

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

ВІСНИК

**Східноукраїнського
національного університету
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**№ 7 (237)
2017**

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Сєвєродонецьк 2017

ВІСНИК

СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

№7 (237) 2017

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ЗАСНОВАНО У 1996 РОЦІ

ВИХІД З ДРУКУ - ВІСІМНАДЦЯТЬ РАЗІВ НА РІК

Засновник

Східноукраїнський національний університет
імені Володимира Даля

Журнал зареєстровано
в Міністерстві юстиції України

Свідоцтво про державну реєстрацію

серія KB № 15607-4079ПР

від 18.08.2009 р.

VISNIK

OF THE VOLODYMYR DAHL EAST
UKRAINIAN NATIONAL UNIVERSITY

№7 (237) 2017

THE SCIENTIFIC JOURNAL

WAS FOUNDED IN 1996

IT IS ISSUED EIGHTEEN 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, економічних та історичних наук відповідно.

ISSN 1998-7927

Головна редакційна колегія:

Поркуян О.В., докт. техн. наук (головний редактор),
Голубенко О.Л., член-кор. Академії педагогічних наук,
докт. техн. наук (заступник головного редактора),
Марченко Д.М., докт. техн. наук (заступник головного
редактора),
Бузько І.Р., докт. екон. наук, (заступник головного
редактора),

Архипов О.Г., докт. техн. наук,
Глікін М.А., докт. техн. наук,
Горбунов М.І., докт. техн. наук,
Рач В.А., докт. техн. наук,
Рязанцев О.І., докт. техн. наук,
Смолій В.М., докт. техн. наук,
Соколов В.І., докт. техн. наук,
Стенцель Й.І., докт. техн. наук,
Суворін О.В., докт. техн. наук,
Татарченко Г.О., докт. техн. наук,
Чернецька-Білецька Н.Б., докт. техн. наук,
Харламов Ю.О., докт. техн. наук,

Даніч В.М., докт. екон. наук,
Заблюцька І.В., докт. екон. наук,
Костирко Л.А., докт. екон. наук,
Рамазанов С.К., докт. техн. наук, докт. екон. наук,
Чернявська Є.І., докт. екон. наук,
Овчаренко Є. Ю., докт. екон. наук,
Д'яченко Ю.Ю., докт. екон. наук,
Войтович Л.В., докт. іст. наук,
Дьомін О.Б., докт. іст. наук,
Михайлюк В.П., докт. іст. наук,
Сергієнко Ю.Г., докт. іст. наук,
Стяжкіна О.В., докт. іст. наук,
Чернявський Г.Й., докт. іст. наук,
Якунін В.К., докт. іст. наук,
Новіков В.П., докт. хім. наук,
Кондратов С.О., докт. хім. наук,
Галстян Г.А., докт. хім. наук,
Галстян А.Г., докт. хім. наук,
Потапенко Е.В., докт. хім. наук,
Голосман Є.З., докт. хім. наук

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

Рекомендовано до друку Вченою радою Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Протокол № 2 від 27 жовтня 2017 р.)

Матеріали номера друкуються мовою оригіналу.

© Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, 2017
© Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2017

ЗМІСТ

Кроль О.С., Кузовов А.Ю., Суржиков С.Н. ИССЛЕДОВАНИЕ И 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВОРОТНОГО СТОЛА ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА	5
Кроль О.С., Фиронов Д.В., Великоцкий В.В. ИССЛЕДОВАНИЕ И 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧЕРВЯЧНОЙ ПЕРЕДАЧИ ПРИВОДА ПОДАЧ ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА	12
Кроль О.С., Кадаффи М.С., Бойчук Д.А., Дерябин И.А. ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ ВИНТ-ГАЙКА КАЧЕНИЯ ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА В АРМ WINMACHINE	19
Логунов А. Н. ДВУХПРИЗНАКОВОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПЕРФОРАЦИОННОГО МАРКЕРА	30
Мищук А.В. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ И КОНСТРУКТОРСКИЙ МОНИТОРИНГ, КОМПОНЕТИКА И 3D ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГИБРИДНЫХ ВИБРОСТАНКОВ, РЕГЛАМЕНТ И ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ МУЛЬТИЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ОТДЕЛОЧНО-ЗАЧИСТНОЙ ВИБРООБРАБОТКИ.....	33
Николаенко А.П., Шумакова Т.А. Романченко А.В., Таванюк Т.Я. ПРИМЕНЕНИЕ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПОД ПОКРЫТИЯ	51
Романченко А.В., Николаенко А.П., Таванюк Т.Я., Шумакова Т.А. ПРИМЕНЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ, ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ПРОЦЕССЕ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ.....	56
Соколов В.І., Степанова О.Г., Степчук Я.І., Кавун Д.Ю., Ткаченко М.К. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ОБЛАДНАННЯМ З ГІДРОПРИВОДОМ ОБЕРАЛЬНОГО РУХУ	63
Соколов В.І., Соколова Я.В. АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ОБЛАДНАННЯМ З ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНИМ ПРИВОДОМ	71
Соколов В.И. ИССЛЕДОВАНИЕ НАЧАЛЬНЫХ ЭТАПОВ ДИФфуЗИИ АЭРОЗОЛЕЙ В КАНАЛАХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ	80
Таванюк Т.Я., Николаенко А.П., Романченко А.В., Шумакова Т.А. ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ СЛЕДЯЩИХ ПРИВОДОВ.....	89
Ткачѳв Р.П., Мелконов Г.Л. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА	95
Харламов Ю.А. УПРАВЛЯЕМОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ	101
Харламов Ю.А. РАЗВИТИЕ ДЕТОНАЦИОННО-ГАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	114
Черников Н. Г., Черникова И. Д. ИССЛЕДОВАНИЕ АДсорбЦИИ ГЕРМАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ ФОТОЭМИССИОННЫМ МЕТОДОМ.....	133
Шумакова Т.А., Николаенко А.П., Романченко А.В., Таванюк Т.Я. ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ.....	139

