певній частині шару покриття, яке, у свою чергу, залежить від умов охолодження напилюваного матеріалу при формуванні покриття;

розподіл часток порошку за розмірами при підльоті до підкладки, пов'язане з тим, що більш дрібні частинки через малу інерційність зносяться потоком газів до периферії плями напилення. Це може призводити до істотного зниження швидкості частинок і підвищенню пористості покриття.

Внаслідок цього покриття з оксиду алюмінію характеризуються неоднорідною структурою, обумовленої різними умовами тепловідведення із зони формування покриття, що впливають на процес поліморфних перетворень в ньому. Кількісне співвідношення α -, γ - Al_2O_3 і стеклофази змінюється як по товщині напилюваного шару, так і по діаметру плями напилення, що призводить до неоднакових рівнів механічних властивостей покриття в різних його ділянках. У зв'язку із залежністю ходу поліморфних перетворень від інтенсивності тепловідведення із зони формування покриття на його механічні властивості впливають такі параметри процесу нанесення покриття, як товщина напилюваного шару, швидкострільність детонаційної установки, швидкість переміщення поверхні, що напилюється, а також розміри й маса деталі. При багатокамерному детонаційно-газовому нанесенні покриттів порошком оксиду алюмінію з діаметром частинок 5,6 ... 22,5 мкм з використанням пропан-бутано-кисневої суміші при діаметрі стовбура 16 мм і довжині 500 мм на оп-

тимальних технологічних режимах твердість покриттів $HV 1200 \pm 25$, а пористість знижується від 5 ... 6 % до 0,5 ... 1 %. Якщо вихідний порошок містить близько 4 % α -фази та 92 % γ -фази, то в покриттях можна отримати близько 47 % α -фази та 40 % γ -фази [17].

Введення до складу порошку оксиду алюмінію 1 – 1,5 об. % нанодисперсних порошоків TiO_2 і SiO_2 при плазмовому напиленні призводить до суттєвого підвищення однорідності покриттів, зменшення сітки мікротріщин і пористості до 3 ... 6 %, підвищенню мікротвердості на 38 ... 44 %, міцності зчеплення на 16 ... 25 %, корозійної стійкості [18].

Таким чином, відомості про вплив технологічних параметрів детонаційно-газового напилення на структуру і властивості покриттів з оксиду алюмінію суперечливі, що утруднює розробку та оптимізацію технології отримання покриттів з необхідними властивостями. Для ряду технічних застосувань істотний інтерес представляють також оксиди цирконію, титану, заліза, кобальту та ін. Однак в літературі відсутні відомості про використання та технологічні особливості детонаційно-газового напилення для отримання покриттів з цих оксидів.

Мета роботи полягає у вивченні можливості управління механізмами структуро- і фазоутворення при формуванні шарів покриття при детонаційно-газовому напиленні порошками оксидів алюмінію, цирконію, титану, заліза і кобальту.

Особливості отримання газотермічних покриттів на основі оксидів. Труднощі газотермічного нанесення покриттів з оксидних матеріалів пов'язані з високими значеннями параметра труднощі плавлення D і помірними (а для багатьох матеріалів малими) значеннями коефіцієнта акумуляції тепла b . Ці матеріали менш схильні до формування покриттів під впливом термічної активації й переважно використовувати механічну активацію. Наприклад, для Al_2O_3 $D = 6,88 \cdot 10^{10} \text{ кДж}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{м}^{-3}$, $b = 56 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К} \cdot \text{с}^{0,5}$; для ZrO_2 $D = 4,16 \cdot 10^{10} \text{ кДж}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{м}^{-3}$, $b = 31 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К} \cdot \text{с}^{0,5}$; для TiO_2 $D = 3,85 \cdot 10^{10} \text{ кДж}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{м}^{-3}$, $b = 36 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К} \cdot \text{с}^{0,5}$ [19].

Формування покриттів при детонаційно-газовому напиленні залежить від великої кількості чинників, що визначають особливості використовуваного обладнання, вихідних порошоків, конструкції й підготовки виробів, що напилюються, технологічних режимів напилення та ін. [20, 21]. Ці особливості процесу детонаційного напилення роблять помітний вплив на хід поліморфних перетворень при отриманні покриттів, пов'язаних з впливом гранулометричного складу і типу порошоків і інших параметрів на стан частинок при зіткненні з поверхнею деталі, швидкості охолодження частинок при формуванні покриття та ін. Залежно від фізико-хімічних властивостей матеріалу вихідного порошку і технологічних параметрів детонаційно-газового напилення структуро- і фазоутворення покриттів може від-

буватися в умовах формування: рідкими частинками зі швидкостями охолодження, що забезпечують їх кристалізацію, в тому числі в метастабільних станів; рідкими частинками зі швидкостями, що забезпечують отримання аморфної та мікрокристалічної структури; твердими частинками в пластичному стані, в тому числі з фіксацією метастабільних станів; в режимі протікання або закінчення горіння металевих частинок з отриманням оксиметалічних покриттів; поєднанням двох і більше зазначених вище режимів. Зміною технологічних режимів в процесі детонаційно-газового напилення можна управляти механізмами структуро- і фазоутворення при формуванні різних шарів покриття, наприклад, прилеглих до основи, проміжних і зовнішніх шарів покриття. Можна забезпечити умови формування покриттів, коли один з механізмів структуро- і фазоутворення є провідним, а інші – супутніми.

Отримання покриттів на основі оксиду алюмінію. Вивчено закономірності формування покриттів з порошку електрокорунду білого по ГОСТ 2115-71 дисперсністю 10 – 14 мкм. Покриття наносили на установці ДНП5М зі стовбуром змінного перерізу, який звужується до відкритого торця, довжиною 0,8 м і об'ємом $0,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ при швидкострільності 2,1 Гц. При збільшенні безперервної витрати кисню з 0,6 до $1,1 \text{ м}^3/\text{год}$ і інших незмінних параметрах процесу закономірності зміни площі поперечного перерізу покриття (рис. 1) і твердості за Віккерсом мають екстремум і при різних витратах ацетилену ($0,47$ і $0,68 \text{ м}^3/\text{год}$) відповідають однако- вому складу горючої суміші $O_2 : C_2H_2 = 1,5$. Значення витрати кисню для максимумів площі поперечного перерізу і твердості покриттів при однаковій витраті ацетилену збігаються. Причому при меншому значенні витрати ацетилену ($0,47 \text{ м}^3/\text{ч}$) ці залежності мають більш пологий характер, тобто менш чутливі до витрати кисню. Прямі 7 і 8 показують зміну коефіцієнта заповнення стовбура горючою сумішшю.

Площа поперечного покриття дає повнішу і якісну інформацію в порівнянні з товщиною одиничного шару і дозволяє судити про коефіцієнт використання порошку.

Отримані дані свідчать про надлишкову залежність характеристик одержуваних покриттів від положення порошкової хмарки в стовбурі, складу горючої суміші й коефіцієнта заповнення стовбура горючою сумішшю

$$\beta = \frac{(Q_{O_2} + Q_{C_2H_2})}{\nu V_{ст}},$$

де Q_{O_2} , $+Q_{C_2H_2}$ – відповідно витрата кисню і ацетилену; ν – швидкострільність установки; $V_{ст}$ – об'єм стовбура.

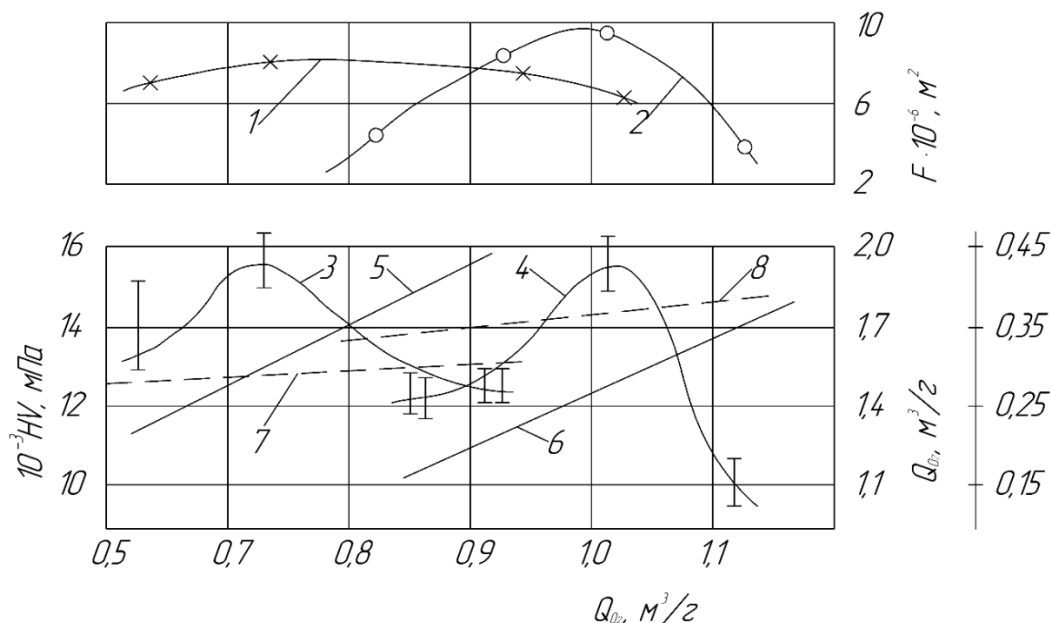


Рис. 1. Залежність площі поперечного перерізу одиничної плями (1, 2) і твердості (3, 4) покриттів з оксиду алюмінію від витрати кисню, об'ємного співвідношення газів $\beta = O_2/C_2H_2$ (5, 6) і коефіцієнта заповнення стовбура горючою сумішшю (7, 8). Дистанція напилення 150 мм. Витрата ацетилену, $m^3/год$: 0,47 (1, 3, 5, 7); 0,68 (2, 4, 6, 8)

Твердість плазмових покриттів з Al_2O_3 зазвичай знаходиться в межах 5440 ... 7300 МПа [22], оскільки вони складаються в основному з $\gamma-Al_2O_3$ [23]. Зміною відносного змісту α - й γ - фаз можна пояснити спостережуване підвищення твердості покриттів. Певний вплив надає також пористість покриттів і міцність зв'язків (схоплювання) по границях контакту між окремими частинками. Збереження значної кількості $\alpha-Al_2O_3$ в детонаційно-газових покриттях пов'язано зі зниженою швидкістю охолодження одиничного шару покриття, а також з можливістю формування покриттів з неповністю проплавлених частинок при високих швидкостях зіткнення з поверхнею деталі. Про це ж свідчить монотонне зниження твердості та площі поперечного перерізу покриттів при збільшенні дистанції напилювання (рис. 2). Зі збільшенням дистанції напилювання не тільки зменшується швидкість і температура часток, але і зростає ступінь розкриття детонаційно-газового струменя, а тим самим слабшає термічний вплив на поверхню деталі. Залежності твердості покриттів від витрати транспортувального газу мають екстремум, причому значення витрати транспортувального газу, відповідного максимальної твердості покриттів, зі збільшенням дистанції напилювання зменшується (рис. 3). Експериментальна перевірка показала, що витрата транспортувального газу на витрату порошку практично не впливає і в основному визначає інтенсивність розпилю порошку в стовбурі, довжину порошкової хмарки і її початкове положення в стовбурі. Екстремуми експериментальних залежностей твердості відповідають оптимальному енергетичного стану частинок Al_2O_3 в момент формування покриття. У міру збільшення дистанції напилювання частинки порошку піддаються більш інтенсивному охолодженню.

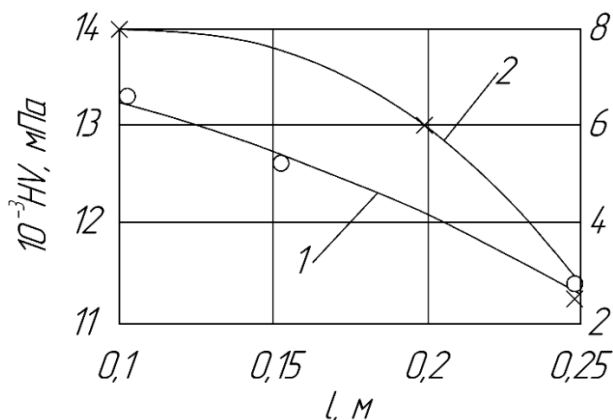


Рис. 2. Залежність твердості (1) і площі поперечного перерізу одиничної плями (2) покриттів з оксиду алюмінію від дистанції напилення. Витрати газів, $m^3/год$: $O_2 - 0,83$; $C_2H_2 - 0,68$

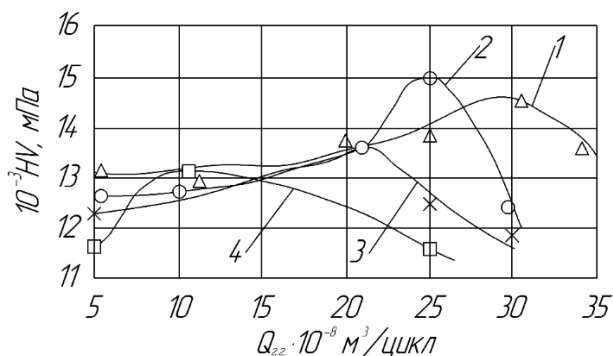
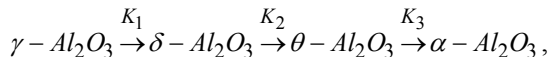


Рис. 3. Залежність твердості покриттів з оксиду алюмінію від витрати транспортувального газу. Витрати газів, $m^3/год$: $O_2 - 0,93$; $C_2H_2 - 0,68$. Дистанція напилення, мм: 100 (1), 150 (2), 200 (3), 250 (4)

Розрізняють стійкі та нестійкі (проміжні) модифікації Al_2O_3 , а також його гідратовані (водні) форми. До стійких відносяться модифікації $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ і $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. До нестійкої відносяться модифікації η , χ

– (кубічна система з періодом комірки $7,94 \text{ \AA}$), σ , θ , і ζ (ромбічна або тригональна форма). При температурі $950 - 1200^\circ\text{C}$ відбувається незворотний перехід $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ зі скороченням обсягу на 14,3 %. Якщо такий перехід буде проходити при експлуатації покриття, це призведе до збільшення пористості й навіть відшарування покриття. Корунд ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) має вищу твердість ($HV_{\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3} = 20000 \text{ МПа}$, $HV_{\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3} = 11000 \text{ МПа}$) та щільність – $3,98 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ у порівнянні з $3,4 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ для $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, вищу теплопровідність – $40 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ в порівнянні з $1,5 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ для $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, а також вищу корозійну стійкість [24]. Тому краща операційна технологія нанесення покриттів, що містять $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

При гомогенній кристалізації зародження $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ можливо при температурах $T \leq 2075 \text{ К}$. Передбачається, що при гетерогенній кристалізації можливе зменшення температурного інтервалу утворення $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Для досить чистого Al_2O_3 (> 99 мас. %) схема поліморфного перетворення $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ наступна [25]



де K_1 , K_2 , K_3 – константи швидкостей відповідних реакцій. Встановлено, що утворення корундового покриття можливо, якщо кристалізація частинок Al_2O_3 буде проходити за умови $T_k - 2280 \text{ К}$, $t_0 \geq 5 \cdot 10^{-2} \text{ с}$.

При детонаційно-газовому напиленні підвищення вмісту корунду в покриттях отримують при збільшенні товщини одиничного шару до 8 ... 18 мкм [26]. Однак на утворення $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в покритті впливають і інші фактори детонаційно-газового напилення: зростання контактної температури шляхом збільшення частоти зіткнення часток порошку з поверхнею деталі при формуванні одиничного шару покриття, додаткове тепловиділення шляхом переходу при ударі кінетичної енергії частинки в тепло. Навіть без урахування цих факторів при швидкостях зіткнення вище 500 м/с температура кристалізації матеріалів істотно збільшується, контактна температура зростає на сотні градусів. А з ростом температури зменшується час, необхідний для протікання переходу $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ [25].

Були проведені експерименти з детонаційно-газового нанесення покриттів з порошків Al_2O_3 при використанні заміниака ацетилену-пропан-бутану. Швидкострільність установки становила 4 Гц. Використовували різні способи введення порошку в стовбур детонаційно-газової установки: п. 1 – стру-

менево-осьовий з боку закритого торця, кут між вихідним соплом порошкового живильника і соплом введення порошку в стовбур 90° ; п. 2 – струменевий осьовий з боку закритого торця; п. 3 – струменево-вихровий осьовий з боку закритого торця, кут між вихідним соплом порошкового живильника і соплом введення порошку в стовбур 45° . Технологічні режими та фазовий склад вихідного порошку і покриттів приведені в табл. 1, схеми використаних стовбурів на рис. 4, а тимчасові діаграми робочого (одиночного) циклу напилення для настройки установки в табл. 2.

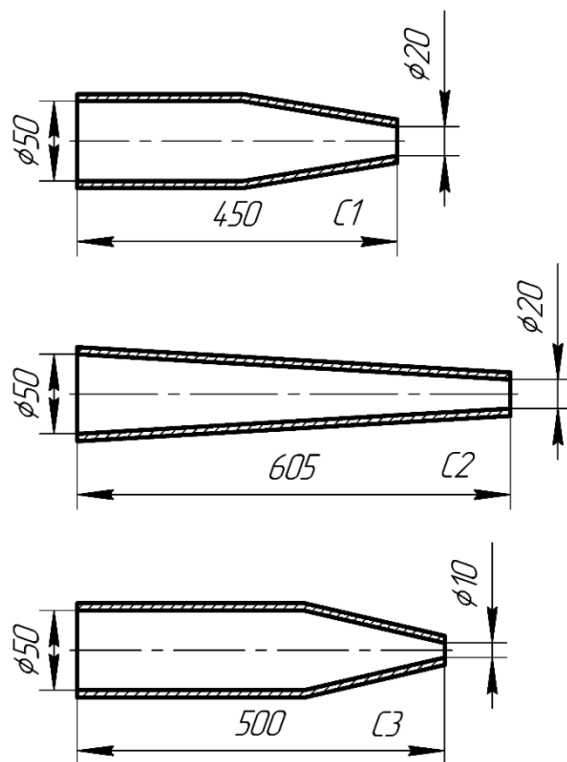


Рис. 4. Стовбури детонаційно-газової установки

На рентгенограмах вихідного порошку Al_2O_3 з дисперсністю 10 ... 200 мкм є тільки лінії $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. У напилених покриттях інтенсивність ліній α -фази зменшується і з'являються лінії інших фаз – γ , θ , δ , χ . Два ідентичних режими (1 і 2) відрізняються тільки моментом введення порошку в стовбур. Пізніше введення порошку (режим 2) призводить до збільшення часу перебування частинок порошку в високотемпературному потоці, а відповідно і ступеня їх прогріву. В ядрі великої частки зберігається нерозплавлена α -фаза, вона повільніше охолоджується на поверхні деталі. На рентгенограмі покриття є лінії γ - і δ - фази. Зі збільшенням прогріву частинок на рентгенограмі покриття з'являються лінії проміжної χ -фази. Введення порошку безпосередньо в кінцеву ділянку стовбура меншого об'єму забезпечує більш інтенсивний прогрів порошку і більш значне зменшення вмісту $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в покритті. Використання осьової подачі порошку (режим 4) призвело до ще

Таблиця 1

Режими нанесення і фазовий склад покриттів з порошку Al_2O_3

Фази і технологічні параметри	Режими					
	1	2	3	4	5	6
Фазовий склад вихідного порошку						
α	100 %	100 %	100 %	100 %	+	60 %
γ	—	—	—	—	+	+
θ	—	—	—	+	+	—
δ	—	—	—	—	—	+
Al	—	—	—	—	15 %	—
Дисперсність порошку, мкм	10 ÷ 200	10 ÷ 200	10 ÷ 200	10 ÷ 200	50	7
Вид стовбура	С 1	С 1	С 2	С 3	С 2	С 2
Схема введення порошку в стовбур	П 1	П 1	П 1	П 2	П 3	П 3
Вид циклограми настройки установки	Ц 1	Ц 2	Ц 3	—	Ц 4	Ц 4
Дистанція напilenня, мм						
Витрати газів, $m^3/c (\times 10^4)$						
пропан – бутан	1,9	1,9	1,54	—	1,22	1,22
кисень	5,6	5,6	4,77	—	3,89	3,89
флегматизуючий (повітря)	2,64	2,64	3,13	—	2,78	2,78
Транспортує (повітря)	1,9	1,9	2,7	—	2,03	2,03
Фазовий склад покриття:						
α	45 %	33 %	20 %	7,5 %	3,5 %	6,0 %
γ	+	+	+	+	+	+
θ	—	—	+	—	—	+
δ	—	+	+	+	+	+
χ	+	—	—	—	—	—

Таблиця 2

Тимчасова діаграма одиничного циклу детонаційно-газового напilenня
(в секундах від початку одиничного циклу)

Етапи робочого циклу	Варіант одиничного циклу			
	Ц 1	Ц 2	Ц 3	Ц 4
Введення горючого газу	0,04 – 0,21	0,04 – 0,21	0,04 – 0,21	0,04 – 0,21
Відкриття запірної клапана сопла введення порошку в стовбур	0,09 – 0,215	0,09 – 0,215	0,08 – 0,208	0,08 – 0,208
Подача порошку	0,12 – 0,16	0,13 – 0,17	0,135 – 0,18	0,17 – 0,204

більш значного зниження вмісту $\alpha-Al_2O_3$ в покритті. Всі покриття з даного порошку мали досить високу пористість, але були достатньо міцними та здатними до експлуатації в умовах сухого тертя.