CONTENTS

Krol O., Kuzovov A., Surzhikov S. STUDY AND 3D-MODELING OF THE ROTARY TABLE OF THE MACHINING CENTER.....	5
Krol O., Fironov D., Velikotsky V. RESEARCH AND 3D-MODELLING OF WORM GEAR OF THE FEED DRIVE FOR THE WORKING CENTER.....	12
Krol O., Kadaffi M., Boychuk D., Deryabin I.A. RESEARCH AND MODELLING OF ROLLING SCREW-NUT FOR THE MACHINING CENTER IN APM WINMACHINE	19
Logunov O.M. TWO-SIGNIFICANT RECOGNITION OF PERFORATIVE MARKER IMAGE.....	30
Mitsyk A.V. TECHNOLOGICAL AND DESIGN MONITORING, COMPOSITION AND 3D VISUALIZATION OF HYBRID VIBRATION MACHINES, REGULATION AND IMPLEMENTATION EXPERIENCE OF MULTIENERGY TECHNOLOGIES OF FINISHING-GRINDING VIBRATION PTREATMENT	33
Nikolaenko A.P., Shumakova T.A., Romanchenko A.V., Tavanyuk T.Y. APPLICATION OF VIBRATION TREATMENT FOR PREPARING SURFACES OF DETAILS FOR COVERING	51
Romanchenko A.V., Nikolaenko A.P., Tavanyuk T.Y., Shumakova T.A. APPLICATION OF CHEMICAL, ELECTROCHEMICAL AND ELECTROPHYSICAL METHODS IN PROCESS OF VIBRATION TREATMENT OF DETAILS.	56
Sokolov V.I., Stepanova O.G., Stepchuk Ya.I., Kavun D.Yu., Tkachenko M.K. DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT WITH ROTARY MOTION HYDRAULIC DRIVE.....	63
Sokolov V.I., Sokolova Ya.V. AUTOMATION OF CONTROL PROCESSES OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT WITH ELECTRO-HYDRAULIC DRIVE	71
Sokolov V.I. RESEARCH OF INITIAL STAGES OF AEROSOLS DIFFUSION IN THE CHANNELS OF VENTILATION SYSTEMS.....	80
Tavanyuk T.Y., Nikolaenko A.P., Romanchenko A.V., Shumakova T.A. ESTIMATION OF THE ADEQUACY OF MATHEMATICAL MODELS OF CHARACTERISTICS OF ELECTROHYDRAULIC SERVO DRIVES.....	89
Tkachev R., Melkonov G. IMPROVING THE EFFICIENCY OF PROCESSING MATERIALS USING THE BLADE TOOL	95
Kharlamov Y.A. CONTROLLED INITIATION OF A GASEOUS DETONATION	101
Kharlamov Y.A. DEVELOPMENT OF GASEOUS DETONATION TECHNOLOGIES	114
Chernskov N. G., Chernikova I. D. INVESTIGATION OF GERMAN ADSORPTION TO THE SURFACE OF ARSENIDE OF GALLIUM BY PHOTOEMISSION METHOD	133
Shumakova T.A., Nikolaenko A.P., Romanchenko A.V., Tavanyuk T.Y. INCREASE OF PERFORMANCE OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF VIBRATION TREATMENT OF DETAILS.....	139

УДК 621.9.06

ИССЛЕДОВАНИЕ И 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВОРОТНОГО СТОЛА ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА

Кроль О.С., Кузовов А.Ю., Суржиков С.Н.

STUDY AND 3D-MODELING OF THE ROTARY TABLE OF THE MACHINING CENTER

Krol O., Kuzovov A., Surzhikov S.

В статье рассмотрена конструкция и кинематика обрабатывающего центра, оснащенного универсальным поворотным столом с двумя осями вращения. Дана оценка динамических характеристик механизма поворота с использованием приспособлений спутников. Реализована процедура построения 3D- модели поворотного стола привода подачи обрабатывающего центра ОЦЗВ в интегрированной системе КОМПАС - 3D с использованием прикладных библиотек и инструментария параметризации.

Ключевые слова: обрабатывающий центр, механизм поворота, поворотный стол, 3D- модель

Введение. В современном станкостроении увеличивается доля программно-управляемых обрабатывающих центров фрезерно-сверлильно-расточной группы, реализующих производство разнообразных конструкций со сложными формообразующими движениями. Эффективность процесса изготовления сложных деталей с пространственными поверхностями зависит от конструкции поворотного стола, на который устанавливаются заготовки различной формы. Все чаще эти станки оснащаются дополнительной модульной оснасткой, расширяющей технологические возможности этого оборудования.

Постановка проблемы. Реализация процесса формообразования заготовок сложной конфигурации, предполагает не только выбор оптимальных режимов резания и применения эффективных режущих инструментов, но и современных конструкций механизмов, реализующих движение подачи в условиях многокоординатной обработки. Перспективными в этом плане являются поворотные столы с горизонтальной и вертикальной осью вращения. Для оценки характеристик жесткости и точности этих станочных компонентов необходимо

построение трехмерных моделей и исследование их в современных CAD/CAM/CAE системах.

Анализ последних исследований и публикаций. В работах Решетова Д.Н., Каминской В.В., Портман В.Т. рассмотрены проблемы анализа конструкций и особенностей проектирования несущих систем станков и их модульной оснастки [1, 2, 3]

Эффективность процесса создания металлорежущих станка зависит от уровня качества формообразующих узлов [4]. Как известно, доля упругих деформаций элементов несущей системы, в состав которой входит поворотный стол станка составляет от 30 до 60 % общей величины податливости конструкции станка. Упругие деформации, влияющие на уровень погрешности обработки учитываются при формировании целевой функции повышения точности обработки. В процессе проектирования сначала производится предварительная конструкторская проработка основных размеров продольного и поперечного сечения элементов несущей системы, а затем это решение соотносится с результатами полученными методом конечных элементов. Зачастую это сопровождается итерационными расчетами с изменением характеристик исходной конструкции с последующим улучшением результата, и выбором приемлемого конструктивного решения.

В условиях производства все большего количества типоразмеров станков и постоянной смены конфигурации обрабатываемых деталей перспективным является проектирование и производство линейки поворотных столов, оснащенных гидромеханическими приводами [5, 6, 7].

Цель статьи. Для создания эффективной конструкции обрабатывающего центра, повышение точности рабочих перемещений привода подачи

необходимо оценить динамические характеристики поворотного стола и на базе разработанной 3D-модели провести комплексное исследование работоспособности конструкции.

Результаты исследований. В данной работе в качестве исследуемого объекта рассматривается станок специализированный многооперационный модели ОЦ-3В, который предназначен для серийного и мелкосерийного производства деталей из чугуна, стали, цветных металлов и сплавов, размеры которых позволяют устанавливать их на поворотном столе.

На станке с автоматической сменой инструментов и обрабатываемых деталей,

компоновка которого представлена на рис.1 и рис.2 могут осуществляются следующие процессы резания:

- фрезерование плоскостей, уступов, пазов с поворотом детали на любой угол с целым числом градусов, при жесткой и точной фиксации;

- фрезерование сложных криволинейных поверхностей по программе, в том числе, выполнения в отверстиях канавок, фасок при одновременно управляемых перемещениях по трем осям координат, сверление, зенкерование, развертывание;



Рис. 1. Обрабатывающий центр ОЦ3В

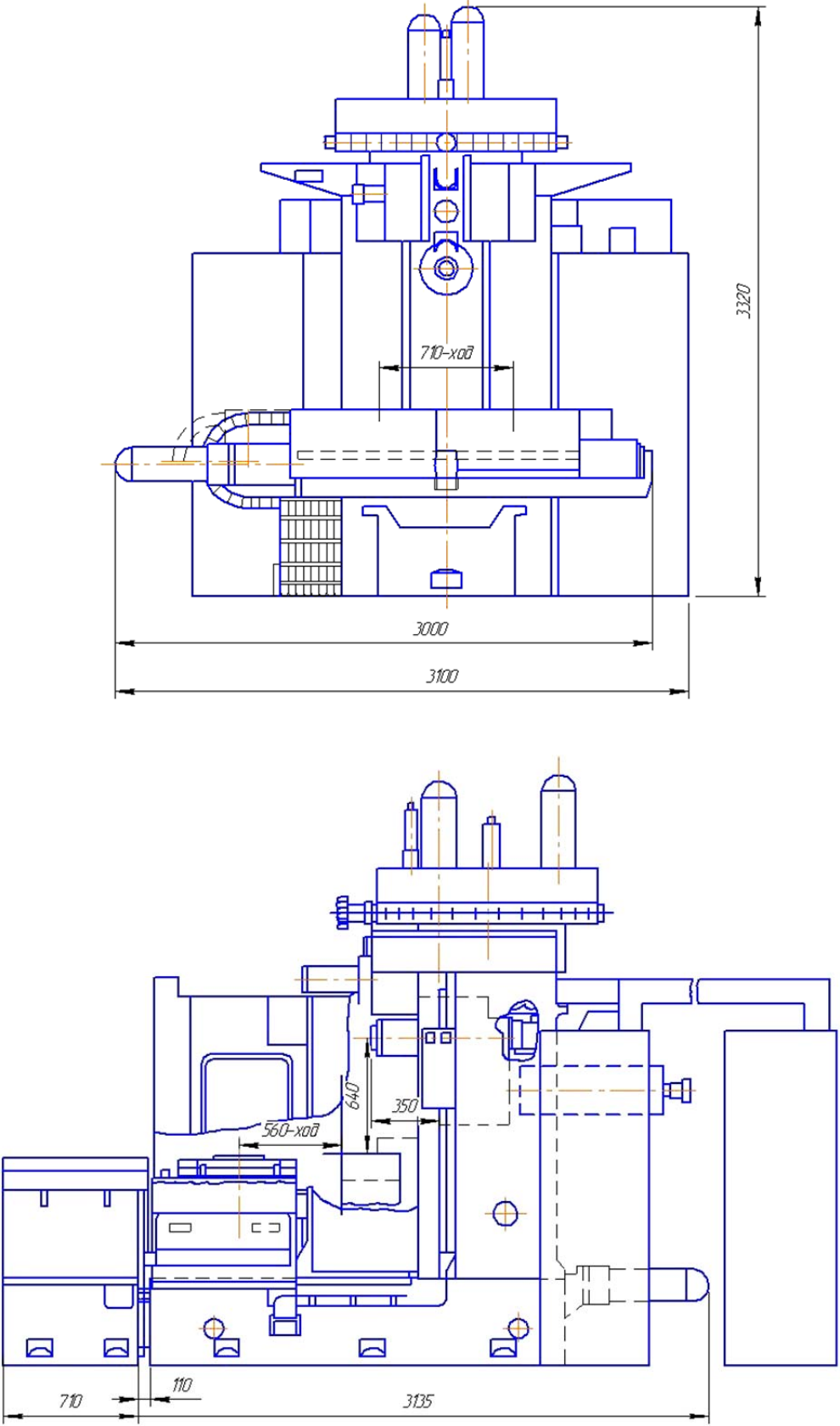


Рис. 2. Общий вид обрабатывающего центра ОЦЗВ

- фрезерование с круговой непрерывной подачей к столу, например, пазовых (цилиндрических) кулачков, торцевых кривых и подобных деталей.

Для реализации таких сложных формообразующих движений станок ОЦЗВ оснащается поворотным столом, кинематическая схема привода которого приведена на рис.3. Поворотный стол оказывает значительное влияние на податливость и точность позиционирования станка [4, 8, 9]. Расчет баланса относительной податливости несущей системы (НС) станка ОЦЗВ показал, что заготовка и ее упругие связи с поворотным столом составляют до 22% (от общей податливости НС) при нагружении силами веса узлов и нагружении в зоне обработки равной 10000 Н по всем трем координатам (X, Y, Z). Относительная податливость стола поворотного до 36%, а упругие связи стола поворотного с крестовым столом до 10% при тех же условиях нагружения.

Привод подач, реализующий движение поворотного стола по каждой координате является самостоятельным, конструктивно подобным. Исполнительным звеном в перемещении подвижных органов является безлюфтовая пара винт-гайка качения (ВГК), которая получает вращение по цепочке: электродвигатель – эластичная муфта – винт-гайка качения. Электродвигатель имеет бесступенчатую регулировку скорости.