Вища щільність покриттів досягається при використанні дрібнодисперсного порошку Al_2O_3 (7 мкм), в покритті зміст α -фази не перевищує 7 %, переважно містяться γ , θ і $\delta-Al_2O_3$. Ще більш щільні покриття наносяться з алюмінійованого порошку Al_2O_3 , що містить 15 % (мас.) Al. Однак і тут, попри досить великі розміри частинок (до 60 мкм) вміст $\alpha-Al_2O_3$ в покритті незначно. На рентгенограмі покриття виявляються лише сліди ліній Al, що можна пояснити окисленням Al_2O_3 .

Вивчено вплив технологічних факторів на структуру і властивості детонаційних покриттів з механічної суміші порошків оксидів Al_2O_3 + Cr_2O_3 (5 %) з розміром частинок ~ 50 мкм. Для нанесення покриттів використовували малогабаритну детонаційно-газову установку, що працює на пропан-бутано-кисневої суміші. Рентгеноструктурним методом проводилося дослідження якісного та кількісного фазового складу покриттів. Знімання прово-

дилися на установці ДРОН-3 в монохроматизованому Fe K α випромінюванні. При визначенні відносного вмісту γ - $\alpha-Al_2O_3$ аналізувалися відповідно зображення (400) і (113) цих фаз. Наявність проміжної δ -фази визначалося за характерними розщеплення зображень (400) і (440).

Встановлено можливість отримання якісних покриттів з оксиду алюмінію при використанні газів – замінників ацетилену. Міцність зчеплення, що визначається методом штифта на сталевих зразках, становить 40 – 50 МПа. Вирішальний вплив на фазовий склад покриттів з порошку надає товщина шару, що наноситься за одиничний цикл. Зі збільшенням товщини одиничного шару зменшується швидкість охолодження розплавлених частинок і інтенсифікуються поліморфні перетворення: $L \rightarrow \gamma \rightarrow \delta \rightarrow \theta \rightarrow \alpha-Al_2O_3$. Для покриттів, сформованих з одиничних шарів меншої товщини, характерно підвищений вміст $\gamma-Al_2O_3$ (рис. 5 і 6). Спостерігається чітко виражена закономірність збільшення вмісту α -фази зі збільшенням товщини одиничного шару покриття. Використання короткого стовбура зі змінним поперечним перерізом дозволяє отримувати

ти якісні покриття (рис. 7) при меншій витраті пропан-бутану і кисню (рис. 8).

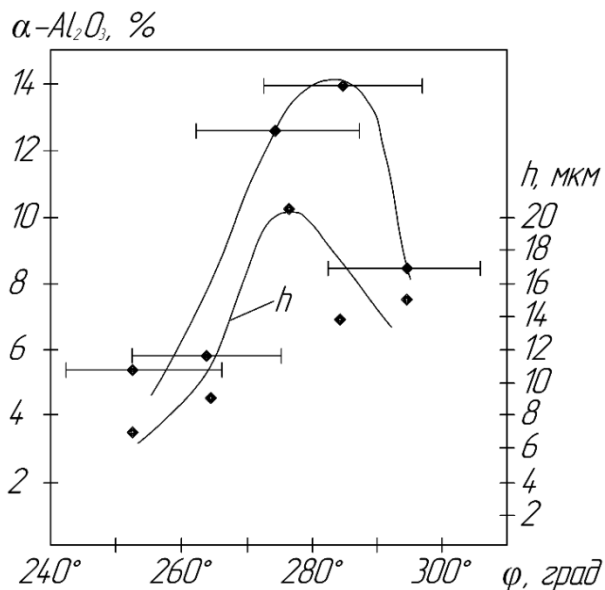


Рис. 5. Вплив моменту імпульсного введення порошку (механічна суміш $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ (5 %)) на вміст α -фази та товщину одиничного шару покриття. Довжина стовбура 0,8 м. Витрати газів, $\text{м}^3/\text{с}$: пропан-бутан – $0,145 \cdot 10^{-3}$; кисень – $0,7 \cdot 10^{-3}$. Швидкострільність 4 Гц, дистанція напилання 90 мм

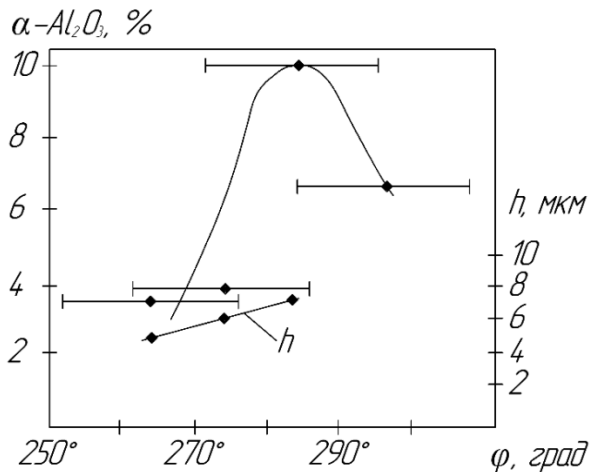


Рис. 6. Вплив моменту імпульсного введення порошку (механічна суміш $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ (5 %)) на вміст α -фази та товщину одиничного шару покриття. Довжина стовбура 0,435 м. Витрати газів, $\text{м}^3/\text{с}$: пропан-бутан – $0,145 \cdot 10^{-3}$; кисень – $0,7 \cdot 10^{-3}$. Швидкострільність 4 Гц, дистанція напилання 90 мм

Мікротвердість покриттів в поперечному перерізі неоднорідна. У шарах, прилеглих безпосередньо до підкладки (сталевій основі), вона найнижча, а потім зростає в міру наближення до зовнішньої поверхні покриття. При використанні технологічних режимів, що відповідають верхній точці кривої для стовбура довжиною 0,8 м (рис. 8), мікротвердість шару, який прилягає до основи 10130 – 14150 МПа, на відстані 0,15 мм від основи – 14150 – 21140 МПа,

для зовнішнього шару (на відстані 0,25 мм від основи) мікротвердість 18020 – 23200 МПа. Це пояснюється зменшенням швидкості охолодження одиничних шарів покриття в міру зростання товщини формованого покриття, а тим самим збільшення його теплоізоляційних властивостей. Тому в міру нарощування шару покриття інтенсифікується перетворення $L \rightarrow \gamma \rightarrow \delta \rightarrow \theta \rightarrow \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Для отримання покриттів з високим вмістом $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ рекомендуються технологічні режими напилання з підвищеною товщиною одиничного шару, а також зменшення часу формування одиничного шару шляхом створення в стовбурі більш концентрованих потоків частинок порошку. Рекомендується також перегрів розплавлених частинок і додатковий підігрів напилуваних виробів.

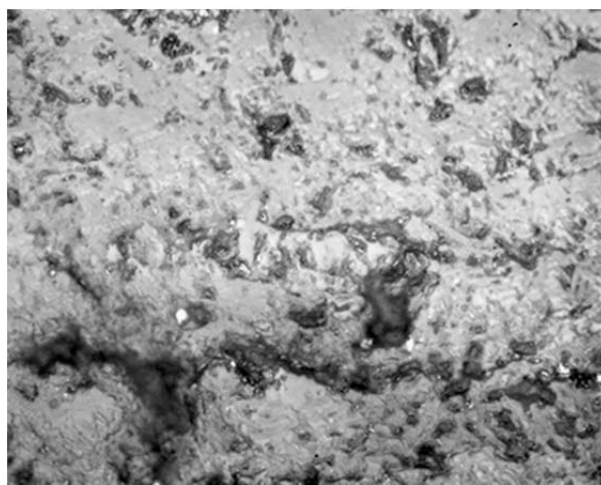


Рис. 7. Структура покриття з порошку $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ (5 %), $\times 630$

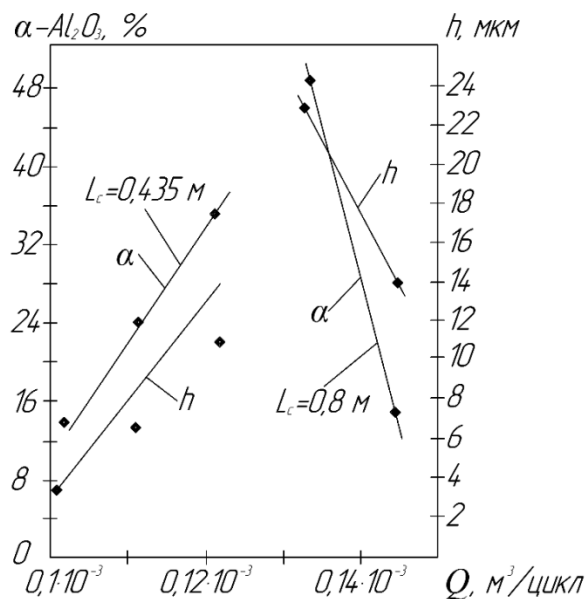


Рис. 8. Вплив витрати пропан-бутану на вміст α -фази та товщину одиничного шару покриття з оксиду алюмінію. Витрата кисню, $\text{м}^3/\text{с}$: стовбур 0,435 м – $0,6 \cdot 10^{-3}$; стовбур 0,8 м – $0,7 \cdot 10^{-3}$

Отримання покриттів на основі діоксиду цирконію. Діоксид цирконію ZrO_2 хімічно стійке тугоплавке з'єднання з температурою плавлення $2688^\circ C$ [1]. Серед всіх оксидів характеризується найнижчою теплопровідністю і широко використовується при плазмовому напиленні теплонапружених виробів [1]. При нагріванні понад $1182^\circ C$ моноклінна модифікація ZrO_2 з щільністю $5,56 \text{ г/см}^3$ перетворюється в тетрагональну з щільністю $6,1 \text{ г/см}^3$, що призводить до руйнування покриттів при їх охолодженні. Тому застосовують стабілізацію ZrO_2 оксидами кальцію, церію, ітрію чи марганцю, що призводить до зростання лінійного коефіцієнта термічного розширення і стійкості до теплових ударів.

Особливості нанесення покриттів з ZrO_2 пов'язані з його низькою теплопровідністю, високою щільністю, низьким коефіцієнтом акумуляції тепла. Час нагріву частинок ZrO_2 до плавлення в $1,5 \dots 2$ рази більше, ніж для частинок Al_2O_3 . Тому при нанесенні покриттів з ZrO_2 необхідно в $1,5 \dots 2$ рази збільшити час перебування порошку в потоці продуктів детонації, а також забезпечити більш інтенсивний прогрів часток порошку.

Для ZrO_2 встановлено існування двох модифікацій: стабільної моноклінної та метастабільної тетрагональної. Температура перетворення $\approx 1000^\circ C$. У ряді робіт встановлено існування кубічної високо-температурної модифікації ZrO_2 . Температура перетворення кубічної ZrO_2 в тетрагональну для чистого ZrO_2 дорівнює $2285^\circ C$ [27].

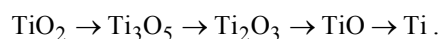
Експерименти, проведені при використанні стовбура з конічною вихідною ділянкою і пропан-бутан-кисневою сумішшю підтвердили можливість отримання міцних покриттів з порошку ZrO_2 з розміром частинок до 200 мкм . На рентгенограмах покриттів з великодисперсного стабілізованого порошку ZrO_2 (до 200 мкм), в початковому стані має кубічну модифікацію, також зберігаються тільки лінії кубічної модифікації ZrO_2 . Шляхом деякого спотворення решітки всі піки ліній кубічного ZrO_2 зміщені в бік менших кутів. При використанні вихідного дрібнодисперсного порошку ZrO_2 (50 мкм) як покриття, так і вихідний порошок мають моноклінну решітку при незначному вмісті кубічної модифікації. У покритті зміст кубічної модифікації дещо збільшився, про що свідчать більш яскраво виражені піки кубічної ZrO_2 .

Проведено дослідження з нанесення покриттів з алюмініюваного порошку ZrO_2 , що містить 20% (мас.) Al , має кубічну модифікацію і стабілізованого CaO (5%). Піки ліній фаз на рентгенограмах дещо зміщено в бік менших кутів. Покриття відрізняється високою міцністю в порівнянні з покриттям з чистого ZrO_2 . Однак, на рентгенограмах покриттів ліній Al немає. Є тільки лінії кубічної модифікації ZrO_2 . Однак, піки ліній стали ширше, асиметричними й розмитими в сторону великих кутів. Можливо, відбулася взаємодія Al з ZrO_2 , Al з ZrO_2 при $1600^\circ C$ не взаємодіє [27]. Оксиди Al , як і при плазмовому напиленні [28], рентгенографічно не виявляються. Ма-

ють, і при детонаційно-газовому напиленні реалізується взаємодія Al з ZrO_2 . Причому можливе відновлення оксиду цирконію та утворення в поверхневому шарі частинок твердих розчинів $Zr - Al$.

Отримання покриттів на основі оксиду титану. Оксид титану TiO_2 є хімічно стабільним кристалічним з'єднанням з температурою плавлення $1840^\circ C$ [1]. Його застосовують для отримання газотермічних покриттів як діелектричних, зносостійких і ін. [1, 29]. Проведено дослідження з нанесення покриттів з рутилового концентрату по РЭТУ-1175-63 і ЦМТУ 08-110-68, що видобувається на Верхньодніпровському гірничо-металургійному комбінаті й містить $TiO_2 = 93,5 \dots 95,5\%$; $Fe_2O_3 = 1,4 \dots 2,5\%$; $ZrO_2 = 0,5 \dots 1,2\%$; $SiO_2 = 0,3 \dots 1,7\%$; $Al_2O_3 = 0,2 \dots 0,4\%$. Оксиди, супутні діоксиду титану в рутиловому концентраті, здійснюють його природне легування, що призводить до зниження температури плавлення системи й утворення твердих розчинів, які мають підвищену в порівнянні з TiO_2 твердість. Рутиловий концентрат представлений сумішшю двох форм TiO_2 – рутилу та анатазу. Щільність рутилу – 4240 кг/м^3 , анатазу – 3830 кг/м^3 . Параметр важкості плавлення нижче, ніж в Al_2O_3 і ZrO_2 і дорівнює $D = 3,85 \cdot 10^{10} \text{ кДж}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{м}^{-3}$, коефіцієнт акумуляції тепла $36 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К} \cdot \text{с}^{-0,5}$. Рідкий діоксид титану має значення поверхневого натягу і в'язкості приблизно у два рази нижче в порівнянні з Al_2O_3 . Нанесення покриттів здійснювали на установці ДНПЗ зі стовбуром довжиною 800 мм змінного перерізу об'ємом $0,6 \text{ л}$ при швидкострільності $1,5 \text{ Гц}$. Безперервна витрата кисню становила $104 \text{ см}^3/\text{цикл}$. Порошок рутилового концентрату з розміром частинок до 40 мкм подавали азотом з витратою $30 \text{ см}^3/\text{цикл}$ через співвісне зі стовбуром сопло з боку закритого торця.

Зі зменшенням витрат ацетилену і збільшенням дистанції напилювання зменшується товщина одичного шару формується покриття (рис. 9), що пояснюється зниженням ступеня прогріву частинок. У всіх випадках забезпечувалося формування досить міцних покриттів. Рентгенографічно в покриттях виявлено наявність різних модифікацій TiO_2 , а також інших оксидів титану. Відновлення оксиду титану проходить стадійно,



У дослідженому діапазоні режимів спостерігалось відновлення TiO_2 до Ti_2O_3 . Зі зменшенням вмісту ацетилену в горючій суміші й збільшенням дистанції напилювання, що рівнозначно збільшенню вмісту кисню в горючій суміші та часу перебування частинок порошку TiO_2 в потоці продуктів детонації, зростає ступінь повноти протікання відновлення TiO_2 до вищих оксидів. Одночасно при нагріванні частинок TiO_2 проходять поліморфні перетворення.

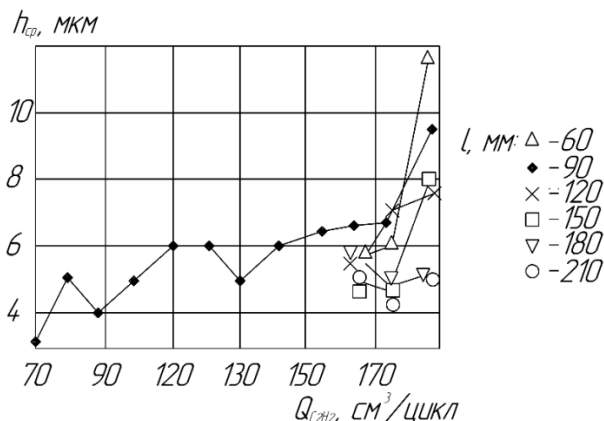


Рис. 9. Залежність товщини шару покриття з порошку природного рутилу від витрати ацетилену і дистанції напильовання

Отримання покриттів на основі оксидів заліза та кобальту. Оксид алюмінію, діоксид цирконію, діоксид титану відносяться до категорії термодинамічно міцних. При розробці технології нанесення покриттів з таких оксидів зазвичай прагнуть запобігти можливим кристалохімічним перетворенням, зберегти в покритті щільні й міцні вихідні структури. Однак існує ряд оксидів з низькою термодинамічною міцністю і високою дисоціювальною здатністю. Типовими представниками цієї групи є оксиди заліза і кобальту. Ці матеріали можуть бути використані як електродні матеріали електрохімічних апаратів для заміни електродів з активним покриттям з дорогого і дефіцитного оксиду рутенію. Вивчали можливість детонаційно-газового нанесення покриттів з оксидів Fe_3O_4 і Co_3O_4 . Магнетит Fe_3O_4 плавиться конгруентно при 1597°C , перетворюючись в розплав оксидів (Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO) [27]. При кімнатній температурі існує тільки два стабільних оксиди Fe; гематит Fe_2O_3 і магнетит Fe_3O_4 . При температурах нижче 570°C утворюється FeO (або FeO_{1-k}) розпадається з реакції диспропорціонування $4\text{FeO} = \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Fe}$. Зі збільшенням об'ємного вмісту в горючій суміші азоту або кисню вміст Fe_3O_4 в покритті збільшується, причому вплив обох компонентів приблизно однаковий (табл. 3). Зі збільшенням ступеня розведення горючої суміші киснем і азотом зменшується коефіцієнт використання порошку (табл. 4).