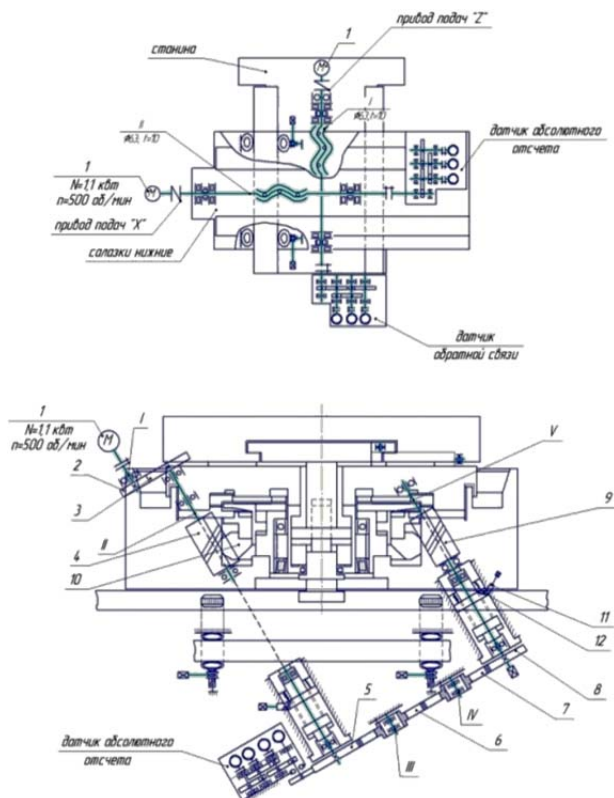


Рис. 3. Кинематическая схема привода поворотного стола ОЦЗВ

Таблица

Расчет моментов инерции элементов механизмов поворота

Наименование элементов привода	Геометрические размеры элементов, мм			Момент инерции элемента привода, J , кг·м ²	Приведенный к валу двигателя, J , кг·м ³
	D	d	l		
1. Обрабатываемая деталь (сталь)	530		600	36,0	0,00148
2. Спутник	530		150	18,2	0,00075
3. Планшайба (чугун)	740		65	14, 148	
	560	70	15	0,936	
	120	70	33	0,005	
	370	270	33	0,321	
	560	270	12	0,810	
	320	270	20	0,075	
	350	280	20	0,128	
	360	270	56	0,467	
				16,890	0,00069
4. Привод планшайбы. Вал II с деталями	40		25	$493 \cdot 10^{-7}$	
	30		65	$405 \cdot 10^{-7}$	
	32		160	$1292 \cdot 10^{-7}$	
	60		25	$2495 \cdot 10^{-7}$	
	54		35	$2292 \cdot 10^{-7}$	
	70		35	$6471 \cdot 10^{-7}$	
	85		140	$56272 \cdot 10^{-7}$	
	52		85	$4785 \cdot 10^{-7}$	
	40		200	$3942 \cdot 10^{-7}$	
	104		40	$36032 \cdot 10^{-7}$	
	44		20	$577 \cdot 10^{-7}$	
				0,012	0,0020
Вал I с деталями					
	35		40	$462 \cdot 10^{-7}$	
	60		65	$6486 \cdot 10^{-7}$	
	40		100	$1971 \cdot 10^{-7}$	
	32		95	$767 \cdot 10^{-7}$	
	100		80	$61600 \cdot 10^{-7}$	
				0,0070	0,002
Двигатель ВЭМ 225У3				0,0433	

Как известно осевой момент инерции рассматриваемого механизма J является мерой его инертности во вращательном движении вокруг оси и вычисляется по зависимости:

$$J = \frac{0,77 \cdot l \cdot (D^4 - d^4)}{i^2} \cdot 10^7 - \text{для стали}; J = \frac{0,726 \cdot l \cdot (D^4 - d^4)}{i^2} \cdot 10^7 - \text{для чугуна.}$$

Для исследование конструкции управляемого поворотного стола, который выполнен в виде самостоятельного узла, устанавливаемого в двух положениях с вертикальной и горизонтальной осью, построим 3D-модель поворотного стола в САПР КОМПАС-3D [5, 13, 14] (рис.5).

Планшайба встроенного поворотного стола получает вращение от электродвигателя 1 через пару зубчатых колес 2-3, двух червяков, сидящих на шлицевых валах II и V, соединенных между собой зубчатыми колесами 5-6-7-8, и через червячное колесо 10.

При исследовании динамики движущихся масс привода подачи поворотного стола производится вычисление инерционных характеристик: массы,

положения центра масс, момента инерции масс относительно центра масс [10, 11, 12, 20]. Рассмотрим задачу определения динамических характеристик механизма поворота (рис. 4), включающего планшайбу (2), приспособление спутник (3) и деталь (1)

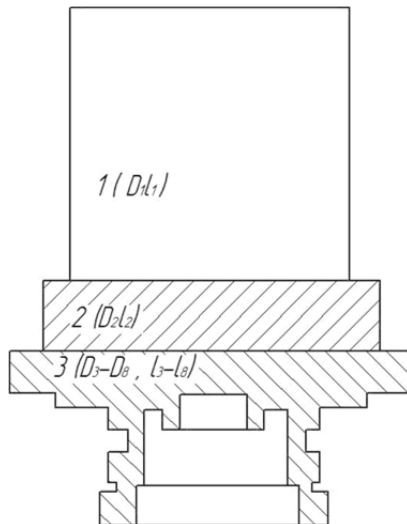


Рис. 4. Схема к расчету моментов инерции механизма поворота: 1 – деталь; 2 – планшайба; 3 – спутник

В процессе построения трехмерной модели широко использовались возможности САПР КОМПАС, его прикладные библиотеки и его инструментарий параметризации [15, 16, 17]. Эта система автоматизированного проектирования, разработанная группой компаний АСКОН, позволяет реализовать технологию коллективного сквозного 3D-проектирования изделий различного назначения. С помощью этой системы проектировщик может комплексно проводить комплекс работ по созданию трехмерных моделей и подготовке конструкторской документации. В рамках системы КОМПАС-3D осуществляется анализ напряженно-деформированного состояния с помощью интегрированного модуля АРМ FEM, а также подготовка управляющих программ для станков с ЧПУ.

Для создания фотореалистического изображения используется специальный модуль ArtisanRendering, созданный английской компанией Lightworks. Это приложение встроено в систему КОМПАС-3D и позволяет получать высококачественные фотореалистические изображения изделия [18, 19]. Анализ внешнего вида будущего изделия, подбор материалов с учетом расцветки, фактуры, возможность реализации последующей обратной связи в процессе корректировки геометрии изделия – все это функции модуля ArtisanRendering.

С помощью вышеуказанного модуля выполнен рендеринг поворотного стола, который представлен на рис. 6.

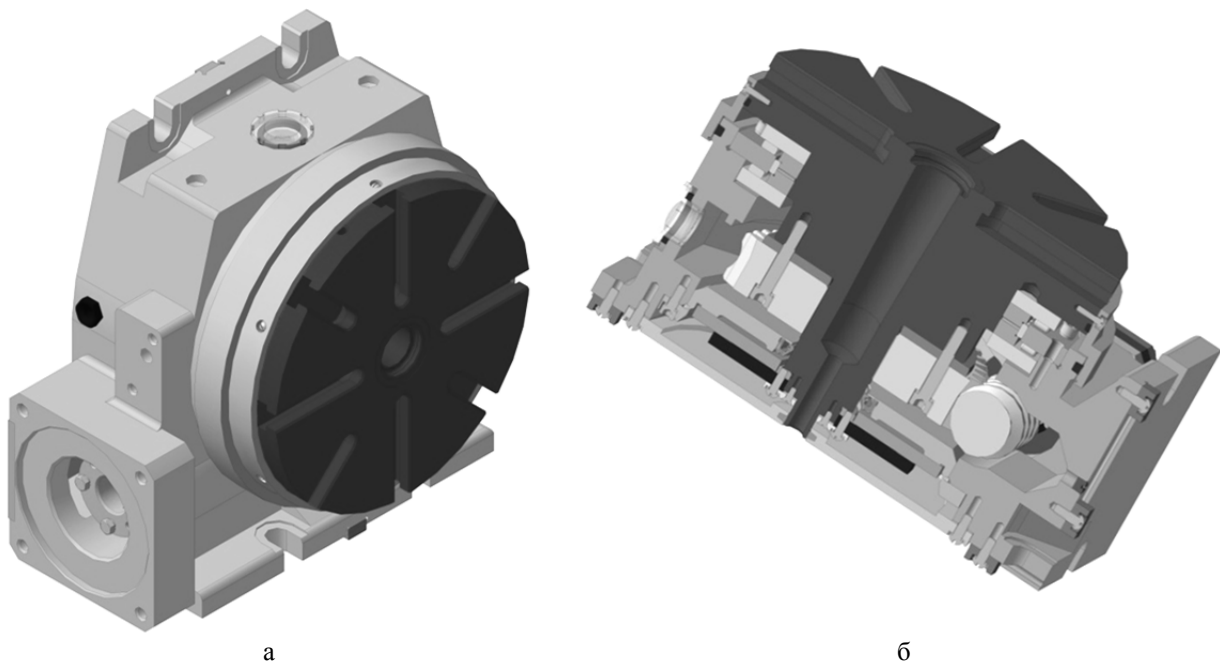


Рис. 5. Поворотный стол:
а – общий вид; б – сечение

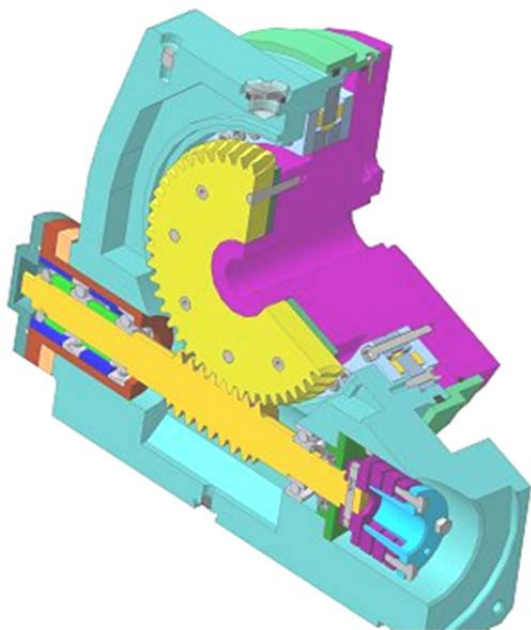


Рис. 6. Рендеринг поворотного стола в модуле Lightworks

Выводы. Проведен анализ конструкции и выполнены расчеты динамических характеристик привода подач обрабатывающего центра ОЦЗВ, который можно использовать как для автономной работы, так и встраивать в гибкую производственную систему, имеющую возможность переналадки на заданную номенклатуру деталей. Разработаны 3D-модели поворотного стола с горизонтальной и вертикальной осью вращения. В процессе разработки были использованы прикладные библиотеки КОМПАС-3D и инструментальный параметризации. Создано фотореалистичное изображение конструкции поворотного стола в модуле Lightworks.

Л и т е р а т у р а

- Решетов, Д.Н. Точность металлорежущих станков / Д.Н. Решетов, В.Т. Портман. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.
- Каминская В.В., Еремин А.В. Расчетный анализ динамических характеристик токарных станков разных компоновок // Станки и инструмент, 1985, №87. – С.3-6.
- Каминская В.В., Гринглаз А.В. Расчетный анализ динамических характеристик несущих систем станков // Станки и инструмент, 1989, №2. – С.10-13.
- Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: Справочник-учебник. В 3-х т. Т. 2. Ч. 1. Расчет и конструирование узлов и элементов станков / А. С. Проников, Е. И. Борисов, В. В. Бушуев и др. – М.: Машиностроение, 1995. – 371 с.
- Krol O., Sukhorutchenko I. 3D-modeling rotary table of machining centre SVM1F4 [Text] / O.Krol, I.Sukhorutchenko. – Commission of Motorization and Power Industry of Agriculture. Vol.14. Lublin, 2014. – P. 132-144.
- Кроль О.С., Шевченко С.В., Соколов В.И. Проективання металорізальних верстатів в середовищі APMWinMachine. Підручник. ISBN 978-966-590-926-2 (Затверджено МОНМСУ як підручник, гриф №1/11-4102 від 25.05.11р.). – Луганськ: Вид-во ЧНУ ім. В. Даля, 2011. – 400 с.
- Кроль О. С. Методы и процедуры 3D-моделирования металлорежущих станков и инструментов. Монография. ISBN 978-617-11-0049-7/ О.С. Кроль. – Северодонецк: Вид-во ЧНУ ім. В.Даля, 2015. – 120 с.
- Кроль О.С. Тривимірне моделювання металорізальних верстатів та інструментального оснащення. Навчальний посібник. ISBN 978-617-11-0074-9/ О.С. Кроль, В.І. Соколов. – Северодонецк: Вид-во ЧНУ ім. В.Даля, 2016. – 160 с.
- Кроль О.С. Методы и процедуры динамики шпиндельных узлов: Монография. ISBN 978-617-11-0039-8/ О.С. Кроль. – Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2014. – 154 с.
- Кроль О.С., Кроль А.А. Расчет податливости станка СФ68ВФ4 и моделирование динамики формообразования // Вісник СевНТУ, вип. 117 «Машинобудування та транспорт», Севастополь. – 2011. – С. 81-84.
- Кроль О.С. Твердотельное моделирование и исследование шпиндельного узла обрабатывающего центра / О.С.Кроль, А.А.Кроль, Е.И. Бурлаков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХПІ» – № 16(989), 2013. – С. 14-18.
- Krol O. Study dynamics machining centre SF68VF4 / O. Krol, S. Belkov M. [Text] // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. –Vol.14. – № 2. – 2014. – Lublin, Poland. – P. 59 – 67.
- Krol O., Osipov V. Modeling of construction spindle's node machining centre SVM1F4 [Text] / O.Krol, V.Osipov. – Comission of Motorization and Power Industry of Agriculture. Vol.13. Lublin, 2013. – P. 108-114.
- Krol O., Sukhorutchenko I. 3D-modeling and optimization spindle's node machining centre SVM1F4 [Text] / O.Krol, I.Sukhorutchenko. – Comission of Motorization and Power Industry of Agriculture. Vol.13. – Lublin, 2013. – P. 114-126.
- Кроль О. С. Параметрическое моделирование конструкций металлорежущих станков и инструментов. Учебное пособие. ISBN 978-617-11-0039-8 / О.С. Кроль. – Северодонецк: Вид-во ЧНУ ім. В.Даля, 2015. – 128 с.
- Кроль О.С. Параметрическое моделирование металлорежущих станков и инструментов. Монография. ISBN 978-966-590-935-4 / Луганськ: Вид-во ЧНУ ім. В. Даля, 2012. – 116 с
- Кроль О.С., Кроль А.А. Параметризация поперечных компоновок привода главного движения // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ: вип.24, 2009. – С. 164-168.
- Кроль О.С., Лисица С.Н. 3D-моделирование многооперационного станка с использованием рендеринга // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля – 2016. – №2 (226). – С. 26-33.
- Кроль О.С., Лисица С.Н. 3D-моделирование инструментальной оснастки обрабатывающего центра с использованием рендеринга // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля – 2016. – №2 (226). – С. 34-39.
- Соколов В.І. Гідравліка. Навчальний посібник. ISBN 978-617-11-0085-5/ Соколов В.І., О.С. Кроль, О.В.Спіфанова - Северодонецк: Вид-во ЧНУ ім. В.Даля, 2017. – 160 с.