Отримання покриттів з оксиду Co_3O_4 представляє важке завдання, оскільки він розкладається при 967°C . Для нанесення покриттів використовували порошок Co_3O_4 з розміром частинок ≤ 30 мкм. Використовували стовбур діаметром 28 мм і довжиною 850 мм. Швидкострільність установки 2 Гц. Покриття наносили на алюмінієві пластини. При дистанції напильовання 150 мм, складі горючої суміші $\text{C}_2\text{H}_2 : \text{O}_2 = 1:3$ і величині витрати азоту з 1,1 до $1,5 \text{ м}^3/\text{год}$ порошок Co_3O_4 повністю розкладався до CoO . При подальшому збільшенні витрати азоту вміст Co_3O_4 в покритті зростає. Після вдосконалення системи подачі газів і порошку в стовбур, зміни

умов займання горючої суміші, підвищення вмісту кисню в горючій суміші ($\text{C}_2\text{H}_2 : \text{O}_2 = 1:4,3$) і зменшення дистанції напильовання до 35 мм вміст Co_3O_4 в покритті зростає, досягаючи при витраті азоту $1,6 \text{ м}^3/\text{год}$ 100 %.

Таблиця 3

Вплив складу горючої суміші на фазовий склад покриттів з порошку магнетиту

№ дослід- ня	Дистанція напильовання	Об'ємне співвід- ношення газів у горючій суміші $\text{C}_2\text{H}_2 : \text{O}_2 : \text{N}_2$	Вміст Fe_3O_4 в покрит- ті, %
1	110	$1:(1,3...3,0):1,5$	0
2	110	$1:3,3:2,65$	0
3	110	$1:1:2,65^*$	50
4	110	$1:2:2,3^*$	90
5	110	$1:3:1,65^*$	90
6	150	$1:5,3:3,1^*$	100

* – Подача азоту в вихідну частину стовбура

Таблиця 4

Вплив складу горючої суміші на коефіцієнт використання порошку Fe_2O_3

Об'ємне співвід- ношення газів у горючій суміші $\text{C}_2\text{H}_2 : \text{O}_2 : \text{N}_2$	Вміст Fe_3O_4 в покритті, %	Коефіцієнт використання порошку
$1:1,55$	0	1
$1:1,7:3,1$	50	0,77
$1:3,9:2,4$	100	0,64

При використанні ацетіленокислородних сумішей, близьких за складом до стехіометричного без додавання азоту, відбувалося майже повне розкладання порошку Co_3O_4 і в покритті переважно знаходився металевий Co. Зменшення дистанції напильовання і відстані між точкою введення порошку і зрізом стовбура зменшувало інтенсивність розкладання Co_3O_4 шляхом зменшення часу його перебування в високотемпературному гетерогенному потоці. Однак при оптимальних режимах за фазовим складом не вдалося отримати покриття товщиною понад 0,1 мм.

Висновки. 1. При розробці технологічних процесів детонаційно-газового напильовання оксидних покриттів необхідно враховувати та забезпечити оптимальні умови протікання провідних перетворень і явищ, що роблять вирішальний вплив на структуру й властивості одержуваних покриттів. Для цього можуть бути використані регулювання витрати та складу горючої суміші, геометрії й розмірів стовбура, умов введення порошку в стовбур, одиничної до-

зи порошку, дистанції напилування, циклограми робочого циклу й інші технологічні прийоми.

2. На прикладі нанесення покриттів з порошку оксиду алюмінію показана можливість управління фазовим складом і властивостями покриттів. Встановлено суттєвий вплив товщини одиничних шарів покриття на кінетику поліморфних перетворень і фазовий склад покриттів з оксиду алюмінію. Метод детонаційно-газового напилування дозволяє отримувати покриття з підвищеним вмістом α - Al_2O_3 .

3. Для отримання міцних покриттів з оксиду алюмінію з високим вмістом альфа-фази рекомендуються режими детонаційно-газового напилування, що забезпечують нагрів частинок порошку до 2000 ... 2300 °C, швидкість зіткнення з основою 300 ... 400 м/с, температуру в контактній зоні частинками та основою в процесі формування одиничних мікрошарів щонайменше 2000 °C і швидкості охолодження не більше 103 ... 104 °C/с.

4. Детонаційно-газове напилування дозволяє наносити міцні покриття на основі оксидів титану, заліза і кобальту.

Л і т е р а т у р а

1. Технология неорганических порошковых материалов и покрытий функционального назначения / Ю.П. Удалов, А.М. Германский, В.А. Жабров и др. – СПб.: Янус, 2001. – 428 с.
2. Бартенев С.С., Федько Ю.П., Григоров А.И. Детонационные покрытия в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1982. С. 58 – 60.
3. Psyllaki P.P., Jeandin M., Pantelis D.I. Microstructure and wear mechanisms of thermal-sprayed alumina coatings // *Materials Letters*, 2001, 47. – P.77 – 82.
4. 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.
5. Chang-Jiu Li, Akira Ohmori, The lamellar structure of a detonation gun sprayed A1203 coating // *Surface and Coatings Technology*, 1996. Vol. 82. – P. 254 – 258.
6. Influence of process variables on the quality of detonation gun sprayed alumina coatings / Saravanan P., Selvarajan V., Rao D.S., et.al. // *Surface and Coatings Technology*, 2000, vol. 123. – P.44 – 54.
7. Study of Plasma- and Detonation Gun-Sprayed Alumina Coatings Using Taguchi Experimental Design / P. Saravanan, V. Selvarajan, M.P. Srivastava, et.al. // *J. of Thermal Spray Technology*, 2000, vol. 9(4). P. 505 – 512.
8. Semenov Sergey Y., Cetegen Baki M. Experiments and modeling of the deposition of nano-structured alumina-titania coatings by detonation waves // *Materials Science and Engineering*, 2002, A335. – P. 67 – 81.
9. Cetegen Baki M., Semenov Sergey Y., Goberman Daniel. Deposition of multi-layered alumina-titania coatings by detonation waves // *Scripta Materialia*, 2003, Vol. 48, No 10. – P. 1483-1488.
10. Бланк Е.Д. Разработка и исследование детонационных покрытий с повышенными эксплуатационными свойствами: автореф. ... к.т.н. – СПб. 2003. – 20 с.
11. Properties of alumina coatings produced by gas-detonation method / Jerzy Robert Sobieckia, Janusz Ewertowshib, Tomasz Babulc, Tadeusz Wierzchona // *Surface and Coatings Technology*, 2004, vol. 180 – 181. – P. 556 – 560.
12. A study on phase stability observed in as sprayed Alumina-13 wt. % Titania coatings grown by detonation gun and plasma spraying on low alloy steel substrates / R. Venkataraman, B. Ravikumar, R. Krishnamurthy, D.K. Das // *Surface and Coatings Technology*, 2006, Vol. 201, Number 6. – P. 3087 – 3095.
13. Козлова И.Р. Структурные превращения в напыленной окиси алюминия // *Неорганические материалы*. 1971. Т. 7. С. 1372 – 1377.
14. Косенко Н.Ф. Полиморфизм оксида алюминия // *Изв. вузов. Химия и химическая технология*. Т. 54. Вып. 5. 2011. С. 3 – 16.
15. Особенности полиморфных превращений детонационных покрытий из оксида алюминия / Л.Х. Балдаев, Б.Г. Хамидов, М.В. Прокофьев и др. // *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2015, № 4 (124). – С.25 – 33.
16. Влияние технологических параметров процесса детонационного напыления оксида алюминия на полиморфные превращения при формировании покрытия / Балдаев Л.Х., Хамидов Б.Г., Балдаев С.Л., Прокофьев М.В. // *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2017, № 7 (151). – С. 291 – 295.
17. Прозорова М.С. Закономерности формирования, особенности структуры и свойства наноструктурных керамических покрытий из оксида алюминия: автореф. ... к.ф.-м.н. Белгород, 2014. – 24 с.
18. Фурман В.К. Підвищення експлуатаційних властивостей плазмових покриттів із застосуванням нанодисперсних порошків: дисерт. ... к.т.н. – Київ, 2018. – 165 с.
19. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник // Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.Н. Ардатовская – Киев: Наук.думка. – 1987. – 544 с.
20. Харламов Ю.А., Будагянц Н.А. Детонационно-газовые процессы в промышленности. — Луганск: Изд-во ВУГУ, 1998. – 223 с.
21. Применение детонации в газах для нанесения покрытий / Ю.А. Харламов, М.Х. Шоршоров, В.В. Кудинов и др. // *Физика горения и взрыва*, 1975. Том 11. Вып. 1. – С. 88 – 95.
22. Kirner K., Bosch R. Plasma spraying of free standing ceramic Bodies. General Aspects of Thermal Spraying. 9th Intern. Thermal Spraying Conf. The Hague, 19-23 May, 1980.
23. Кудинов В.В., Иванов В.М. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий. – М.: Машиностроение, 1981. – 267 с.
24. McPherson R. Formation of metastable phases in flame and plasma – prepared alumina // *J. Mater. Sci.*, 1973. Vol. 8, No. 6. – P. 851 – 858.
25. Условия образования газотермических корундовых покрытий / Ф.Б. Вурзель, В.Ф. Назаров, В.А. Хмельник, Г.В. Косоручкин // *Теория и практика газотермического нанесения покрытий*. Т. II. – Дмитров, 1985. – С. 184 – 189.
26. Гольдфайн В.Н., Иголкин А.И., Чеснов А.Н. Детонационные покрытия из окиси алюминия с повышенным содержанием корунда // *Теория и практика газотермического нанесения покрытий*. Т. IV. – Дмитров, 1985. – С. 44 – 46.
27. Физико-химические свойства окислов: Справочник / Г.В. Самсонов, А.Л. Борисова, Т.Г. Жукова и др. – М.: Металлургия, 1978. – 472 с.
28. Новиков Н.Н. Разработка металлизированных порошков тугоплавких окислов и карбидов для плазменного

напыления и исследование свойств покрытий на их основе: Автореф....канд.техн.наук. – Л.: Ин-т химии силикатов АН СССР, 1983. – 24 с.

References

1. Tehnologija neorganicheskikh poroshkovykh materialov i pokrytij funkcional'nogo nazachenija / Ju.P. Udalov, A.M. Germanskij, V.A. Zhabrev i dr. – SPb.: Janus, 2001. – 428 s.
2. Bartenev S.S., Fed'ko Ju.P., Grigorov A.I. Detonacionnye pokrytija v mashinostroenija. L.: Mashinostroenie, 1982. S. 58 – 60.
3. Psyllaki P.P., Jeandin M., Pantelis D.I. Microstructure and wear mechanisms of thermal-sprayed alumina coatings // Materials Letters, 2001, 47. – P. 77 – 82.
4. 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.
5. Chang-Jiu Li, Akira Ohmori, The lamellar structure of a detonation gun sprayed Al₂O₃ coating // Surface and Coatings Technology, 1996. Vol. 82. – P. 254 – 258.
6. Influence of process variables on the quality of detonation gun sprayed alumina coatings / Saravanan P., Selvarajan V., Rao D.S., et.al. // Surface and Coatings Technology, 2000, vol. 123. – P.44 – 54.
7. Study of Plasma- and Detonation Gun-Sprayed Alumina Coatings Using Taguchi Experimental Design / P. Saravanan, V. Selvarajan, M.P. Srivastava, et.al. // J. of Thermal Spray Technology, 2000, vol. 9(4). P. 505 – 512.
8. Semenov Sergey Y., Cetegen Baki M. Experiments and modeling of the deposition of nano-structured alumina-titania coatings by detonation waves // Materials Science and Engineering, 2002, A335. – P. 67 – 81.
9. Cetegen Baki M., Semenov Sergey Y., Gberman Daniel. Deposition of multi-layered alumina-titania coatings by detonation waves // Scripta Materialia, 2003, Vol. 48, No 10. – P. 1483 – 1488.
10. Blank E.D. Razrabotka i issledovanie detonacionnykh pokrytij s povyshennymi jekspluacionnymi svojstvami: avtoref. ...k.t.n. – SPb. 2003. – 20 s.
11. Properties of alumina coatings produced by gas-detonation method / Jerzy Robert Sobieckia, Janusz Ewertowshib, Tomasz Babulc, Tadeusz Wierzchona // Surface and Coatings Technology, 2004, vol. 180 – 181. – P. 556 – 560.
12. A study on phase stability observed in as sprayed Alumina-13 wt. % Titania coatings grown by detonation gun and plasma spraying on low alloy steel substrates / R. Venkataraman, B. Ravikumar, R. Krishnamurthy, D.K. Das // Surface and Coatings Technology, 2006, Vol. 201, Number 6. – P. 3087 – 3095.
13. Kozlova I.R. Strukturnye prevrashhenija v napylennoj okisi aluminija // Neorganicheskie materialy. 1971. T. 7. C. 1372 – 1377.
14. Kosenko N.F. Polimorfizm oksida aluminija // Izv. vuzov. Himija i himicheskaja tehnologija. T. 54. Vyp. 5. 2011. S. 3 – 16.
15. Osobennosti polimorfnykh prevrashhenij detonacionnykh pokrytij iz oksida aluminija / L.H. Baldaev, B.G. Hamicev, M.V. Prokofev i dr. // Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija, 2015, № 4 (124). – S.25 – 33.
16. Vlijanie tehnologicheskikh parametrov processa detonacionnogo napylenija oksida aluminija na polimorfnye prevrashhenija pri formirovanii pokrytija / Baldaev L.H., Hamicev B.G., Baldaev S.L., Prokofev M.V. // Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija, 2017, № 7 (151). – S. 291 – 295.
17. Prozorova M.S. Zakonomernosti formirovanija, osobennosti struktury i svojstva nanostrukturnykh keramicheskikh pokrytij iz oksida aluminija: avtoref. ... k.f.-m.n. Belgorod, 2014. – 24 s.
18. Furman V.K. Pidvisshennja ekspluatacijnih vlastivostej plazmovih pokryttiv iz zastosuvannjam nanodispersnih poroshkiv: disert. ... k.t.n. - Kiïv, 2018. – 165 s.
19. Gazotermicheskie pokrytija iz poroshkovykh materialov: Spravochnik // Ju.S. Borisov, Ju.A. Harlamov, S.L. Sidorenko, E.N. Ardatovskaja – Kiev: Nauk.dumka. – 1987. – 544 s.
20. Harlamov Ju.A., Budag'janc N.A. Detonacionno-gazovye processy v promyshlennosti. – Lugansk: Izd-vo VUGU, 1998. – 223 s.
21. Primenenie detonacii v gazah dlja nanesenija pokrytij / Ju.A. Harlamov, M.H. Shorshorov, V.V. Kudinov i dr. // Fizika gorenija i vzryva, 1975. Tom 11. Vyp. 1. – S. 88 – 95.
22. Kirner K., Bosch R. Plasma spraying of free standing ceramic Bodies. General Aspects of Thermal Spraying. 9th Intern. Thermal Spraying Conf. The Hague, 19–23 May, 1980.
23. Kudinov V.V., Ivanov V.M. Nanesenie plazmoj tugoplavkih pokrytij. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 267 s.
24. McPherson R. Formation of metastable phases in flame and plasma – prepared alumina // J. Mater. Sci., 1973. Vol. 8, No. 6. – P. 851 – 858.
25. Uslovia obrazovanija gazotermicheskikh korundovykh pokrytij / F.B. Vurzel', V.F. Nazarov, V.A. Hmel'nik, G.V. Kosoruchkin // Teorija i praktika gazotermicheskogo nanesenija pokrytij. T.II. – Dmitrov, 1985. – S.184 – 189.
26. Gol'dfajn V.N., Igolkin A.I., Chesnov A.N. Detonacionnye pokrytija iz okisi aluminija s povyshennym soderzhanijem korunda // Teorija i praktika gazotermicheskogo nanesenija pokrytij. T. IV. – Dmitrov, 1985. – S. 44 – 46.
27. Fiziko-himicheskie svojstva okislov: Spravochnik / G.V. Samsonov, A.L. Borisova, T.G. Zhukova i dr. – M.: Metallurgija, 1978. – 472 s.
28. Novikov N.N. Razrabotka metallizirovannykh poroshkov tugoplavkih okislov i karbidov dlja plazmennogo napylenija i issledovanie svojstv pokrytij na ih osnove: Avtoref....kand.tehn.nauk. – L.: In-t himii silikatov AN SSSR, 1983. – 24 s.

Харламов Ю.А., Романченко А.В., Мицык А.В., Особенности получения оксидных покрытий детонационно-газовым напылением

Защитные и функциональные покрытия на основе оксидов представляют значительный интерес для наукоемких отраслей промышленности. Особый интерес представляет оксид алюминия, дешевый и доступный, производство порошков которого освоено в промышленных масштабах. В статье рассмотрены особенности получения оксидных покрытий методом детонационно-газового напыления. Рассмотрены возможности управления механизмами структурой – и фазообразования при формировании слоев покрытия при детонационно-газовом напылении порошками оксидов алюминия, циркония, титана, железа и кобальта. Изучены закономерности формирования покрытий при напылении различными порошками оксида алюминия при различных условиях детонационно-газового напыления. Изучены зависимости площади поперечного сечения единичного пятна напыления и твердости покрытий из оксида алюминия от расхода кислорода, объемного соотношения газов – компонентов горючей

смеси и коэффициента заполнения ствола горючей смесью, а также дистанции напыления. Рассмотрены полиморфные превращения при формировании покрытий из оксида алюминия. Рассмотрены также превращения при формировании покрытий на основе оксидов титана, циркония, железа и кобальта и их зависимость от технологических параметров.

Ключевые слова: газотермическое напыление покрытий, горючая смесь, оксиды, параметр трудности плавления, порошки, твердость, функциональные покрытия.

Kharlamov Y., Romanchenko O., Mitsyk A., Features of oxide coatings deposition by D-gun spraying

Oxide-based protective and functional coatings are of significant interest to high-tech industries. Oxides are characterized by stability in an oxidizing environment, a high melting point, and high compressive strength. Of particular interest is aluminum oxide, cheap and affordable, the production of powders of which is developed on an industrial scale and widely used as abrasive material. Alumina-based coatings have good tribological properties, corrosion resistance, high electrical strength, etc. The article discusses the features of oxide coatings deposition by the method of D-gun spraying. The possibilities of controlling the mechanisms of structure and phase formation during the formation of coating layers during detonation-gas spraying with powders of aluminum, zirconium, titanium, iron and cobalt oxides are considered. The patterns of relationship of coating formation during spraying with various alumina powders under various conditions of detonation-gas spraying were studied. The dependences of the cross-sectional area of a single spraying spot and the hardness of alumina coatings on oxygen consumption, the volume ratio of gases – components of the combustible mixture and the filling factor of the barrel with the combustible mixture, and also the spraying distance were studied. The polymorphic transformations in the formation of coatings of aluminum oxide are considered. Transformations during the formation of coatings based on titanium, zirconium, iron, and

cobalt oxides and their dependence on technological parameters are also considered. Using coating from alumina powder as an example, the possibility of controlling the phase composition and properties of coatings is shown. A significant effect of the thickness of single coating layers on the kinetics of polymorphic transformations and the phase composition of alumina coatings has been established. The method of detonation-gas spraying allows to obtain coatings with a high content of α - Al_2O_3 . To obtain durable coatings of aluminum oxide with a high alpha-phase content, detonation-gas spraying modes are recommended, which ensure heating of the powder particles to 2000 ... 2300 °C, the speed of impact with the base 300 ... 400 m/s, the temperature in the contact between the particles and the base during the formation of single microlayers is not less than 2000 °C and the cooling rate not more than 10^3 ... 10^4 °C/s. Detonation-gas spraying allows also to apply durable coatings based on oxides of titanium, iron and cobalt.

Key words: alumina, thermal spray technology, coatings, combustible mixture, melting difficulty parameter, powders, hardness.

Харламов Юрій Олександрович – д.т.н., проф., професор кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк) yuriy.kharlamov@gmail.com

Романченко Олексій Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк) alexvromanchenko@gmail.com

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

Стаття подана 14.02.2020 р.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-141-143>

УДК 62-236.58:[531.788:681.785.23]

МАНІПУЛЯТОР ДЛЯ СВЕРХВИСОКОВАКУУМНИХ ФОТОЕЛЕКТРОННИХ ТА ЕЛЕКТРОН-ЕЛЕКТРОННИХ СПЕКТРОМЕТРІВ

Чернікова І.Д., Черніков М.Г., Беседа Т.А.

MANIPULATOR FOR SUPER HIGH VACUUM PHOTOELECTRONIC AND ELECTRON-ELECTRONIC SPECTROMETERS

Chernikova I.D., Chernikov M.G., Beseda T.A.

Потреби техніки і технологій привели до різкого прискорення науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт в області вакуумної техніки. Одними з основних елементів вакуумної системи при проведенні технологічних операцій і експериментальних робіт є вакуумні вводи. За типом сполук їх поділяють на рухомі і нерухомі. Як нерухомі вводи – зазвичай застосовуються електричні вводи. За кількістю ступенів переміщення рухливих вводи діляться на одно- і багатоступінчасті. Вводи, які мають велику кількість ступенів переміщення, називаються маніпуляторами. Розглянуто прецизійний тріступеневий маніпулятор для високовакуумних установок, що застосовуються при дослідженні поверхні твердих тіл методами фотоелектронної, вторинно електронної, іонно-електронної спектроскопії, а також при дослідженні кристалів методом дифракції повільних електронів.

Ключові слова: маніпулятор, введення обертання, зубчасті передачі, фланцеві з'єднання.

Вступ: Необхідність в пристроях для передачі руху в вакуум з'являється в зв'язку з тим, що для поліпшення умов роботи привід механізмів зручніше розміщувати поза вакуумної камери.

Пристрої для передачі руху в вакуум діляться на три групи:

- 1) для передачі зворотно-поступального руху;
- 2) для передачі руху, що гойдає;
- 3) для передачі обертального руху.

Усередині кожної групи можлива класифікація за граничним тиском, переданому зусиллю, швидкості переміщення, величиною ходу і т. д.

При конструюванні будь-яких ввідів руху в вакуум слід прагнути до того, щоб ущільнення, яке герметизує вакуумний елемент, не сприймало передаваних зусиль, а напрямні та опори були б по можливості розташовані поза вакуумної камери. Для пар тертя, розміщених у вакуумі, слід вживати спеціальних заходів проти схоплювання тертьових матеріалів. З цією метою можна використовувати матеріали, які

сильно відрізняються за своїми фізичними властивостями, наприклад метал і кераміку.

Уведення поступального руху для низького і середнього вакууму виготовляються зазвичай з гумовими і фторопластовим ущільнювачами.

Гума і сталь має великий коефіцієнт тертя, і гумові ущільнювачі рухомих сполук завжди потребують мастил. Фторопласт може працювати без змащення, але його знос під час роботи повинен компенсуватися установкою додаткових пружних елементів.

Ущільнення для введення поступального руху в високий і надвисокий вакуум виготовляються повністю з металу і можуть бути прогріті з метою знегажування до 400÷500°C

Уведення обертання в вакуум відрізняються великою різноманітністю конструктивних рішень.

Введення обертання в вакуум з просторовим шарніром і ущільненням у вигляді гнучкого елемента, що здійснює рух, що гойдає, забезпечує кінематичну жорстку передачу великих моментів з малою частотою обертання. Максимальна частота обертання обмежена втомної міцністю гнучкого елемента, наприклад сифона або мембрани, і працездатністю пари тертя, що знаходиться у вакуумі. Введення може витримувати температуру до 450÷500°C, що дозволяє застосовувати його в свехвисоковакуумних установках.

У даній роботі запропоновано вакуумний маніпулятор високовакуумної установки ($p \approx 10^{-11}$ Па) для електронної спектроскопії. Для передачі обертального руху з атмосфери в вакуум використовувалися вводи з використанням шарнірів та сифонного ущільнення [1].

Метою роботи є конструювання маніпулятора [2], який дозволяє розширити функціональні можливості вимірювальної вакуумної камери за рахунок забезпечення обертання утримувача зразка навколо

власної осі, горизонтальній осі, а також його поступального руху при проведенні дослідження поверхні твердих тіл.

Постановка завдання: Розроблення та конструювання маніпулятора для сверхвисоковакуумного комплексного фотоелектронного та електрон-електронного спектрометра.

Виклад основного матеріалу дослідження. Маніпулятор (рис. 1) складається з металевого корпусу 1 [3], на якому за допомогою фланцевих з'єднань 23, 24, 25 відповідно закріплені вакуумні вводи 2, 3, 4 обертання. У нижній частині корпусу розташований фланець 21, за допомогою якого забезпечується герметична установка маніпулятора на вакуумну камеру 22. Фланець вакуумного маніпулятора з'єднується з фланцем вимірювальної камери з'єднанням типу ConFlat, розробленої фірмою «Варіан» [1]. З'єднання цього типу при правильній експлуатації забезпечує високоякісне герметичне ущільнення; натікання через таке ущільнення становить менше 10^{-12} Па·м³·с⁻¹ і не фіксується гелієвим течошукачем.

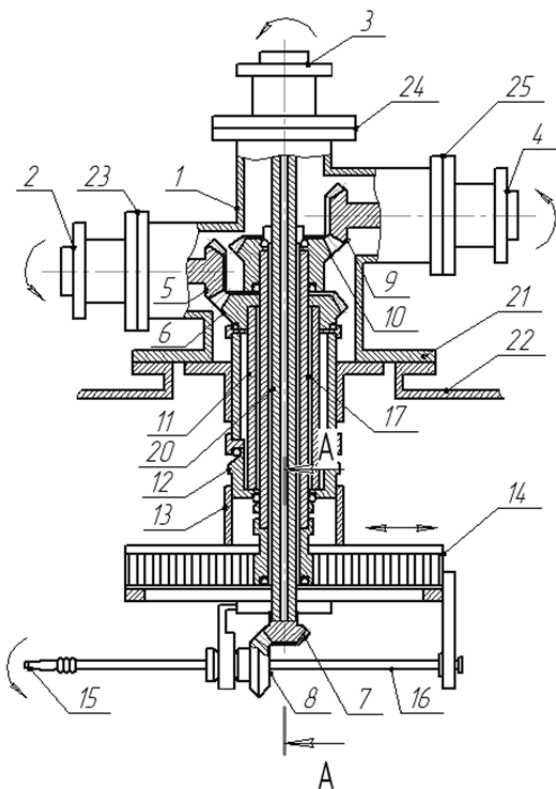


Рис. 1. Схема маніпулятора триступеневого високовакуумного

Маніпулятор працює наступним чином: обертальний рух вакуумного введення 2 перетворюється в обертальний рух зубчастого конічного колеса 5, потім через зубчасте колесо 6 передається жорстко пов'язаної з ним трубі 11, закріпленій на ній втулці 12 і поворотній голівці 13 з напрямними підшипниками 26, 27, 28 (рис.2) і, отже, перетворюється в обертальний рух рухомої тальний рух рухомої каретки 14 і захоплення 15 держателя зразка зі стрижнем в гори-

зонтальній площині на 360°. Обертальний рух введення 4 за допомогою зубчастої конічної передачі 9, 10 перетворюється в обертальний рух труби 17, яка за допомогою рейково-зубчастої передачі 18, 19 потім перетворюється в зворотно поступальний рух каретки 14 в горизонтальній площині по напрямних підшипників 26, 27, 28. Обертальний рух вакуумного введення 3 за допомогою конічної зубчастої передачі перетворюється в обертальний рух стержня 16 закріпленого на ньому захоплення 15 держателя зразка. Отже, обертання вакуумних вводів 2, 3, 4 забезпечує зворотно-поступальний переміщення зразка в горизонтальній площині на відстань порядку довжини зубчастої рейки 19 і поворот зразка на 360° в горизонтальній площині, а обертання вакуумного введення забезпечує обертання зразка навколо своєї осі у вертикальній площині на 360°, що дуже важливо при дослідженнях одного і того ж зразка різними методами в одній і тій же вакуумній камері.

Вакуумним маніпулятором описуваної конструкції була оснащена високовакуумна установка для дослідження поверхні зразків із застосуванням методик фотоелектронної, електронно-іонної, іонно-електронної спектроскопії та дифракції повільних електронів.

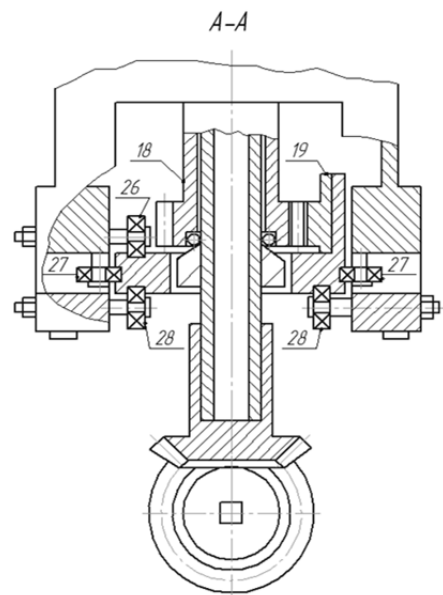


Рис. 2. Схема розташування насипних опорних підшипників

Маніпулятор монтувався на вакуумних фланцях діаметром 100 мм. В якості центральної, середньої і зовнішньої співвісних труб використовувалися труби з нержавіючої сталі 12X18H10T довжиною 463, 400 і 300 мм і діаметром 17, 33 і 43 мм відповідно. Параметри введеної труби, що забезпечує обертання захоплення держателя зразка навколо своєї осі від третього вакуумного введення, становить 540 мм (довжина) і 8 мм (діаметр). Рейково-зубчаста передача складалася з шестерні діаметром 20 мм і зубчастої рейки довжиною 100 мм; передавальне число застосовуваних конічних зубчастих передач 1:1.

Максимальна відстань від осі камери можна регулювати переміщенням кронштейна зі стрижнем і захопленням держателя зразка рухомої каретки. Маніпулятор оснащений касетою зі змінними зразками.

Використання вакуумного маніпулятора дозволяє розширити робочу зону маніпулятора, його функціональні можливості, підвищує продуктивність установки, тобто скорочується час підготовки експерименту і зменшуються похибки за рахунок точної установки зразка в потрібне для досліджень становище.

Висновки: Розглянуто конструкція прецизійного триступеневого маніпулятора для сверхвысоковакуумних вимірювальних установок, який застосовується для дослідження поверхні твердих тіл методами фотоелектронної, вторинно-електронної, іонно-електронної спектроскопії, а також при дослідженні кристалів методом дифракції повільних електронів.

Л і т е р а т у р а

1. Уэстон Дж. Техника сверхвысокого вакуума: Пер. с англ. М. В. Фоминой – М.: «Мир», 1988. – 366 с.
2. А. с. 1302352 СССР Н 01 J 37/20 Вакуумный манипулятор / Н.Г. Черников, В.И. Чичирко, Ю.И. Щербаков и др.
3. Демихов К.Е. Вакуумная техника: Справочник – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2009. – 590 с.

R e f e r e n c e s

1. Ueston Dzh. Tekhnika sverkhvysokogo vakuuma: Per. s angl. M. V. Fominoy – M.: «Mir», 1988. – 366 s.
2. A. s. 1302352 SSSR N 01 J 37/20 Vakuumnuy manipulyator / N.G. Chernikov, V.I. Chichirko, YU.I. Shcherbakov i dr.
3. Demikhov K.Ye. Vakuumnaya tekhnika: Spravochnik – 3-ye izd., pererab. i dop. – M.: Mashinostroyeniye, 2009. – 590 s.

Черникова И.Д., Черников Н.Г., Беседа Т.А. Маніпулятор для сверхвысоковакуумных фотоэлектронных и электрон-электронных спектрометров.

Потребности техники и технологий привели к резкому ускорению научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области вакуумной техники. Одними из основных элементов вакуумной системы при проведении технологических операций и экспериментальных работ является вакуумные вводы. По типу соединенный их разделяют на подвижные и неподвижные. Как неподвижные вводы – обычно применяются электрические вводы. По количеству степеней перемещения подвижные вводы делятся на одно- и многоступенчатые. Вводы, которые имеют большое количество степеней перемещения, называются манипуляторами. Рассмотрен прецизионный трехступенчатый манипулятор для высоковакуумных установок, применяемых при исследовании поверхности твердых тел методами фотоэлектронной, вторично-электронной, ионно-электронной спектроскопии, а также при исследовании кристаллов методом дифракции медленных электронов.

Ключевые слова: манипулятор, ввод вращения, зубчатые передачи, фланцевые соединения.

Chernikova I.D., Chernikov N.G., Beseda T.A. Manipulator for ultrahigh-vacuum photoelectric and electron-electronic spectrometers

Numerous researches of the surface of solids, many questions concerning its properties and processes at the boundary of two phases, have not yet been sufficiently clarified, especially with regard to the influence of conditions on the surface on the energy spectrum of electrons in crystals. The development of such sections as thin-layer nanoelectronics and optoelectronics, devices with MDS structures and charge coupling, cold cathodes and effective photocathodes, etc. require an understanding of the processes in the surface layer of a semiconductor both with a free surface and with the adsorption of other substances on its surface. It is also important for clarifying the possibility of changing the surface and near-surface properties of solids in the desired way. These changes occur both as a result of the appearance of an electric field in the layer of a surface space charge, as well as changes in the electronic structure of a solid near the surface. The research of the surface of solids and its effect on the physical properties of the latter is carried out by various methods: optical, diffraction of slow electrons, field effect, investigation of the contact potential difference, electron spectroscopy, and photoemission. Each of these methods has its advantages and disadvantages. Therefore, there is a necessity to develop and create instruments and experimental equipment to accelerate research and development in the field of vacuum technology. One of the main elements of the vacuum system during technological operations and experimental work is the vacuum inlets. According to the type of connections, they are divided into mobile and motionless. By the number of degrees of movement, the movable inputs are divided into single and multi-stage (manipulators). A precision three-stage manipulator for high-vacuum installations used in the researching of the surface of solids by photoelectron, secondary electron, ion-electron spectroscopy, as well as in the study of crystals by slow electron diffraction, is considered. A comprehensive study of the surface of a solid using such a manipulator allows obtaining more information about the energy spectrum of electrons in the samples under study and, thus, makes it possible to follow all changes on the surface of a solid.

Keywords: manipulator, rotation input, gears, flange connections.

Чернікова Ірина Дем'янівна – старший викладач кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк)
chernikova_i_d@ukr.net

Черников Микола Григорійович – к.фіз.-мат.н., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк)
chernikov_n_g@ukr.net

Беседа Татьяна Анатоліївна – студ. гр. ОФБ-19дм кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк)
tanya.beseda81@gmail.com

Стаття подана 17.01.2020

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-144-148>

УДК 531.88:681.785.23

ВИСОКОВАКУУМНИЙ НАНОМЕТРИЧНИЙ КОМПЛЕКСНИЙ СПЕКТРОМЕТР**Черніков М.Г., Чернікова І.Д.****HIGH VACUUM NANOMETRIC COMPLEX SPECTROMETER****Chernikov M.G., Chernikova I.D.**

Потреби техніки і технологій привели до різкого прискорення дослідно-конструкторських і науково-дослідних робіт для вивчення в високовакуумному середовищі як поверхневих так і об'ємних властивостей твердих тіл. У даній роботі пропонується високовакуумний нанометричний комплексний спектрометр, що дозволяє проводити багатоцільові дослідження поверхневих і об'ємних властивостей твердих тіл в контрольованому середовищі. Наявність системи напуску газу, іонної і електронної гармати дозволяють змінювати структурний стан поверхні досліджуваного об'єкта, а наявність ожеспектрометра контролювати елементний склад на поверхні зразків. Корпускулярна спектрометрія дозволяє визначити енергетичний спектр електронів, а також визначити енергетичні параметри досліджуваної поверхні, що дозволить отримати інформацію широко використовувати для створення напівпровідникових приладів в мікро- і наноелектроніці.

Ключові слова: вакуум, фотоспектрометр, вакуумний маніпулятор, вакуумний монохроматор, ожеспектрометр.

Вступ: Поверхня твердого тіла привертає все більшу увагу фахівців різних галузей науки і техніки. За останні роки створені оригінальні сверхвисоковакуумні багатоцільові аналітичні прилади для контролю і діагностики різноманітних властивостей поверхні твердих тіл. Наука про стан поверхні також бурхливо розвивається і, на думку вчених, дозволить отримати багато цінної інформації про межі поділу різних фаз речовини [1].

Корпускулярна низькоенергетична діагностика поверхні речовини заснована на використанні заряджених частинок малих енергій і методів фізичної електроніки і фізики плазми при дослідженні фізико-хімічних властивостей поверхні твердого тіла. При цьому заряджені низько-енергетичні частки можуть застосовуватися в якості первинних або частки, що зондують поверхню, або як частки, які використовуються як вторинні для аналізу поверхні і які порушені в твердому тілі.

Діагностика (від грецького *diagnostikos* – здатний розпізнати) – процес пізнання. Діагностика по-

верхні твердого тіла – загальна назва сукупності різних методів вимірювання фізико-хімічних параметрів і всебічного вивчення властивостей поверхні – аналітичної фізичної хімії, електрофізики, оптики, фізики напівпровідників, радіаційної фізики та фізичної електроніки, акустики і фізики плазми, молекулярної і ядерної фізики і т. д.

Різноманіття первинних частинок і квантів, що впливають на поверхню, що виробляють різного роду порушення ансамблю частинок в приповерхневій області твердого тіла і створюють безліч вторинних частинок і квантів випромінювання, які виходять в вакуумну середу, зумовило створення цілого класу ефективних методик аналізу і контролю характеристик поверхні твердого тіла. [2, 3]. Для більшості методик корпускулярної діагностики властивостей поверхні твердого тіла характерно використання пучків первинних збуджуючих або зондувальних частинок різного масового, зарядового і енергетичного складу, прискорених до різних енергій і падаючих на кордон розділу твердого тіла з вакуумом під різними кутами. Вторинні частки, що залишають поверхню, також мають різні масовий, зарядовий та енергетичний склад і характеризуються різними кутовими розподілами. Це дозволяє вивчати різноманітні енергетичні, кутові і зарядові залежності і масовий (елементний) склад поверхневої області твердого тіла, використовуючи вторинні розсіяні, а також розпорошені або емітовані частки і кванти електромагнітного випромінювання.

За способом отримання інформації про поверхні методи аналізу ділять на емісійні та зондувальні. Перші використовують конкретний вид емісії тих чи інших частинок з поверхні в результаті різних впливів: температури, електричного поля, механічних напружень, тертя, акустичних хвиль, електромагнітних хвиль. Другі засновані на емісії частинок або електромагнітного випромінювання в результаті впливу на поверхню зондувального потоку частинок: молекул, атомів, іонів, електронів, позитронів, квантів електромагнітного випромінювання.

Використання іонів, електронів, позитронів і квантів електромагнітного випромінювання малих енергій дозволяє безпосередньо вивчати елементарні взаємодії первинних частинок з частинками і квазічастинками поверхневої області твердого тіла, а також з адсорбованими частинками, що знаходяться на поверхні в різних енергетично вигідних станах. Корпускулярна низькоенергетична діагностика дозволяє вивчати енергетичну електрон-ну структуру у приповерхневій області твердого тіла, а також її зміни, що відбуваються в результаті очищення поверхні, адсорбції молекул найпростіших газів, радіаційно-стимульованої десорбції та інших впливів.

Вибір експериментальної техніки і конкретного методу корпускулярної діагностики властивостей поверхні твердих тіл визначається завданнями дослідження, умовами, в яких проводиться діагностика, необхідним рівнем одержуваної інформації та її різноманітністю.

Метою роботи є оптимізація можливостей для розширення використання нанометричного комплексного спектрометра при дослідженні поверхневих властивостей твердих тіл у високому вакуумі. Спектрометр призначений для вивчення електронної та кристалічної структури, а також для хімічного аналізу у приповерхневій області моно- і полікристалів з можливістю цілеспрямованого впливу на їх поверхневі властивості за допомогою іонного бомбардування, високотемпературного відпалу, адсорбції різних газів та нанесення покриттів тонкими плівками.

Постановка завдання: Розроблення та конструювання високовакуумного нанометричного комплексного спектрометра для дослідження поверхневих властивостей твердих.