References

- Reshetov D.N. Accuracy of metal cutting machines / D.N. Reshetov, V.T. Portman – M.: Mashinostroenie, 1986. – 336 p.
- Kaminskaya V.V., Eremin A.V. Estimated analysis of dynamic characteristics of turning machines of different layouts // Machine tools and instrument, 1985, No. 87. – P. 3-6.
- Kaminskaya V.V., Gringlaz A.V. Calculated analysis of dynamic characteristics of bearing systems of machine tools // Machine tools and instrument, 1989, №2. – P.10-13.
- Designing of metal-cutting machine tools and machine systems: Directory-textbook. In 3 v. V. 2. Ch. 1. Calculation and design of nodes and elements of machine tools / A. S. Pronikov, E. I. Borisov, V. V. Bushuyev – Moscow: Mashinostroenie, 1995. – 371 p.
- Krol O., Sukhorutchenko I. 3D-modeling rotary table of machining center SVM1F4 [Text] / O.Krol, I.Sukhorutchenko. – Commission of Motorization and the Power Industry of Agriculture. Vol.14. Lublin, 2014. – P. 132-144.
- Krol O. S., Shevchenko S.V., Sokolov V.I. Design of metal-cutting machine tools in the APM WinMachine environment. Textbook. ISBN 978-966-590-926-2 (Approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine as a textbook, stamp № 1 / 11-4102 dated 25.05.11). – Lugansk: Publishing house by EUNU, 2011. – 400 p.
- Krol O.S. Methods and procedures of 3D modeling of metal-cutting machine tools and instrument. Monograph, ISBN 978-617-11-0049-7 / O.S. Krol. – Severodonetsk: Publishing house by EUNU, 2015. – 120 p.
- Krol O.S. Three-dimensional modeling of metal-cutting machine tools and instrument. Tutorial. ISBN 978-617-11-0074-9 / O.S. Krol, VI Sokolov. – Severodonetsk: Publishing house by EUNU, 2016. – 160 p.
- Krol O.S. Methods and procedures of dynamics of spindle nodes: Monograph. ISBN 978-617-11-0039-8 / O.S. Krol. – Lugansk: Publishing House of EUNU, 2014. – 154 p.
- Krol O. S., Krol A.A. Calculation of the compliance of the machine СФ68ВФ4 and modeling of the dynamics of shaping // Bulletin of the SevNTU, issue. 117 "Mechanical engineering and transport", Sevastopol, 2011. – P. 81-84.
- Krol O.S. Solid-state modeling and research of the spindle node of the machining center / O.S.Krol, A.A.Krol, E.I. Burlakov / Bulletin of the National Technical University "KPI". Series: New solutions in modern technologies. – K: NTU "KPI", No. 16 (989), 2013. – P. 14-18.
- Krol O. Study dynamics machining center SF68VF4 / O. Krol, M. Belkov [Text] // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol.14. – No. 2 – 2014. – Lublin, Poland. – P. 59-67.
- Krol O., Osipov V. Modeling of the spindle's machining center SVM1F4 [Text] / O.Krol, V.Osipov. – Commission of Motorization and the Power Industry of Agriculture. Vol.13. – Lublin, 2013. – P. 108-114.
- Krol O., Sukhorutchenko I. 3D-modeling and optimization in the spindle's node machining center SVM1F4 [Text] / O.Krol, I.Sukhorutchenko. – Commission of Motorization and the Power Industry of Agriculture. Vol.13 – Lublin, 2013. – P. 114-126.
- Krol O. S. Parametric modeling of constructions of metal-cutting machine tools and instrument. Tutorial. ISBN 978-617-11-0039-8 / O.S. Krol. – Severodonetsk: Publishing House of EUNU, 2015. – 128 p.
- Krol O.S. Parametric modeling of metal cutting tools and instrument. Monograph, ISBN 978-966-590-935-4 / Lugansk: Publishing House of EUNU, 2012. – 116 p.
- Krol O. S., Krol A.A. Parametrization of transverse layouts of the drive of the main motion // Reliability of the instrument and optimization of technological systems. Digest of scientific works. – Kramatorsk: v. 24, 2009. – P. 164-168.
- Krol O.S., Lisitsa S.N. 3D modeling of a multi-operation machine using rendering // Bulletin of the Volodymyr Dahl East-Ukrainian National University. – 2016, No. 2 (226). – P. 26-33.
- Krol O. S., Lisitsa S.N. 3D modeling of the tooling of the processing center using rendering // Bulletin of the Volodymyr Dahl East-Ukrainian National University. – 2016, №2 (226). – P. 34-39.
- Sokolov V.I. Hydraulics. Tutorial. ISBN 978-617-11-0085-5 / V.I. Sokolov, O.S. Krol, O.V. Epiphanova – Severodonetsk: Publishing House of EUNU, 2017. – 160 p.