Виклад основного матеріалу дослідження: Для отримання найбільш вигідного вакууму необхідно, щоб відкачувані системи задовольняли ряду вимог:

а) можливість досягнення розрахункового граничного розрідження в відкачуваному обсязі (ця вимога може бути виконано лише в тому випадку, якщо правильно підібрані вакуумні насоси і дотримані правила вакуумної гігієни при зчленуванні елементів і вузлів відкачуваної системи);

б) можливість отримання необхідної швидкості відкачки і максимальної добротності G вакуумної системи, що оцінюється відношенням швидкості відкачки обсягу S_0 до швидкості дії насоса S_n

в) зручність в роботі і простота експлуатації вакуумної системи, можливість її максимальної автоматизації і оснащення засобами захисту.

Був проведений розрахунок вакуумної системи, вибір обладнання та визначення конструктивних розмірів сполучних трубопроводів і арматури [4].

Вакуумна система установки (рис. 1) виготовлена зі сталі 12Х18Н10Т і складається з аналітичної камери (1) і системи вакуумної відкачки на базі безмасляних засобів. Сверхвисоковакуумний орбітронний насос (30) СОН-А-1 (граничний залишковий тиск при охолодженні рідким азотом 10^{-13} мм.рт.ст. і

швидкість відкачування по повітрю в діапазоні тисків $10^{-8} \div 10^{-11}$ мм.рт.ст. 500 л/с), і насос (10) НМДО-0,25-1 (граничне залишковий тиск $5 \cdot 10^{-9}$ мм.рт.ст. і швидкість дії по повітрю при тиску $5 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст. 300 л/с) підключені до відкачуваного об'єкту через кутові (27, 29) клапани КЕУТ-100. Голчастий натікач (3) призначений для напуску повітря або інертного газу в вакуумну на базі безмасляних засобів. Сверхвисоковакуумний орбітронний насос (30) СОН-А-1 (граничний залишковий тиск при охолодженні рідким азотом 10^{-13} мм.рт.ст. і швидкість відкачування по повітрю в діапазоні тисків $10^{-8} \div 10^{-11}$ мм.рт.ст. 500 л/с), і насос (10) НМДО-0,25-1 (граничне залишковий тиск $5 \cdot 10^{-9}$ мм.рт.ст. і швидкість дії по повітрю при тиску $5 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст. 300 л/с) підключені до відкачуваного об'єкту через кутові (27, 29) клапани КЕУТ-100. Голчастий натікач (3) призначений для напуску повітря або інертного газу в вакуумну камеру при проведенні певних технологічних операцій. Вимірювальна апаратура є набором манометричних перетворювачів: (2) – електророзрядний перетворювач ММ-14М з вимірювальним блоком інверсно-магнетронного вакуумметра ВІМ-2А ($10^{-4} \div 10^{-13}$ мм.рт.ст.), (28) – сверхвисоковакуумний іонізаційний манометр МІ-27 відкритого типу з вакуумметром ВІ-14 ($10^{-1} \div 10^{-10}$ мм.рт.ст.), (26) – магнітний електророзрядний перетворювач ММ-32-1 інверсно-магнетронного типу в комплекті з вакуумметром ВМБ-8 (призначений для індикації тиску в діапазоні $10^{-2} \div 10^{-9}$ мм.рт.ст.), має аналоговий вихід на ЕОМ, висока надійність і стабільність в роботі; (9) – електророзрядний манометричний перетворювач ММ-13М-4А, вражаючи дії яких засновані на залежності величини розрядного струму від тиску газу з вимірювальним блоком вакуумметра ВМБ-3А ($30 \div 10^{-3}$ мм.рт.ст.), (17), (22) – термопарні перетворювачі ПМТ-8 з блоком живлення іонно-термопарного вакуумметра ВІТ-3 ($10^{-1} \div 10^{-3}$ мм.рт.ст.).

Магніторозрядний насос (12) НОРД-100-1 (граничне залишковий тиск $5 \cdot 10^{-9}$ мм.рт.ст. і швидкість дії по повітрю при тиску $5 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст. 100 л/с) призначений для попередньої відкачки вакуумної камери (1), магніторозрядними насоса НМДО-0,25-1 при відкритих клапанах (25), (27) і закритому клапані (24). Цей насос використовується також для знегажування і очищення об'єкту (10) і сверхвисоковакуумні частини системи (1) від забруднень, використовуючи для цієї мети прогрів в печах (11) і (33). Насос НОРД-100-1 при закритому клапані (25) і відкритому клапані (24) застосовується для відкачування і знегажування при прогріванні за допомогою печі (7) камери напуску газу (6).

Для попередньої відкачки і отримання низького вакууму використовуються цеолітові вакуумні насоси ЦВН-1-2 (13), (14) і механічний обертальний насос 2НВР-5ДМ (19). У разі аварійного відключення живлення застосовуються клапани (20), (20₁) з електромагнітним приводом, що дозволяє вберегти систему від напуску атмосферного повітря в систему.

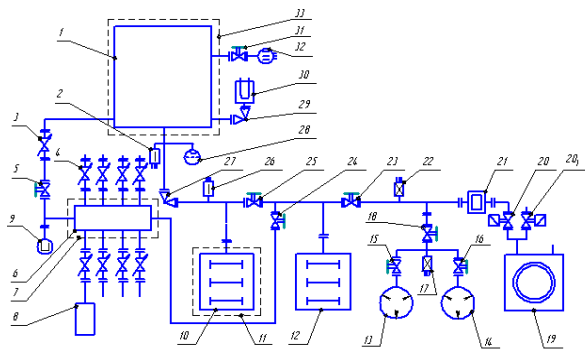


Рис. 1. Схема вакуумної системи нанометричного комплексного спектрометра:

1 – вимірювальна камера спектрометра; 2, 9, 17, 22, 26, 28 – апаратура для вимірювання вакууму; 3 – голчастий натікач; 4 – дозуючі клапани для напуску газу; 6 – камера напуску газу; 8 – система балонів з газами; 5, 15, 16, 18, 23, 24, 25, 31 – вакуумні клапани; 27, 29 – вакуумні кутові клапани; 10, 12 – магніторозрядні насоси; 30 – сверхвисоковакуумний орбітронний насос; 13, 14 – цеолітові вакуумні насоси; 19 – обертальний двоступеневий вакуумний насос; 21 – прогриваюча адсорбційна пастка; 19 – обертальний двоступеневий насос; 20, 20₁ – клапани з електромагнітним приводом; 33, 11 – піч для прогріву сверхвисоковакуумної частини системи; 7 – піч для прогріву камери для напуску газу; 32 – мас-спектрометр.

Для багатьох досліджень при високому вакуумі досить знати величину тиску залишкового газу, не цікавлячись його складом. Для цього можна використовувати вакуумметри, які не потребують регулярної градування, що вимірюють повний тиск газу. Якщо ж необхідно визначати тиск з тією точністю, яку забезпечує іонізаційний або інверсно-магнетронний вакуумметри, то в цьому випадку потрібно не тільки регулярно контролювати градування вакуумметра і знати відносні чутливості приладу для різних газів, але також визначати склад газів в системі.

При тисках $> 10^{-5}$ Па склад залишкового газу, ймовірно, буде аналогічний складу атмосферного повітря, що знаходиться в системі до відкачування. При тисках $< 10^{-6}$ Па. Газ, що виділяється з деталей вакуумної системи, стає основним в залишковому газі, внаслідок чого залишковий газ може значно відрізнитися за складом від атмосферного повітря. Більш того, у багатьох конкретних випадках знати склад залишкового газу важливіше, ніж його тиск (наприклад, присутність активних газів ускладнює вивчення властивостей поверхні твердих тіл). Необхідно знати рід хоча б основної складової залишкового газу, а краще – повний склад газу і тиск його складових (так зване парціальний тиск). Тому, в нашому випадку був обраний для вимірювання парціальних тисків монополярний масспектрометр MX-7304 (32).

Система напуску газів (6) складається з восьми балонів (8) з очищеними газами: (1 – інертними: гелій, неон, аргон, криптон, ксенон; 2 – активними: водень, кисень азот), системи трубопроводів з дозуючими вакуумними клапанами (4), камери змішу-

вання газів і голчастого натікача (3). Система дозволяє здійснювати напуск в аналітичну камеру чистих газів і їх сумішей в дозованих пропорціях і в строго певних кількостях. Контроль газового середовища в аналітичній камері проводився за допомогою масспектрометра MX-7304 (32).

Аналітична камера є циліндр висотою 450 мм. і діаметром 300 мм. (Рис.2.).

Уздовж осі камери розташований триступеневий прецизійний вакуумний маніпулятор [5], що дозволяє виробляти як обертальне так і радіальне переміщення зразків в екваторіальній площині, а також їх обертання навколо своєї осі. Зразки закріплені на утримувачах спеціальної конструкції, що дозволяють виробляти передачу від дослідженого зразка з маніпулятора в касету зі зразками, які потрібно досліджувати, і захоплення з цієї ж касети нового зразка. Це дає можливість досліджувати чотири різних зразка без розтину шлюзової камери (затвор 14 – вхід в шлюзову камеру) в однакових умовах.

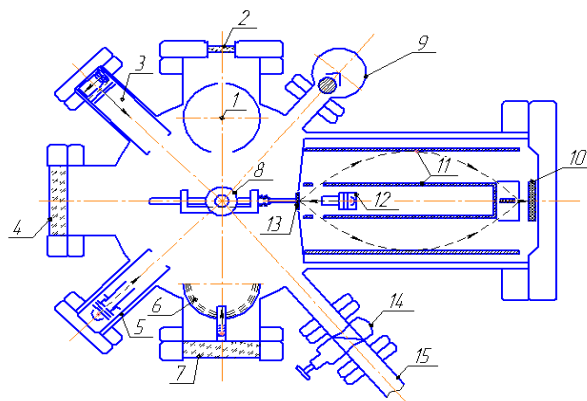


Рис. 2. Аналітична камера високовакуумного нанометричного комплексного спектрометра:

1 – сферичний фотоелектронний спектрометр; 2 – вікно MgF для введення ультрафіолетового випромінювання; 3 – іонна гармата для очищення і травлення зразка; 4, 7 – оглядові вікна; 5 – електронна гармата для очищення і відпалу зразка; 6 – півсферичний чотирьохосітний дефрактор; 8 – прецизійний маніпулятор з трьома ступенями свободи; 9 – монополярний мас-спектрометр; 10 – фотоелектронний помножувач; 11 – оже-аналізатор (циліндричне дзеркало); 12 – електронна гармата оже-аналізатора; 13 – досліджуваний зразок; 14 – затвор шлюзової камери; 15 – вхід в шлюзову камеру

Основними методами дослідження зразків є фотоелектронна спектроскопія в області вакуумного ультрафіолетового випромінювання, електронна оже-спектроскопія та дифракція повільних електронів.

Джерелом ультрафіолетового випромінювання служить високовольтна воднева лампа з вакуумним монохроматором [6]. Випромінювання вводиться в аналітичну камеру через вікно з монокристала фтористого магнію (2) і падає на зразок (13), поміщений в центр аналізатора фотоелектронів (1) типу квазісферичного конденсатора Лукирського [7]. Інтенсивність падаючого на зразок і відбитого випроміню-

вання потрібно калібрувати в абсолютних одиницях, що дозволяє вимірювати квантовий вихід фотоелектронів. Вимірювання фотоелектронних спектрів дає можливість досліджувати стану валентних електронів в приповерхневій області зразка а також визначити енергетичні параметри досліджуваної поверхні.

Електронний оже-спектрометр (11) створений на базі електронного енергоаналізатора типу "циліндричне дзеркало" [8]. Джерелом порушення служить стандартна електронна гармата (12) типу ЕЛОІІ. Хімічний аналіз поверхні зразка проводиться за допомогою вимірювання інтенсивності оже-ліній різних елементів в спектрі вторинних електронів, що забезпечує виявлення мікродомішки в кількості, що відповідає 0,01 моноатомного шару і більше. Реєстрація за допомогою даного аналізатора спектрів характеристичних втрат енергії електронів дозволяє досліджувати плазмові збудження електронів в кристалах, а також іонізаційні електронні збудження.

Дифрактометр повільних електронів (6), створений на базі чотирьохсітчного квазісферичного аналізатора зі скляним колектором, дозволяє (як аналізатор з полем, що затримує) розділяти електрони по енергіях, пропускаючи на колектор частину електронів, що володіють енергією, більшої величини, яка визначається значенням потенціалу поля, що затримує. Так як аналізатори даного типу використовують потоки електронів, що розходяться в великих тілесних кутах, то ефективність і чутливість методу визначається в основному його роздільною здатністю. Світлосила же пристроїв, що задається геометрією, яку утворюють електроди, зазвичай має максимальне значення. В даних аналізаторах необхідно застосовувати моноенергетичні пучки електронів, які зондують поверхню. Дифрактометр крім того, що сказано вище, ще є незамінним методом діагностики структури поверхні твердих тіл.

Очищення досліджуваних зразків проводиться стандартними методами за допомогою іонного бомбардування, для чого в камері встановлена іонна гармата (3). Також отжиг поверхні можна було проводити за допомогою високотемпературного прогріву методом електронного бомбардування за допомогою електронної гармати (5).

Для нанесення на досліджувані зразки тонких плівок різних речовин служать вольфрамові випарники. Швидкість напилування і товщина плівок контролюється в процесі нанесення плівки по зрушенню резонансної частоти кварцового резонатора, включеного в схему кварцових ваг, з точністю до сотих часток моноатомного шару.

Автоматизована система електроживлення, управління, реєстрації сигналу і обробки даних реалізована на базі персонального комп'ютера, оснащеного широким набором периферійних пристроїв.

Технічна характеристика високовакуумного нанометричного комплексного спектрометра:

Граничний залишковий тиск, Па	1.10 ⁻⁹
Діапазон енергій квантів	
УФ-випромінювання, еВ	5,0÷10,9
Ступінь монохроматизації	
УФ-випромінювання, еВ	0,1
Енергетичне дозвіл аналізатора фотоелектронів, %	1
Діапазон вимірювання електронних оже-спектрів, еВ	100÷2000
Енергетичне дозвіл оже-аналізатора, %	0,2
Діапазон температур прогріву зразків, t°С	300÷2500
Діапазон енергій іонів, еВ	0÷5·10 ³

Висновки. Результатом оптимізації комплексного нанометричного спектрометра для дослідження поверхні твердих тіл досягнуто ряд позитивних характеристик:

а) використання оригінального триступеневого маніпулятора спільно з шлюзовою камерою дозволяє проводити дослідження різних зразків без розтину аналітичної камери;

б) можливістю напуску в камеру дозованої кількості одного з восьми різних газів або їх сумішей в заданих пропорціях;

в) поєднання кількох методів дослідження в одній установці дозволяє отримувати більш повну інформацію із досліджуваних зразків у однакових умовах.

Л і т е р а т у р а

1. Копецкий Ч. В. О развитии фундаментальных и прикладных исследований в области физико-химических и механических свойств поверхности. / Ч.В. Копецкий // Вестник АН СССР. — 1979. №9. — с. 3—17.
2. Черепин В.Т., Васильев М.А. Методы и приборы для анализа поверхности материалов. Справочник. / В.Т. Черепин, М.А. Васильев // Наукова думка. Киев. — 1982. — с. 400.
3. Кремков М.В. Корпускулярная низкоэнергетическая диагностика поверхности твердого тела. /М.В. Кремков // Академия наук Узбекской ССР. Институт электроники имени У. А. Арифов; Ташкент: изд-во «ФАН» Узбекской ССР, 1986.— с. 164.
4. Бова О.Р., Чернікова І.Д., Черніков М.Г. Розрахунок та аналіз вакуумних систем / О.Р.Бова, І.Д.Чернікова, М.Г.Черніков // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: 36. наук. пр. Луганськ: вид-во СЛУ ім. В. Даля, 2010. — с. 193-202.
5. Бова А.Р., Волошин М.А., Латыш О.Б. и др. Сверхвысоковакуумный манипулятор в фотоэлектронной спектроскопии / А. Р. Бова, М. А. Волошин, О. Б. Латыш, И. Д. Черникова, Н.Г.Черников // Вісник СЛУ ім. В. Даля, сб. наук. праць. В 2-х частях. Луганськ: вид-во СЛУ ім. В. Даля, 2010, ч.2. №8 (150) — с. 134-142.
6. Адамчук В. К., Федосеенко С. И., Александров В. М. Сверхвысоковакуумная металлическая установка для фотоэлектрических измерений в области $h\nu \leq 10,9$ эВ.

/ В. К. Адамчук, С. И. Федосеенко, В. М. Александров // ПТЭ, 1977, №1. – с. 178 – 179.

7. Лукирский П. И. О фотоэффекте / П. И. Лукирский // Ленинград – Москва: РГТИЛ, 1933. – с. 96.
8. Зашквара В. В., Ильин А. М., Редькин В. С. и др. Цилиндрическое зеркало для разностных методов спектроскопии пучков заряженных частиц. / В. В. Зашквара, А. М. Ильин, В. С. Редькин, В. Я. Колот, М. И. Корсунский // ЖТФ, 1976. т. 46. – с. 1759 – 17668.

References

1. Kopeckij Ch. V. O razvitii fundamental'nyh i prikladnyh issledovanij v oblasti fiziko-himicheskikh i mekhanicheskikh svoystv poverhnosti. / Ch.V. Kopeckij // Vestnik AN SSSR. – 1979. №9. – с. 3– 17.
2. Cherepin V.T., Vasil'ev M.A. Metody i pribory dlja analiza poverhnosti materialov. Spravochnik. / V.T. Cherepin, M.A. Vasil'ev // Naukova dumka. Kiev. – 1982. – с. 400.
3. Kremkov M.V. Korpuskuljarnaja nizkojenergeticheskaja diagnostika poverhnosti tverdogo tela. /M.V. Kremkov // Akademiya nauk Uzbekskoj SSR. Institut jelektroniki imeni U. A. Arifov; Tashkent: izd-vo «FAN» Uzbekskoj SSR, 1986.– с. 164.
4. Bova O.R., Chernikova I.D., Chernikov M.G. Rozrahnunok ta analiz vakuumnyh system / O.R.Bova, I.D.Chernikova, M.G.Chernikov // Resursozberigajuchi tehnologii' vyrobnyctva ta obrobky tyskom materialiv u mashynobuduvanni: Zb. nauk. pr. Lugans'k: vyd-vo SNU im. V. Dalja, 2010. – с. 193-202.
5. Bova A.R., Voloshyn M.A., Latysh O.B. y dr. Sverhvisokovakuumnyj manipulyator v fotoelektronnoj spektroskopii / A. R. Bova, M. A. Voloshyn, O. B. Latysh, Y. D. Chernykova, N.G.Chernikov // Visnyk SNU im. V. Dalja, sb. nauk. prac'. V 2-h chastjah. Lugans'k: vyd-vo SNU im. V. Dalja, 2010, ch.2. №8 (150) – с. 134-142.
6. Adamchuk V. K., Fedoseenko S. Y., Aleksandrov V. M. Sverhvisokovakuumnaja metallicheskaja ustanovka dlja fotoelektrycheskych yzmerenij v oblasti $h\nu \leq 10,9$ jeV. / V. K. Adamchuk, S. Y. Fedoseenko, V. M. Aleksandrov // PTJe, 1977, №1. – с. 178 – 179.
7. Lukyrskij P. Y. O fotoeffekte / P. Y. Lukyrskij // Lenyngrad – Moskva: RTTYL, 1933. – с. 96.
8. Zashkvara V. V., Yl'yn A. M., Red'kyn V. S. y dr. Cylyndricheskoe zerkalo dlja raznostnyh metodov spektroskopii puchkov zarjzhennyh chastyc. / V. V. Zashkvara, A. M. Yl'yn, V. S. Red'kyn, V. Ja. Kolot, M. Y. Korsunskij // ZhTF, 1976. t. 46. – с. 1759 – 1766.

Черников Н.Г., Черникова И.Д. Высоковакуумный нанометрический комплексный спектрометр.

Потребности техники и технологий привели к резкому ускорению опытно-конструкторских и научно-исследовательских работ для изучения в высоковакуумных среде как поверхностных так и объемных свойств твердых тел. В данной работе предлагается высоковакуумный нанометрический комплексный спектрометр, позволяющий проводить многоцелевые исследования поверхностных и объемных свойств твердых тел в контролируемой среде. Наличие системы напуска газа, ионной и электронной пушки позволяют изменять структурное состояние поверхности исследуемого объекта, а наличие оже-спектрометра контролировать элементный состав на поверхности образцов. Корпускулярная спектрометрия позволяет определить энергетический спектр элект-

тронов, а также определить энергетические параметры исследуемой поверхности, что позволит полученную информацию широко использовать для создания полупроводниковых приборов в микро- и нанoeлектронике.

Ключевые слова: вакуум, фотоспектрометр, вакуумный манипулятор, вакуумный монохроматор, оже-спектрометр.

Chernikov M.G., Chernikova I.D. High vacuum nanometric complex spectrometer.

It is known that from time to time the established sections of science experience periods of spasmodic development due to the emergence of qualitatively new ideas, instruments, and measurement methods. A good example of this is optical spectroscopy, which has changed significantly with the advent of new corpuscular light sources. Along with the intensive development of classical trends, fundamentally new methods and programs arose. The experimental methods of spectroscopy of the surface of solids caused certain requirements for the experimenters - the effectiveness of the information received. The development of complex methods for studying photospectroscopy of the surface of semiconductors made it possible to obtain not only effective photocathodes, but also night-vision devices and solar panels. This could be achieved by solving the needs of equipment and technologies of microelectronics and nanoelectronics, using complex methods for studying the surface of a solid body. The statement of the problem of a comprehensive study of prototypes leads to the need for conscious acceleration of experimental design and scientific research to study in a high-vacuum medium both surface and bulk properties of solids. In this paper, we propose a high-vacuum nanometric complex spectrometer that allows multipurpose studies of the surface and bulk properties of solids in a controlled environment. The presence of a gas inlet system, an ionic and an electron gun make it possible to change the structural state of the surface of the object under study, and the presence of an Auger spectrometer and mass spectrometer to control the elemental composition both on the surface of the samples and in the volume of the measuring chamber of the ultrahigh-vacuum installation. Corpuscular low-energy surface diagnostics of a substance are based on the use of low-energy charged particles and methods of physical electronics and plasma physics in studying the physicochemical properties of a solid surface. In this case, charged low-energy particles can be used as primary particles as particles that probe the surface, and as particles used for secondary surface analysis and which are excited in a solid. Thus, corpuscular spectrometry allows one to determine the energy spectrum of electrons, as well as determine the energy parameters of the investigated surface, and this will allow the information obtained to be widely used to create semiconductor devices in micro- and nanoelectronics.

Keywords: diagnostics, vacuum, photo-spectrometer, vacuum manipulator, vacuum monochromator, Auger spectrometer, diffractometer.

Черніков Микола Григорійович – к.фіз.-мат.н., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк)
chernikov_n_g@ukr.net

Чернікова Ірина Дем'янівна – старший викладач кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк)
chernikova_i_d@ukr.net

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-149-154>

УДК 621.9.06

ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ ANSYS У РОЗРАХУНКАХ НА МІЦНІСТЬ КРУГЛИХ ПРОТЯЖОК

Шумакова Т.О., Ніколаєнко А.П.

APPLICATION OF THE ANSYS SYSTEM IN THE STRENGTH CALCULATIONS OF ROUND BROACHES

Shumakova T.O., Nikolaenko A.P.

У статті наведено результати досліджень тривимірної моделі круглої протяжки профільної схеми різання, що використовується для обробки отвору деталі типу втулка зі сталі 50ХГ діаметром 30Н7^(+0,021) в системі ANSYS. За допомогою інструментів графічного редактора ANSYS SpaceClaim побудовано кінцево-елементну сітку протяжки. У платформі ANSYS Workbench були побудовані епюри еквівалентних напружень по Мізеса і епюри деформацій по осі X. Встановлено, що максимальні еквівалентні напруження мають значення 142,05 МПа і не перевищують допустиме значення 240,45 МПа. З епюр розподілу деформацій встановлено, що максимальне значення становить 0,08 мм. Отримані результати не перевищують поля допуску оброблюваного отвору $\Delta T = 0,021$ мм.

Ключові слова: протяжка, міцність, 3D-модель, метод кінцевих елементів, система ANSYS.

Вступ. Одним з найбільш прогресивних і ефективних методів обробки металів різанням в машинобудуванні є протягання, яке найбільш повно поєднує високу продуктивність і якість обробки з мінімальною собівартістю [1, 2]. Протягання застосовується для попередньої і остаточної обробки як внутрішніх, так і зовнішніх поверхонь різних деталей. При цьому забезпечується стабільне отримання поверхонь деталей високої точності (по 7-6 класів точності) і малої шорсткості ($R_a = 1,25 \dots 2,5$ мкм). Продуктивність методу протягання в 3-12 разів перевищує продуктивність інших технологій механічної обробки металів (стругання, розточування фрезерування, розгортання та ін), а в деяких випадках, наприклад, обробка шліцьових отворів, протягання є єдиною можливою процесом обробки деталей [1].

Операція протягання виконується на протяжних верстатах спеціальним інструментом – протяжкою. Протяжка – це багатолезовий інструмент з рядом послідовно виступають одне над іншим лез в напрямку перпендикулярному до основного руху різання напрямку [1, 2]. Від вибору параметрів конс-

трукції протяжок залежить довжина ріжучої частини і стійкість протяжки, а також якість обробки деталей і техніко-економічні показники операції протягання.

Постановка проблеми. Основними дефектами інструменту в процесі високопродуктивного протягання є посилений знос і поломка зубів протяжки, а також підвищена пружна деформація зубів через посилене навантаження на зуб [3]. Дані фактори призводять до браку через порушення геометрії оброблюваних деталей. Існуючі класичні методи розрахунку протяжки на міцність [1, 2] проводяться з урахуванням тільки двох небезпечних перерізів інструменту (шийка хвостовика та стружкова канавка ріжучої частини), що обумовлено її складною геометрією. Сучасні методи комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану протяжки в процесі різання, такі, наприклад як, ANSYS, SolidWorks, APM WinMachine дозволяють, за допомогою методу кінцевих елементів, кількісно оцінити як параметри міцності так і деформацію інструменту чи оброблюваної деталі під впливом сил різання [4-7]. Разом з тим, саме система ANSYS є найбільш прогресивною, має велику кількість прикладних бібліотек і додатків, завдяки яким якісно і в стислі терміни реалізується процес дослідження інструментів будь якої конструкції.

Мета, предмет і методика досліджень. Ціль досліджень – за допомогою тривимірної моделі протяжки виконати її дослідження на міцність методом кінцевих елементів в системі ANSYS.

Предмет досліджень в даній роботі є – кругла протяжка профільної схеми різання, яку було досліджено шляхом виконання її тривимірної моделі яку було імпортовано в розрахункову систему ANSYS для проведення статичного аналізу.

Методика досліджень полягала в комп'ютерному моделюванні навантажень, що діють на інструмент в процесі протягання деталі типу втулка з

використанням методу кінцевих елементів в системі ANSYS.

Для досягнення поставленої цілі розглянемо в якості прикладу круглу протяжку профільної схеми різання зварної конструкції, що використовується для обробки циліндричного отвору діаметром $D=30H7(^{+0,021})$ мм і довжиною $L=55$ мм у заготовці зі Сталі 50ХГ; $\sigma_B=1270$ МПа, НВ 321 в умовах багатосерійного виробництва.

Матеріал робочої частини протяжки: швидко-ріжуча сталь Р18 (ГОСТ 19265-71) $[\sigma_B]=840$ МПа; щільність – $8,8 \cdot 10^{-6}$ кг мм⁻³. Матеріал хвостовика – сталь 40Х (ГОСТ 4543-71), $[\sigma_B]=980$ МПа; щільність – $7,8 \cdot 10^{-6}$ кг мм⁻³.

Для обробки заготовок обираємо згідно з рекомендаціями, що наведено в [8] горизонтально-протяжний верстат моделі 7520 з максимальним тяговим зусиллям $P_{\max}=200$ кН (допустиме тягове зусилля $[P]=0,85 \dots 0,9 P_{\max}$), з найбільшою довжиною хода повзуна $l_x=1500$ мм, діапазоном швидкостей робочого руху $V=0,6 - 6$ м/хв. Патрон верстату – швидкозмінний автоматичний (ГОСТ 16885-71).

Згідно з методикою, що наведено в [1, 2] були проведені розрахунки значень основних геометричних характеристик протяжки. Деякі з них наведено в табл. 1, 2.

Таблиця 1

Значення діаметрів ріжучих, зачищувальних та калібруючих зубів протяжки, що розглядається

№ зубу	Діаметр, мм	№ зубу	Діаметр, мм
1	28,617	20	29,567
2	28,667	21	29,617
3	28,717	22	29,667
4	28,767	23	29,717
5	28,817	24	29,767
6	28,867	25	29,817
7	28,917	26	29,867
8	28,967	27	29,917
9	29,017	28	29,967
10	29,067	29	29,992
11	29,117	30	30,008
12	29,167	31	30,016
13	29,217	32	
14	29,267	33	
15	29,317	34	
16	29,367	35	
17	29,417	36	
18	29,467	37	
19	29,517	38	

Для розрахунку значень усередненої напруги σ_{pi} (по Мизесу) було використано залежності [1, 2]:

$$\sigma_{pi} = \frac{P_{z \max}}{F_{\min}} \leq [\sigma]_p, \quad (1)$$

Таблиця 2

Значення основних параметрів конструкції протяжки, що досліджується

№ з/п	Найменування параметру	Значення
1	Кроку ріжучих і зачищувальних зубів (нерівномірність кроку)	$t_p = 7,0$ мм
2	Крок калібруючих зубів (нерівномірність кроку $\pm 0,2$ мм)	$t_k = 4,5$ мм
3	Подача ріжучих зубів	$S_1 = 0,025$ мм/зуб
4	Подача зачищувальних зубів	$S_{31} = 0,0125$ мм/зуб $S_{32} = 0,008$ мм/зуб $S_{33} = 0,004$ мм/зуб
5	Число ріжучих зубів	$z_1 = 27$
6	Число зачищувальних зубів	$z_2 = 3$
7	Число калібруючих зубів	$z_k = 8$
8	Передній кут ріжучих і калібруючих зубів, γ	10°
9	Задній кут ріжучих і зачищувальних зубів, α	2°
10	Задній кут калібруючих зубів	1°
11	Довжина різальної частини	$l_p = 210$ мм
12	Довжина калібруючої частини	$l_k = 36$ мм
13	Довжина задньої направляючої	$l_{zn} = 30$ мм
14	Загальна довжина протяжки	$L_0 = 580 \pm 3,15$ мм
15	Максимальне значення головної складової сили різання при протяганні	$P_{z \max} = 108,875$ кН
16	Максимальне значення поперечної складової сили різання при протяганні	$P_y = 92,54$ кН
17	Діаметр шийки хвостовика	$d_2 = 22e11 \begin{pmatrix} -0,095 \\ -0,205 \end{pmatrix}$ мм
18	Площа небезпечного перерізу хвостовика	$F_x = 379,94$ мм ²
19	Площа небезпечного перерізу різальної частини	$F_{pч} = 452,8$ мм ²
20	Опорна площа замкової частини хвостовика	$F_{3x} = 235,5$ мм ²
21	Допустиме напруження матеріалу ріжучої частини протяжки на розрив	$\sigma_{pp} = 240,45$ МПа
22	Допустиме напруження матеріалу шийки хвостовика на розрив	$\sigma_{px} = 286,56$ МПа
23	Допустиме напруження матеріалу хвостовика на зминання	$\sigma_{3m} = 462,31$ МПа

де $F_{\min}$ – площа небезпечного перерізу певної ділянки протяжки, мм² (див. табл. 2); $[\sigma]_p$ – допустиме напруження матеріалу протяжки на розрив, МПа;

P_z – головна складова сили різання при протяганні (рис. 1), Н, розраховувалася за формулою:

$$P_{zi} = \frac{C_p \cdot \pi \cdot D_i \cdot S_{zi}^x \cdot z_{\max} \cdot K_p}{z_c}, \quad (2)$$

C_p – коефіцієнт, що залежить від оброблюваного матеріалу, типу протяжок і схеми різання [2]; D_i – діаметр кожного зубу протяжки, мм; S_{zi} – товщина шару металу, що зрізається кожним зубом протяжки – подача на зуб (для протяжки, що розглядається наведена в табл. 2), мм/зуб; x – показник ступеня, що залежить від характеристик матеріалу деталі, що оброблюється [2]; $z_{\max}$ – найбільше число зубів, що одночасно

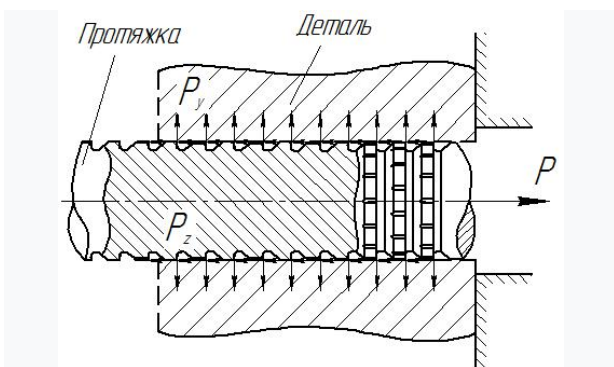


Рис. 1. Схематичне різання при протяганні:
 P – тягове зусилля; P_z – головна (осьова) складова сили різання при протяганні; P_y – поперекісна складова сили різання при протяганні

знаходяться в роботі (табл. 2); z_c – число зубів в секції груповий протягання, у профільних протяжок $z_c = 1$; K_p – поправочні коефіцієнти, що залежить від розміру переднього кута, складу ЗОР і ступеня загострення зубів протяжки [2], у випадку, що розглядається $K_p = 1$.

Поперекісна складова сили різання при протяганні P_y була визначена згідно з залежністю: $P_y = a \cdot P_z$, де a – коефіцієнт, що залежить від подачі на зуб протяжки [2].

Для визначення деформацій по вершині зубу p , мм в роботі [9] запропоновано залежність:

$$p = C_p \cdot S_z^{C_{sp}} \cdot \beta^{C_{\beta p}} \cdot V^{C_{vp}},$$

де C_p , C_{sp} , $C_{\beta p}$, C_{vp} – постійні величини; β – кут загострення, град., V – швидкість різання, м/хв.

За результатами розрахунків була виконана 3D-модель протяжки, що наведено на рис. 2.

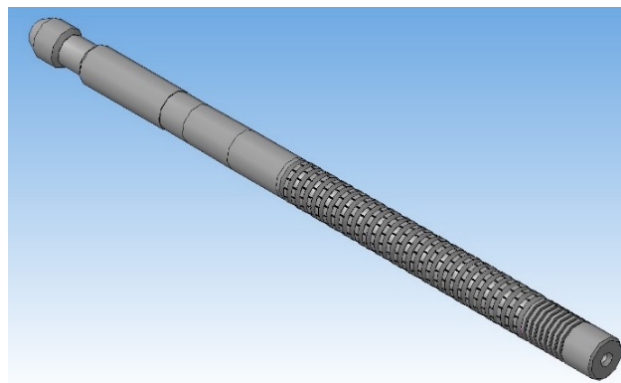


Рис. 2. Тривимірна модель протяжки, що досліджувалась

За допомогою тривимірної моделі протяжки стає можливим виконання методу кінцевих елементів в процесі дослідження цього інструменту на міцність в системі ANSYS.

Застосування системи ANSYS в розрахунках міцності протяжки. Програмний комплекс ANSYS дозволяє методом кінцевих елементів вирішувати стаціонарні і нестационарні, лінійні і нелінійні задачі з таких областей, як механіка деформованого твердого тіла, механіка рідини і газу, теплопередача, електродинаміка [10-13]. При цьому вихідним об'єктом для застосування методу кінцевих елементів є матеріальне тіло (у випадку, що розглядається – кругла протяжка профільної схеми різання), яке розбивається на частини – кінцеві елементи.

Оскільки протяжка має складну, для побудови кінцево-елементної сітки, форму з великою кількістю дрібних елементів, для того, щоб побудувати більш якісну та рівномірну сітку кінцевих елементів тривимірну модель протяжки було поділено на 134 компонента (частини) за допомогою інструментів графічного редактора Ansys SpaceClaim (рис. 3).

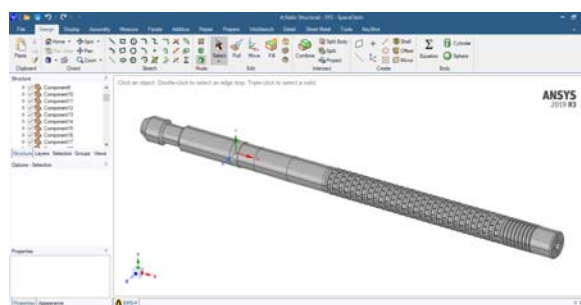


Рис. 3. Результат поділення 3D-моделі протяжки на частини в графічному редакторі Ansys SpaceClaim

Результатом поділення тривимірної моделі протяжки на компоненти була побудова сітки кінцевих елементів, наведеної на рис. 4.

Розрахунки в системі ANSYS можуть проводитися в пакетному Batch або інтерактивному Interactive режимах [13]. ANSYS Workbench – це універсальна платформа для моделювання, що об'єднує всі інструменти інженерного моделювання компанії ANSYS. Конструкційні навантаження на

базі платформи Workbench задаються в розділі Loads панелі інструментів Environment [13].

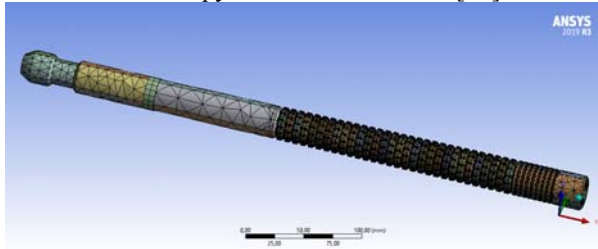


Рис. 4. Результат побудови кінцево-елементної сітки протяжки (кількість вузлів кінцевих елементів 299349; кількість елементів 157993)

Завдання граничних умов (обмежень) – необхідний етап кінцево-елементного аналізу. Граничні умови в Workbench Static Structural задаються в розділі Supports панелі інструментів Environment. Для моделювання закріплення і навантажень протяжки, що досліджується, були використані такі типи навантажень і граничних умов – «Fixed Support», що обмежує для зазначених поверхонь ступеня свободи x , y , z , rot_x , rot_y та rot_z . Для дослідження характеру зміни напруженого стану протяжки до кожного її зуба прикладається головна складова сили різання P_{zi} , що була розрахована за формулою 2, а до хвостовика максимальне тягове зусилля P_{max} , що дорівнює 200 кН .

Результати досліджень. Результати досліджень представлені у вигляді епюр, представлених на рис. 5, 6.

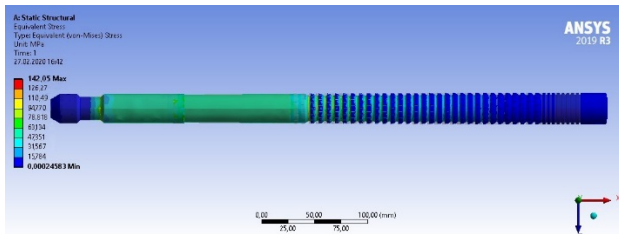


Рис. 5. Епюри еквівалентних напруг по Мізесу

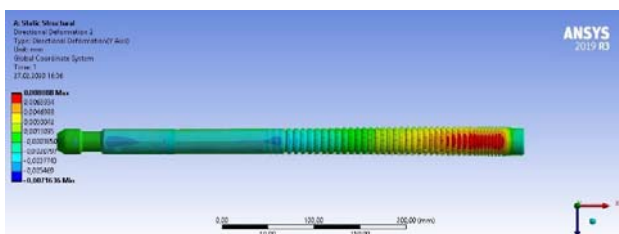


Рис. 6. Епюри деформацій по осі X

Із результатів досліджень міцності протяжки видно, що в процесі різання, при контакті ріжучих зубів з поверхнею оброблюваного отвору виникають значні та не рівномірні напруги і деформації, що не враховуються при виконанні перевірочних розрахунків за формулами опору матеріалів.