Кроль О.С., Кузовов О.Ю., Суржиков С.М.
Дослідження і 3D-моделювання поворотного столу обробного центра

У статті розглянута конструкція і кінематика обробного центру, оснащеного універсальним поворотним столом з двома осями обертання. Дана оцінка динамічних характеристик механізму повороту з використанням пристосувань супутників. Реалізована процедура побудови 3D-моделі поворотного столу приводу подач обробного центру ОЦЗВ в інтегрованій системі КОМПАС - 3D з використанням прикладних бібліотек і інструментарію параметризації.

Ключові слова: обробний центр, механізм повороту, поворотний стіл, 3D- модель

Krol O., Kuzovov A., Surzhikov S. Study and 3D-modeling of the rotary table of the machining center

The article deals with the construction and kinematics of the machining center equipped with a universal rotary table with two axes of rotation. An estimation of the dynamic characteristics of the turning mechanism using satellites is given. The procedure for constructing the 3D model of the turning table of the feeder for the processing center OTS3V in the integrated system KOMPAS-3D with the use of application libraries and parameterization tools is implemented. The procedure for creating a photorealistic image of the design for the rotating table of the processing center in the environment of the system rendering module, integrated into the CAD KOMPAS-3D

Keywords: machining center, turning mechanism, rotary table, 3D model

Кроль О.С. – к.т.н., доцент, професор кафедри машинобудування та прикладної механіки Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля, e-mail: krolos.snu.edu@gmail.com

Кузовов А.Ю. – студент кафедри машинобудування та прикладної механіки Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля

Суржиков С.Н. – студент кафедри машинобудування та прикладної механіки Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля

Рецензент: д.т.н., проф. **Харламов Ю.О.**

Стаття подана 21.09.2017

УДК 621.9.06

ИССЛЕДОВАНИЕ И 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧЕРВЯЧНОЙ ПЕРЕДАЧИ ПРИВОДА ПОДАЧ ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА

Кроль О.С., Фиронов Д.В., Великоцкий В.В.

RESEARCH AND 3D-MODELLING OF WORM GEAR OF THE FEED DRIVE FOR THE WORKING CENTER

Krol O., Fironov D., Velikotsky V.

В статье проведено исследование конструкции и геометрии червячной передачи. Предложена модифицированная процедура компьютерного профилирования рабочих поверхностей зуба червячного колеса. Осуществлен силовой и геометрический расчеты червячной передачи в модуле APM Trans. Выполнено исследование напряженно-деформированного состояния контактных поверхностей червяка методом конечных элементов с использованием модуля APM FEM. Построены 3D-модели червячной передачи, используемой в механизме поворота обрабатывающего центра ОЦЗВ в интегрированной САПР КОМПАС-3D.

Ключевые слова: червячная передача, обрабатывающий центр, механизм поворота, 3D- модель

Введение. Для обеспечения производительной работы поворотного стола обрабатывающего центра важно использовать такие червячные передачи, которые реализуют: повышенную (до 2 нм) точность позиционирования при использовании систем коррекции; точность реверсирования, способствующую динамической компенсации погрешностей; снижение возмущающих воздействий от привода стола.

Постановка проблемы. Процесс проектирования механических передач, выполняемый в среде современных САПР имеет ряд особенностей. Во-первых, зачастую для этого используются специализированные модули, встраиваемые в контур системы автоматизированного проектирования. Во-вторых используются возможности прикладных библиотек САПР, которые все шире применяют инструментарий параметризации. При построении 3D-модели червячной передачи следует учитывать определенные ограничения 3D-процедур, используемых в современных САПР. Не смотря на то, с помощью инструментария 3D-моделирования

возможно профилирование ряда передач с достаточно высокой точностью визуализации рабочих поверхностей (цилиндрические зубчатые колеса, шкивы и т. д.) проблемы эффективного профилирования зуба сохраняются.

Анализ последних исследований и публикаций. Вопросы геометрии и кинематики, червячных передач с цилиндрическим червяком рассматриваются в различных литературных источниках. Например, в работах [1, 2, 3] изложены общие вопросы геометрии и кинематики червячных передач. Исследование контактных линий и кривизны контактирующих поверхностей представлено в [4, 5]. Проблемы повышения грузоподъемности и КПД червячных передач освещены в работах [6, 7].

Вместе с тем для реализации комплексных расчетов основных элементов привода поворотного стола необходимо применение развитого инструментария современных систем проектирования с использованием методов конечных элементов для полного представления о полях напряжений и перемещений в пространстве 3D [8, 9, 10].

Цель статьи. Повышение эффективности процедур проектирования автоматизированного проектирования за счет применения средств 3D-моделирования, элементов компьютерного профилирования и расчетных модулей САПР APM WinMachine.

Результаты исследований. В качестве исследуемого объекта рассмотрим привод поворота стола обрабатывающего центра фрезерно-сверлильно-расточного типа [11, 12, 13] Этот привод входит в состав привода подач, который для современных станков с ЧПУ может быть выполнен в соответствии со следующей структурной схемой :

1. Схема с жесткой связью электродвигателя и ходового винта передачи винт-гайка качения;
2. Схема с одноступенчатым редуктором и выборкой зазора в зубчатом зацеплении;
3. Схема с применением беззазорной червячной и реечной передач (рис.1)

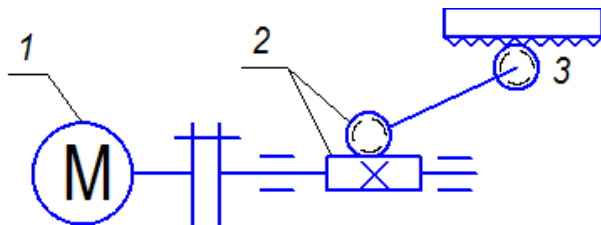


Рис. 1. Схема привода с червячной и реечной передачами:
1 – электродвигатель; 2 – червячная передача;
3 – реечная передача

Привод поворота обрабатывающего центра ОЦЗВ выполнен по третьей схеме и функционирует следующим образом (рис.2)

Встроенный поворотный-делительный стол позволяет осуществлять обработку детали с фиксации стола в 360 положениях, т.е. через один градус и контурную обработку с помощью круговой подачи в пределах одного оборота планшайбы. Круговая подача стола проводится при расфиксированном положении планшайбы. Масло

подается в нижнюю полость гидроцилиндра. При этом стакан перемещается вверх и выводит из зацепления верхнее делительное зубчатое колесо с нижним делительным плоскозубчатым колесом, жестко связанным с планшайбой. Планшайба получает круговое движение от электродвигателя постоянного тока 9 через зубчатые колеса 10 и 11, червяк 12 и червячное колесо 13.