Як видно з рис. 5, максимальні еквівалентні напруження склали $142,05\text{ МПа}$ на ріжучій кромці першого зуба, що може призвести до його притуплення. Також спостерігається підвищена напруга на крайках переходу від циліндричної до конічної ділянок хвостової частини, отже, на цих переходах необхідно виконання заокруглень. Всі отримані результати напружень далекі від граничних значень.

З епюр розподілу деформації по осі X (рис. 7) видно, що на ділянці врізання перших зубів протяжки в поверхню оброблюваного матеріалу деформація зростає при врізання кожного наступного зуба та досягає максимальних значень на ділянці врізання 30 зуба і становить $0,008\text{ мм}$. Поступове збільшення деформації відбувається за рахунок теплових явищ. Як видно з епюри (рис. 6), після зняття навантаження, виходу з отвору деталі калібруючої частини протяжки, ріжучі крайки не зайняли свою попередню позицію, оскільки є залишкова деформація, це явище прийнято називати сумарною термічною деформацією [14]. Отримані в результаті досліджень значення зміщення зубів протягання не перевищують поля допуску оброблюваного отвору $\Delta T = 0,021\text{ мм}$, оскільки $2 \cdot 0,008 = 0,016 < 0,021\text{ мм}$.

Висновки

1. Встановлено, що основними дефектами інструменту, що виникають у процесі високопродуктивного протягання є посиленний знос і полумка зубів протяжки, а також підвищена пружна деформація зубів через посилене навантаження на зуб.

2. Побудовано тривимірну модель круглої протяжки профільної схеми різання для її імпортування в розрахункову систему ANSYS.

3. За допомогою інструментів графічного редактора Ansys SpaceClaim було побудовано кінцево-елементну сітку протяжки (кількість вузлів кінцевих елементів 299349; кількість елементів 157993).

4. За допомогою платформи Workbench проведено дослідження міцності та деформацій круглої протяжки профільної схеми різання, що використовується для обробки отвору діаметром $30H7^{(+0,021)}$.

5. Встановлено, що максимальні еквівалентні напруження виникають на ріжучій кромці першого ріжучого зуба протяжки та мають значення $142,05\text{ МПа}$. Також встановлена присутність підвищених напруг на крайках переходу від циліндричної до конічної ділянки хвостової частини, протяжки, однак всі отримані результати напруг далекі від граничних значень.

6. З епюр розподілу деформацій встановлено, що при врізання першого та кожного наступного зуба деформація зростає та досягає максимальних значень на ділянці врізання 30 зуба і становить $0,008\text{ мм}$. Отримані результати не перевищують поля допуску оброблюваного отвору $\Delta T = 0,021\text{ мм}$.

Література

1. Маргулис Д.К. Протяжки для обработки отверстий/ Д.К. Маргулис, М.М. Тверской, В.Н. Ашихмин и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 232 с.

2. Щеголев А.Б. Конструирование протяжек / А.Б. Щеголев. – М.: Машгиз, – 1960. – 352 с.
3. Забезпечення надійності різального інструмента: Навчальний посібник / Ю.О. Харламов, В.І. Соколов, О.С. Кроль та ін. – Северодонецьк: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2019. – 212 с.
4. Krol O., Sokolov V. Rational choice of machining tools using prediction procedures // EUREKA: Physics and Engineering. – N 4. – 2018. – P. 15–20.
5. Krol O.S., Sokolov V.I. Parametric Modeling Of Machine Tools For Designers. – Sofia: Prof. Marin Drinov Academy Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. – 112 p.
6. Лукина С.В. Моделирование и исследование напряженно-деформированного состояния осевых режущих инструментов численным методом конечных элементов в CAD/CAM/CFT/PFM-системе SOLIDWORKS / С.В. Лукина, М. В. Крутякова, М.Р. Рыбакова // Фундаментальные исследования. Технические науки. – М.: Академия Естествознания, 2013. – № 10. – С. 2431–2435.
7. Krol O., Osipov V. Modeling of construction spindle's node machining centre / TEKA Comission of Motorization and Power Industry of Agriculture. – OL PAN, 2013, Vol.13, No 3, Lublin, Poland. – P. 108 – 114.
8. Кацев П.Г. Протяжные станки и работы на них. – М.: Высшая школа, 1981. – 184 с.
9. Степанов А.А., Оценка параметров напряжённо-деформированного состояния инструмента и детали при механической обработке / А.А. Степанов, А.И. Хаймович // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета – 2013. – №4 (42) – С. 255-260.
10. Бруйка В.А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учебное пособие / В.А. Бруйка, В.Г. Фокин, Е.А. Солдусова и др. – Самара: Самар. гос. тех. ун-т, 2010. – 271 с.
11. T. Stolarski, Y. Nakasone, S. Yoshimoto. Engineering analysis with ANSYS software. – Butterworth-Heinemann, UK. – 2018, 553 p.
12. Huei-Huang Lee. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 18. – Department of Engineering science of National Chen Kun University, Taiwan. – 2018, 610 p.
13. Kalinin Ye.I. Osnovy roboty v skinchenno-elementnomu prohrannomu kompleksi ANSYS. Konspekt lektzii. Chastyna 2 – Kharkiv: Vydavnytstvo KhNADU, 2013. – 135 s.
14. Михеева Л.А. Протягивание. – М.: ЦБТИ, 1953. – 122с.
5. Krol O.S., Sokolov V.I. Parametric Modeling Of Machine Tools For Designers. – Sofia: Prof. Marin Drinov Academy Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. – 112 p.
6. Lukina S.V. Modelirovanie i issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya osevyh rezhushchih instrumentov chislennym metodom konechnykh elementov v CAD/CAM/CFT/PFM-sisteme SOLIDWORKS / S.V. Lukina, M.V. Krutyakova, M.R. Rybakova // Fundamental'nye issledovaniya. Tekhnicheskie nauki. – M: Akademiya Estestvoznaniya, 2013. – № 10. – S. 2431–2435
7. Krol O., Osipov V. Modeling of construction spindle's node machining centre / TEKA Comission of Motorization and Power Industry of Agriculture. – OL PAN, 2013, Vol.13, No 3, Lublin, Poland. – P. 108 – 114.
8. Kacev P.G. Protyazhnye stanki i raboty na nih. – M.: Vysshaya shkola, 1981. – 184 s.
9. Stepanov A.A., Ocenka parametrov napryazhyonno-deformirovannogo sostoyaniya instrumenta i detali pri mekhanicheskoy obrabotke / A.A. Stepanov, A.I. Khajmovich // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo ae' rokosmicheskogo universiteta – 2013. – #4 (42) – S. 255-260.
10. Bruyaka V.A. Inzhenernyj analiz v ANSYS Workbench: uchebnoe posobie / V.A. Bruyaka, V.G. Fokin, E.A. Soldusova i dr. – Samara: Samar. gos. tekhn. un-t, 2010. – 271 s.
11. T. Stolarski, Y. Nakasone, S. Yoshimoto. Engineering analysis with ANSYS software. – Butterworth-Heinemann, UK. – 2018, 553 p.
12. Huei-Huang Lee. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 18. – Department of Engineering science of National Chen Kun University, Taiwan. – 2018, 610 p.
13. Kalinin Ye.I. Osnovy roboty v skinchenno-elementnomu prohrannomu kompleksi ANSYS. Konspekt lektsii. Chastyna 2 – Kharkiv: Vydavnytstvo KhNADU, 2013. – 135 s.
14. Mikheeva L.A. Protyagivanie. – M.: CzBTI, 1953. – 122s.

References

1. Margulis D.K. Protyazhki dlya obrabotki otverstij / D.K. Margulis, M.M. Tverskoj, V.N. Ashihmin i dr. – М.: Mashinostroenie, 1986. – 232 s.
2. Shchehovelev, A.B. Konstruyrovanye protiazhek / A.B. Shchehovelev. – М.: Mashhyz, – 1960. – 352 s.
3. Zabezpechennia nadiinosti rizalnoho instrumenta: Navchalnyi posibnyk / Yu.O. Kharlamov, V.I. Sokolov, O.S. Krol ta in. – Severodonetsk: vyd-vo SNU im. V. Dalia, 2019. – 212 s.
4. Krol O., Sokolov V. Rational choice of machining tools using prediction procedures // EUREKA: Physics and Engineering. – N 4. – 2018. – P. 15–20.

Шумакова Т.А., Николаенко А.П. Применение системы ANSYS в прочностных расчетах круглых протяжек.

В статье приведены результаты исследований трехмерной модели круглой протяжки профильной схемы резания, используемой для обработки отверстия детали типа втулка из стали 50ХГ диаметром 30Н7 ($\epsilon^{0,021}$) в системе ANSYS. С помощью инструментов графического редактора ANSYS SpaceClaim построено конечно-элементную сетку протяжки. В платформе ANSYS Workbench построены эпюры эквивалентных напряжений по Мизесу и эпюры деформаций по оси X. Установлено, что максимальные эквивалентные напряжения имеют значение 142,05 МПа и не превышают допустимых 240,45 МПа. Из эпюр распределения деформаций установлено, что максимальное значение деформации зуба протяжки составляет 0,08 мм. Полученные результаты не превышают поля допуска обрабатываемого отверстия $\Delta T = 0,021$ мм.

Ключевые слова: протяжка, прочность, 3D-модель, метод конечных элементов, система ANSYS.

Shumakova T.O., Nikolaenko AP.. Application of the ANSYS system in the strength calculations of round broaches

The article provides an example of designing a round broach with a profile cutting scheme. Its basic geometric parameters, the calculated diameters of the broach cutting, grinding and calibrating teeth, the cutting forces arising during the broaching of the parts hole made of steel 50HG are presented. It has been established that increased wear and breakage of broach teeth and increased elastic deformation of teeth due to increased loads on a tooth are main tool defects arising in a process of high-performance broaching. A three-dimensional geometric model of a round broach of a profile cutting scheme is constructed for its import into the ANSYS calculation system. In order to obtain a well-designed and more uniform finite elements mesh, the three-dimensional round broach model was divided into 134 components with the tools of the graphic editor ANSYS SpaceClaim. In the ANSYS Mechanical application, a finite element broach grid was constructed (the number of nodes of finite elements is 299349, the number of elements is 157993). On the basis of the ANSYS Workbench platform, a study of strength and deformations of the round broach of a profile cutting scheme used to process holes with a diameter of 30H7 ($^{+0,021}$) was made. The results of the studies of the broach strength showed significant but not uniform stresses and strains that arose while cutting in contact of the cutting teeth and the machined hole surface. These stresses and strains are not taken into account when performing verification calculations using the material resistance formulas. Based on the results of studies of the round broach strength and deformations, von-Mises equivalent stress dia-

grams and deformation along the X axis diagrams were constructed on the basis of the ANSYS Mechanical. From the analysis of the obtained diagrams, it was found that the maximum equivalent stresses arise on the cutting edge of the first cutting tooth of the broach and have a value of 142,05 MPa. The presence of increased stresses at the edges of the transition between the broach tail's cylindrical and conical sections was also established, but all the results of the stresses were far from the limiting values. It was found from the diagrams of the distribution of deformations, that when inserting the first and each subsequent tooth, the deformation increases and reaches maximum values 0,008 mm in the section of the insert of the 30 tooth. The results obtained do not exceed the tolerance field of the machined hole $\Delta T = 0,021$ mm.

Keywords: drawing, strength, 3D-model, finite element method, ANSYS system.

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 20.02.2020 р.

ЕКОНОМІЧНІ НАУКИ

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-155-161>

УДК 339.137.2.012.2.23 (477)

КОНКУРЕНТНІ ПЕРЕВАГИ УКРАЇНИ НА СВІТОВИХ РИНКАХ

Гаврюшенко Г.В.

COMPETITIVE ADVANTAGES OF UKRAINE IN THE WORLD MARKETS

Gavrushenko G.V.

У статті описано чинники кризового стану економіки України. Зазначено, що наявний економічний потенціал в країні використовується неефективно. Показано, що Україна має значний експортний потенціал із виробництва різноманітної сільськогосподарської продукції, авіаційної техніки, мікроелектронних технологій, продукції фармацевтичної промисловості, побутової хімії, легкої промисловості. Підкреслено, що Україна належить до країн – світових лідерів за офішорним програмуванням. Акцентовано увагу на тому, що енергозбереження має розглядатися як основна складова політики зміцнення економічної незалежності національної економіки.

Ключові слова: валовий внутрішній продукт, Індекс людського розвитку, ринкова економіка, національна економіка, конкурентні переваги, світові ринки, інноваційний шлях розвитку

Вступ. Після відновлення своєї незалежності в 1991 році Україна здійснювала реформи, які були спрямовані на створення ефективної ринкової економіки. Головними напрямками змін перехідного етапу розвитку країни були суверенізація національної економіки: оформлення її кордонів, визначення реального стану і складу, а із часом і вихід економіки на світові ринки.

Постановка проблеми. Україна – потенційно багата країна. Однак сучасний стан її економіки можна визначити як кризовий: за останні 25 років темпи падіння ВВП є найвищими серед країн світу – мінус 35 %. Причинами цього є як об'єктивні, так і суб'єктивні фактори. Об'єктивні фактори пов'язані з агресією Росії та окупацією частини території нашої держави. Суб'єктивні визначаються тим, що за часів незалежності Україна так і не позбавилася соціалістичної системи господарювання, як це було зроблено у східних країн ЄС (в Польщі, країнах Балтії).

Крім того, суб'єктивними причинами кризового стану економіки України є корупція, непрофесійне управління економікою, відсутність ефективних соціально-економічних реформ.

В Україні (як і в будь-якій іншій країні) склався набір різноманітних чинників, що сприяють її спеціалізації на виробництві певної продукції й наданні певних послуг. Отже, характеристика сучасного стану національної економіки України й визначення конкурентних переваг на світових ринках зумовлюють актуальність теми дослідження.

Аналіз досліджень та публікацій. Оскільки питання визначення конкурентних переваг України на світових ринках є міждисциплінарним, його дослідженню приділяли увагу не лише економісти, але й економ-географи, серед яких Я.Б. Олійник, П.Г. Шищенко, А.В. Степаненко, П.О. Масляк, М.О. Барановський, Л.М. Немець, П.А. Вірченко. Але незважаючи на проведені дослідження, опубліковані роботи, питання конкурентних переваг України на світових ринках зберігає свою актуальність, особливо тому, що процес розвитку господарства є динамічним, й статистичні показники зазнають постійних змін.

Мета статті полягає в окресленні проблем та перспектив розвитку національної економіки України, визначенні чинників конкурентних переваг України на світових ринках, наданні пропозицій щодо пріоритетних для участі в міжнародному поділі праці сфер господарської діяльності в Україні.

Результати досліджень. Станом на 2018 рік ВВП України на душу населення за паритетом купівельної спроможності становив 9,21 тис. доларів (рис. 1).

Для країн, що розвиваються, ВВП на душу населення за паритетом купівельної спроможності

становить 12,51 тис. доларів, для розвинених країн – 51,42 тис. доларів. Експерти Міністерства розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України очікують, що за підсумками 2020 року ВВП країни зросте на 3,1 %, а у 2021 році – на 3,9 % [2]. Разом з тим, на думку експертів, для досягнення стійкого економічного розвитку потрібне зростання щонайменше у 10 – 12 % ВВП мінімум протягом десяти років.

Ще одним комплексним показником, який дає змогу оцінити й порівняти рівень життя людей у різних країнах та регіонах світу є індекс людського розвитку (ІЛР), (рис. 2). Визначаючи ІЛР, враховують такі шість основних показників, як:

- 1) очікувану тривалість життя при народженні, що оцінює довголіття;
- 2) рівень грамотності дорослого населення країни, який передбачає середню кількість років, затрачених на навчання, очікувану тривалість навчання та рівень професійної освіти;
- 3) рівень життя, який оцінюється через реальний дохід на душу населення в доларах США;
- 4) індекс соціально-економічної нерівності, тобто співвідношення доходів найбагатших та найбідніших верств населення (за 10-бальною шкалою);
- 5) індекс гендерної нерівності, тобто нерівність прав чоловіків та жінок у суспільстві;
- 6) індекс бідності, що показує частку людей, які проживають за межею бідності.

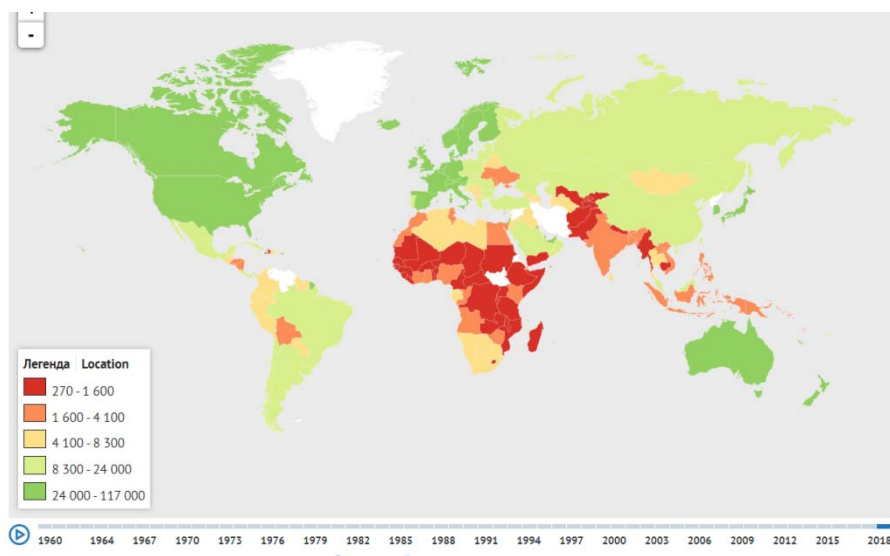


Рис. 1. ВВП на душу населення за паритетом купівельної спроможності (дол. США на особу) у 2018 р. [1]

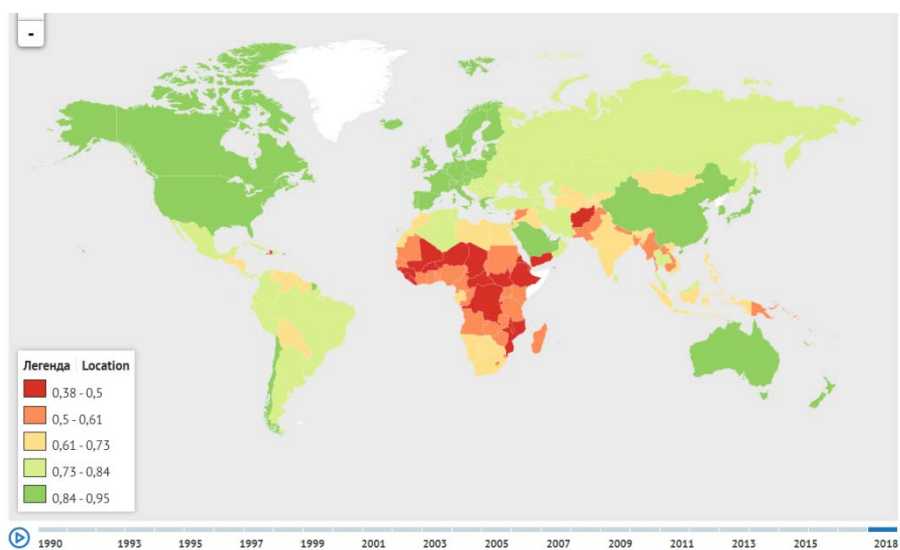


Рис. 2. Індекс розвитку людського потенціалу у 2018 р. [1]



Рис. 3. Місце України у світових рейтингах у 2018 р.



Рис. 4. Конкурентні переваги України на світових ринках

ІЛР в Україні у 2018 р. становив 0,75, тоді як майже у всіх країнах-сусідах України цей показник вище, а саме: у Російській Федерації та Білорусі – 0,82; у Польщі – 0,87; у Словаччині – 0,86; в Угорщині – 0,84; у Румунії – 0,82. Лише у Молдові ІЛР становив 0,71.

Місце України у світовому рейтингу наочно ілюструє також й рис. 3. Як видно із рис. 3, у 2018 р. за рівнем ВВП (ПКС) на одну особу Україна посіла 111-те місце у світі. Ще раз наголошуємо, що низьким є Індекс людського розвитку (ІЛР) – 88 місце серед 189 країн світу. За показником «тривалість життя» Україна взагалі знаходиться між такими країнами, як Суринам та Тринідад і Тобаго. Наведені дані є свідченням неефективного використання наявного в Україні економічного потенціалу.

Кожна країна має переваги у виробництві певної продукції. Конкурентні переваги України на світових ринках представлено на рис. 4.

Так, завдяки комфортним природним умовам і багатим земельним ресурсам Україна має значні переваги у виробництві різноманітної сільськогоспо-

дарської продукції, що не лише може забезпечувати населення нашої держави якісними продуктами, а й становить значну частку в зовнішній торгівлі України. Частка сільського господарства в структурі ВВП України становить 14,4 %.

За посівними площами лідером є пшениця, кукурудза та гречка. Провідними технічними культурами в Україні, під якими зайнято найбільше ріллі, є соняшник, соя, ріпак та цукровий буряк.

З експортом меду Україна увійшла на європейський ринок.

Щодо продукції тваринництва, слід зазначити, що у сучасних умовах найбільш конкурентоспроможним на зовнішньому ринку є українське птахівництво.

Однак недоліком вітчизняного ринку сільськогосподарської продукції є те, що на експорт іде переважно дешева сировина, а не дорогі продукти її переробки.

Місце України на світовому ринку продовольства ілюструє рис. 5.



Рис. 5. Місце України на світовому ринку продовольства, 2016 р.

Значні конкурентні переваги Україна також має й на світових ринках рудної сировини. Це видобуток титану, цирконію, урану, літію, марганцевої (видобувають понад 42 % світових запасів) та залізної руди.

Українська нерудна сировина (графіт, каолін, бурштин, флюсові вапняки, сірка, калійні солі) також конкурентоспроможна й користується попитом на світовому ринку.

Щодо світового ринку металів, то переваги України очевидні: близько 45 % вартості всього експорту країни становить чорна металургія. Разом з тим, у зв'язку з військовим конфліктом на Донбасі та зменшенням попиту на сталь на світовому ринку конкурентні переваги України знизилися, однак все одно за експортом чорних металів країна продовжує займати провідне місце у структурі зовнішнього товарообігу.

Машинобудування, точніше сучасність напрямів і технологій його розвитку, є показником розвитку економіки. Здавалося б, активний розвиток сільськогосподарської техніки, але тут ми суттєво програємо. Автомобілебудування України хоча і розвивається в тісній кооперації з провідними автомобілебудівними компаніями світу, але переживає не найкращі часи. За останні десятиліття в автомобільній промисловості України було втрачено 40 тис. робочих місць та близько 200 тис. – у суміжних галузях. Причинами кризового стану автомобілебудування України є: фінансово-економічна криза 2008 р., торгівельна війна 2012 р. з боку Росії, скасування нею ж транзиту експортної продукції до Кавказу та Середньої Азії, погіршення програми кредитування фізичних осіб, припинення збирання марок Geely, Chery та Daewoo, чий двигуни не відповідали екологічним стандартам Євро-5, схеми імпорту авто з іноземною реєстрацією.

Завод «Єврокар» залишився єдиним виробником легкових авто (авто марки Skoda, вироблені методом великовузлової зборки, Закарпаття). ЗАЗ, «Богдан Моторс» та КрАЗ повністю зупинили виробництво легкових авто, а обсяги виробництва на

«Єврокарі» впали до кількох сотень авто на рік за рахунок підтримки материнських компаній.

Виробництво автобусів також вимірюється першими сотнями. Їх випускають «ЗАЗ», корпорація «Богдан», Чернігівський автозавод корпорації «Еталон», «Часовоярські автобуси», «Черкаський автобус». Кілька сотень комерційних автомобілів було вироблено на «ЗАЗі» та заводі «Черкаський автобус». Становище у виробництві автобусів та вантажних машин є трохи менш скрутним через меншу залежність від конвеєрного методу.

Галузь українського машинобудування для АПК, як було зазначено вище, перебуває у стані стагнації. Розроблено програми часткової компенсації вартості сільськогосподарської техніки та обладнання вітчизняного виробництва, стимулювання оновлення технічного парку за рахунок удосконалення фінансового лізингу, здешевлення середньотривалих кредитів.

Комісія при Мінекономрозвитку затвердила перелік сільськогосподарської техніки українського виробництва, 20 % вартості якої компенсується за рахунок коштів державного бюджету. До зазначеного переліку увійшло 40 українських виробників, зокрема, ПАТ «Харківський тракторний завод», ДП «ВО Південний машинобудівний завод ім. Макарова», ТОВ «НВП БілоцерківМАЗ», ПАТ «Бердянські жнивирки», ТОВ «Оріхівсільмаш», ТОВ «Союз-спецтехніка» та ін. Проблема залишаються нерентабельні схеми закупівель і низька інноваційна якість продукції.

Лише у виробництві авіаційної техніки Україна має значні експортні переваги. Цьому сприяє потужний виробничий та науково-конструкторський потенціал країни. В Україні забезпечено повний цикл виробництва літаків – від проектування до серійного виробництва та комплексного післяпродажного обслуговування. Разом з тим слід зауважити, що авіабудування в Україні, не зважаючи на те, що належить до галузей, які визначають конкурентні переваги України на світових ринках, все ж таки має багато проблем. Це: недостатнє фінансування, конкуренція на світовому ринку, відсутність кваліфікованих кадрів, невідпрацьована мережа сервісного об-

слуговування літаків, застарілі виробничі потужності. Розвитку авіабудування покликані сприяти зміни до Закону України «Про розвиток літакобудівної промисловості», які передбачають звільнення галузі від податків до 1 січня 2025 року.

Певні конкурентні переваги має Україна і у найменшій підгалузі машинобудування – виробництві електронної та оптичної продукції. 48 % української електронної продукції сьогодні йде на експорт у понад 100 країн світу. Розширення української електронної промисловості може відбуватися шляхом створення технопарків і технополісів.

Швидко і стабільно розвивається фармацевтична промисловість України, маючи значний простір для розширення своєї діяльності. ТОП-6 українських виробників: «Фармак», «Дарниця», НВЦ БХФЗ, «Артеріум», KB3 та Sanofi (Україна). Виробництва розташовані у найбільших містах країни. Разом з тим слід зауважити, що майже 93 % експорту української фармацевтичної продукції припадає на країни СНД. Імпорт ледве перевищує 4 %. Причина такого явища в тому, що у структурі продукції галузі все ще недостатньо наукоємної, високотехнологічної продукції, яка б відповідала сучасним міжнародним стандартам. Для цього слід виділяти значні кошти на інноваційні дослідження, як роблять західні фармацевтичні компанії. Отже найбільшим фармацевтичним компаніям України варто об'єднуватися в корпорації та концерни для концентрації капіталу.

Зростають обсяги та розширюється географія поставок продукції побутової хімії на світовий ринок. Основний обсяг продажів побутової хімії становлять пральні порошки, засоби для чищення твердих поверхонь і миття посуду. Абсолютними лідерами залишаються ТНК Proctor & Gamble, Henkel, Unilever і SC Johnson, які виробляють близько 69 % всієї продукції. До ТОП-20 входять дві українські компанії: «Слобожанський миловар» (абсолютний монополіст на ринку твердого мила) і Запорізький ОЖК. Активно входять на ринок невеликі виробники еко-сегмента під власними марками.

На сучасному етапі легка промисловість України тільки починає вихід із занепаду. Не сприяють розвитку галузі «секонд-хенди». Виробництва галузі легкої промисловості мають певні «гендерні» особливості: переважна частина зайнятих – жінки, що є суттєвим чинником можливості поширення виробництв у невеликих населених пунктах. Маленькі виробники все активніше виходять на ринок, особливо в інтернет-продажах.

У швейній промисловості України найбільший розвиток отримала схема виробництва із використанням давальницької сировини. Так, в Україні шують одяг світових торгових марок «Zara», «Next», «Benetton», «Esprit», «NewLook», «TopShop», «MaxMara», бо пошиття одягу в Україні у 2017 р. було у 4 рази дешевше, ніж у Китаї.

Значну роль на ринку одягу відіграє малий бізнес. Прикладами виробництва брендового одягу в Україні можуть бути невеликі компанії

«KozzachkabyAnyako» (Житомир), дизайн-студія «Svitlo» (Київ), «TimeofStale» (Харків) тощо. Якісний чоловічий одяг виробляє «ВЕЛС Україна» (Миргород), дитячий – фабрика «Бембі» (Хмельницький), трикотаж – фабрика «Коста» (Горішні Плавні) тощо. Отже, вітчизняна швейна промисловість має перспективи виробляти товари з високою доданою вартістю (дизайн).

Україна вже вийшла на світовий ринок з окремими видами харчових продуктів й має великий потенціал для подальшого розширення асортименту якісної продукції, спрямованої на експорт. В країні значного рівня розвитку набуло олійно-жирове виробництво: Україна є одним із світових лідерів з виробництва соняшникової олії й посідає 1-ше місце в світі за її експортом. Найбільшим виробником соняшникової олії в країні є компанія «Сантрейд» (Дніпро), яка випускає олію під торговою маркою «Олейна».

Одне з найважливіших у харчовій промисловості України – виробництво кондитерських виробів, у якому працює близько 800 підприємств. Продукція експортується до більш ніж 50 країн світу. Частка України на світовому ринку кондитерських виробів досягає 1 %. Найбільші кондитерські підприємства України: Roshen (фабрики в Києві, Вінниці, Маріуполі, Кременчуці, є філії у Литві), ЗАТ «АВК» (головний офіс у Києві, фабрики в Дніпрі, Мукачеві), ЛКФ «Світоч» (Львів; контрольним пакетом акцій володіє швейцарська корпорація Nestle), ЗАТ «Крафт Фудз Україна» (є частиною компанії США, Тростянець Сумської області, філія у Вишгороді під Києвом).

Основною особливістю сучасного вітчизняного ринку продуктів харчування є панування на ньому монополістів як у виробництві, так і в реалізації готової продукції, існування посередників у процесі пересування товару від виробника до споживача. Унаслідок цього ціни на окремі продукти харчування, незважаючи на низькі зарплати в країні, часто вищі, ніж у розвинених країнах Заходу.

Механізмом економічного розвитку цього сегмента виробництва має стати перехід галузі на інноваційний соціально-орієнтований шлях розвитку. Створення зони вільної торгівлі з ЄС може сприяти збільшенню виробництва харчової та легкої промисловості в чотири рази. 1 лютого 2018 року Україна стала повноправним членом Конвенції Пан-Євро-Мед, що дасть змогу вітчизняним виробникам вбудуватися в європейські виробничі ланцюги (українські товари, виготовлені з іноземної сировини, можуть експортуватися до ЄС за нульовою ставкою).

Транспортні послуги – одні з найважливіших у міжнародних економічних зв'язках України. Вигідне географічне положення України зумовлює проходження її територією чотирьох з десяти європейських міжнародних транспортних коридорів (МТК).

Україна також належить до європейських світових лідерів за офшорним програмуванням. Країна має висококваліфікованих спеціалістів у галузі ІТ-

технологій. Їх чисельність становить приблизно 100-200 тис. осіб (один із найвищих показників у Європі). Галузь продовжуватиме зростати; аутсорсинг програмного забезпечення залишатиметься домінуючою бізнес-моделлю. За прогнозами 2020 р., кількість спеціалістів галузі зросте до 200 тис. осіб, експорт послуг становитиме 6 млрд дол., а частка галузі у ВВП країни – 5 % ВВП.

Україна має значний рекреаційно-туристичний потенціал та величезні перспективи для його розвитку: значні запаси мінеральних вод і лікувальних грязей, природні, історичні й культурні пам'ятки. Так, у 2013 р. на сесії Генеральної Асамблеї Всесвітньої Федерації водо- та кліматолікування у Греції курорт «Миргород» отримав вищу нагороду спільноти фахівців курортної справи – звання «Кращого курорту світу».

За оцінкою фахівців, близько 40 % території країни може бути залучено як основа для рекреаційних послуг.

В Україні зосереджено чимало територій і об'єктів, які мають значний містичний імідж, демонічну славу по всьому світу. Величезну притягальну силу має Чорнобильська зона і мертве місто, місто-фантом Прип'ять. Тут поблизу 4-го реактора АЕС можна спорудити чи переобладнати з покинутих приміщень найдорожче на Землі казино. Зловісна світова слава цього місця, помножена на свідомо сформовані та поширювані міфи і легенди про «богом прокляте місце», силові поля Землі, розломи в її корі тощо, можуть принадажувати сюди на короткий термін людей з авантюристичним складом мислення, яких чимало серед успішних бізнесменів.

Однак для реалізації потенціалу рекреаційного туристичного комплексу в Україні потрібно здійснити певні заходи, а саме: забезпечити системну і якісну державну підтримку галузі; створити розвинену інфраструктуру; забезпечити комфортні та безпечні умови для приїзду туристів в Україну; розвивати інформаційну, рекламну й маркетингову діяльність у туристичній сфері; забезпечити відновлення та поліпшення стану визначних пам'яток культур; створити нові об'єкти масового туризму. Внесення змін до законів про землекористування, правил видачі дозволів для організації суміжних галузей допоможе залучити інвестиції у створення нових робочих місць для відпочинку.

Висновки. Оцінка стану економіки України з точки зору головних експортних галузей дозволяє дійти висновку, що конкурентні переваги на світових ринках Україна має у таких секторах, як:

- сільське господарство;
- машинобудування;
- технічне обслуговування та ремонт повітряних суден;
- виробництво запчастин та комплектуючих виробів для аерокосмічної та авіаційної промисловості;
- харчова промисловість;
- інформаційні та комунікаційні технології (ІКТ);

- креативні послуги, які представлені дизайном, індустрією моди тощо;
- туризм (особливо еко-туризм, екстремальний, культурний, діловий, освітній).

Крім того, важливе значення в подальших структурних змінах має посісти поширення ресурсо- та енергозберігаючих виробництв (технологій). Зважаючи на зростання вартості енергетичних ресурсів і низький рівень самозабезпеченості ними української економіки, енергозбереження має розглядатися як основна складова політики зміцнення економічної незалежності національної економіки, збереження та підвищення конкурентоспроможності українських виробників.

Література

1. Knoema. Безкоштовна платформа відкритих статистичних даних. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://knoema.ru>
2. Барановський М.О. Економічна та соціальна географія України. Реальний сектор економіки: навч. посіб. / М.О. Барановський. – Ніжин: Видавець «Лисенко М.М.», 2018. – 376 с.
3. Географія: навч. посіб. / Я.Б. Олійник, П.Г. Шищенко, А.В. Степаненко, П.О. Масляк. Київ: Т-во «Знання»; КОО, 2006. – 455 с.
4. Голиков А.П., Грицак Ю.П., Казакова Н.А., Сидоров В.И. География мирового хозяйства: Учебное пособие. / А.П. Голиков, Ю.П. Грицак, Н.А. Казакова, В.И. Сидоров. – К.: Центр учебной литературы, 2008. – 192 с.
5. Немець Л.М., Сільченко Ю.Ю., Вірченко П.А. Економічна і соціальна географія України. Навчальний посібник. / Л.М. Немець, Ю.Ю. Сільченко, П.А. Вірченко. – Харків, 2014. – 265 с.
6. Соціально-економічний розвиток України за січень 2020 року [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/infografika/2020/soc_ek_r_Ukr/soc_ek_r_Ukr_01_2020.pdf.

References

1. Knoema. Bezkoshtovna platforma vidkritih statistichnih danih. [Elektronij resurs]. – Rezhim dostupu: <https://knoema.ru/>.
2. Baranovskij M.O. Ekonomichna ta social'na geografija Ukraïni. Real'nij sektor ekonomiki: navch. posib. / M.O. Baranovskij. – Nizhin: Vidavec' «Lisenco M.M.», 2018. – 376 s.
3. Geografija: navch. posib. / Ja.B. Olijnik, P.G. Shishhenko, A.V. Stepanenko, P.O. Masljak. Kiïv: T-vo «Znannja»; KOO, 2006. – 455 s.
4. Golikov A.P., Gricak Ju.P., Kazakova N.A., Sidorov V.I. Geografija mirovogo hozjajstva: Uchebnoe posobie. / A.P. Golikov, Ju.P. Gricak, N.A. Kazakova, V.I. Sidorov. – K.: Centr uchebnoj literatury, 2008. – 192 s.
5. Nemeć L.M., Sil'chenko Ju.Ju., Virchenko P.A. Ekonomichna i social'na geografija Ukraïni. Navchal'nij posibnik. / L.M. Nemeć, Ju.Ju. Sil'chenko, P.A. Virchenko. – Harkiv, 2014. – 265 s.
6. Social'no-ekonomichnij rozvitok Ukraïni za sichen' 2020 roku [Elektronij resurs]. – Rezhim dostupu: http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/infografika/2020/soc_ek_r_Ukr/soc_ek_r_Ukr_01_2020.pdf.

Гаврюшенко А.В. Конкурентные преимущества Украины на мировых рынках

В статье описано факторы кризисного состояния экономики Украины. Отмечено, что имеющийся экономический потенциал в стране используется неэффективно. Показано, что Украина имеет значительный экспортный потенциал по производству разнообразной сельскохозяйственной продукции, авиационной техники, микроэлектронных технологий, продукции фармацевтической промышленности, бытовой химии, легкой промышленности. Подчеркнуто, что Украина принадлежит к странам – мировым лидерам по оффшорному программированию. Акцентировано внимание на том, что энергосбережение должно рассматриваться как основная составляющая политики укрепления экономической независимости национальной экономики.

Ключевые слова: валовой внутренний продукт, индекс человеческого развития, рыночная экономика, национальная экономика, конкурентные преимущества, мировые рынки, инновационный путь развития

Gavrushenko G. Competitive advantages of Ukraine in the world markets

The article focuses on the fact that the general crisis state of the Ukrainian economy is determined by both objective and subjective factors. It is noted that the main indicators of socio-economic development of the country are GDP per capita and the Human Development Index. It is shown that in Ukraine their value is lower than in many other countries of the world, primarily, neighboring countries. This is evidence of the inefficient use of the economic potential in Ukraine. It is emphasized that Ukraine is ahead of a number of highly developed countries in the variety and richness of its mineral resource base. The country has significant competitive advantages in the production of various agricultural products. It is shown that Ukraine has a significant export potential for the production of aircraft. It is noted that the automotive industry

of Ukraine is developing in close cooperation with the leading automotive companies in the world, but is going through hard times. It turned out that Ukraine belongs to the few countries of the world that possess microelectronic technologies. It was established that the pharmaceutical industry of Ukraine is developing rapidly and has significant space for expanding this activity. Almost 93 % of all imports of the Ukrainian pharmaceutical industry are in the CIS countries. It is shown that Ukraine successfully enters the European market with household products. It is noted that now in Ukraine light industry works using tolling raw materials. A significant role in the national clothing market is played by small businesses. It was found that the features of the modern food market in Ukraine are the dominance of monopolists and intermediaries on it, as well as inflationary price increases. It is noted that Ukraine is successfully integrating into the global transport network: out of ten European international transport corridors, four pass through its territory. It is emphasized that Ukraine belongs to the countries - world leaders in offshore programming. It is shown that Ukraine has significant recreational and tourist potential, but its use is not satisfactory and needs investment. Attention is focused on the fact that energy conservation should be considered as the main component of the policy of strengthening the economic independence of the national economy.

Keywords: gross domestic product, human development index, market economy, national economy, competitive advantages, world markets, innovative development path.

Гаврюшенко Ганна Володимирівна – к.е.н., доцент кафедри географії, Луганський національний університет імені Тараса Шевченка (м. Старобільськ) superanna@ukr.net

Стаття подана 14.02.2020 р.