В кинематике поворотного стола механизм автоматического создания и выбора люфта за счет применения 2-х параллельных, перемещающихся в осевом направлении (плавающих) червячных валов.

При круговой подаче, когда необходимо обеспечить безлюфтовую передачу, люфт выбирается следующим образом: масло подается в полость гидроцилиндров, при этом витки червяков поджимаются к виткам червячного колеса, тем самым устраняется люфт в червячной передаче.

Для обеспечения точного позиционирования планшайбы давление в полости цилиндра сбрасывается, давая возможность перемещаться червякам в осевом направлении. При этом червячное колесо и жестко соединенное с ним нижнее делительное колесо получает возможность провернуться на угол погрешности позиционирования и точно зафиксироваться относительно верхнего неподвижного делительного колеса 5.

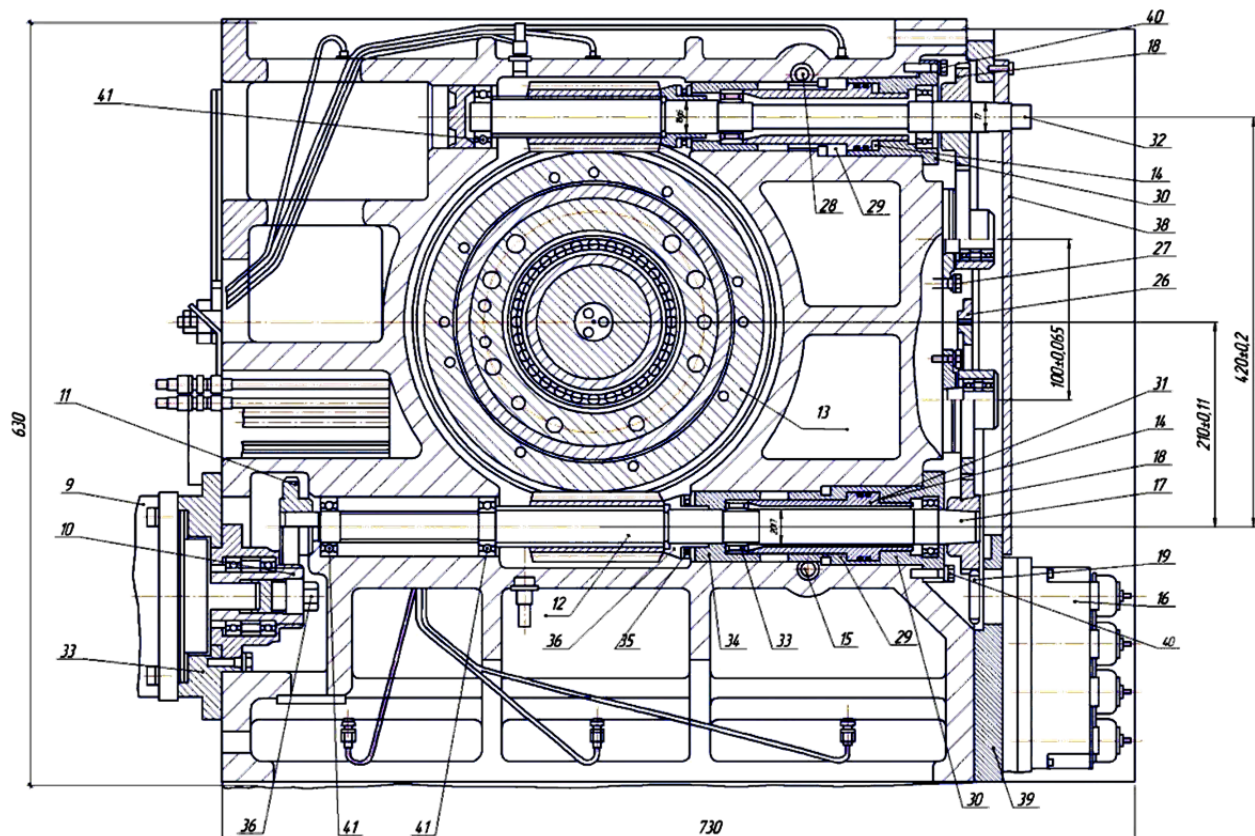


Рис. 2. Привод поворота стола

В гидроцилиндрах поджима червячных валов имеется зубчатые колеса [14, 15, 16], торцы которых со стороны резьбы служат регулируемые упорами для устранения люфта в червячной передаче за счет осевого поджима двух червяков, перемещающихся по шлицам валов. Перемещение упоров в осевом направлении осуществляется вращением двух червяков в нужном направлении.

При помощи круглого поворотного стола можно фрезеровать как наружные контуры так и внутренние пазы. Так, контур дуги образуется без комбинирования двух подач, а только в результате круговой подачи поворотного стола и, как следствие, точность контура не будет определяться процедурой комбинирования двух подач, а будет регламентироваться погрешностями установки заготовки на столе.

К кинематическим характеристикам привода подач относится скорость привода планшайбы, которая соответствует скорости на червячном колесе, зависящей от передаточного числа и характеристик червячной передачи. Эта передача оказывает решающее воздействие на конечную точность обработки.

Для исследования свойств червячной передачи разработана 3D-модель поворотного стола (рис.3,а) и червячной передачи (рис.3,б,в, г) [17, 18, 19]

При построении 3D-модели червячной передачи следует учитывать определенные ограничения 3D-процедур, используемых в современных САПР. Не смотря на то, с помощью инструментария 3D-моделирования возможно профилирование некоторых видов передач с

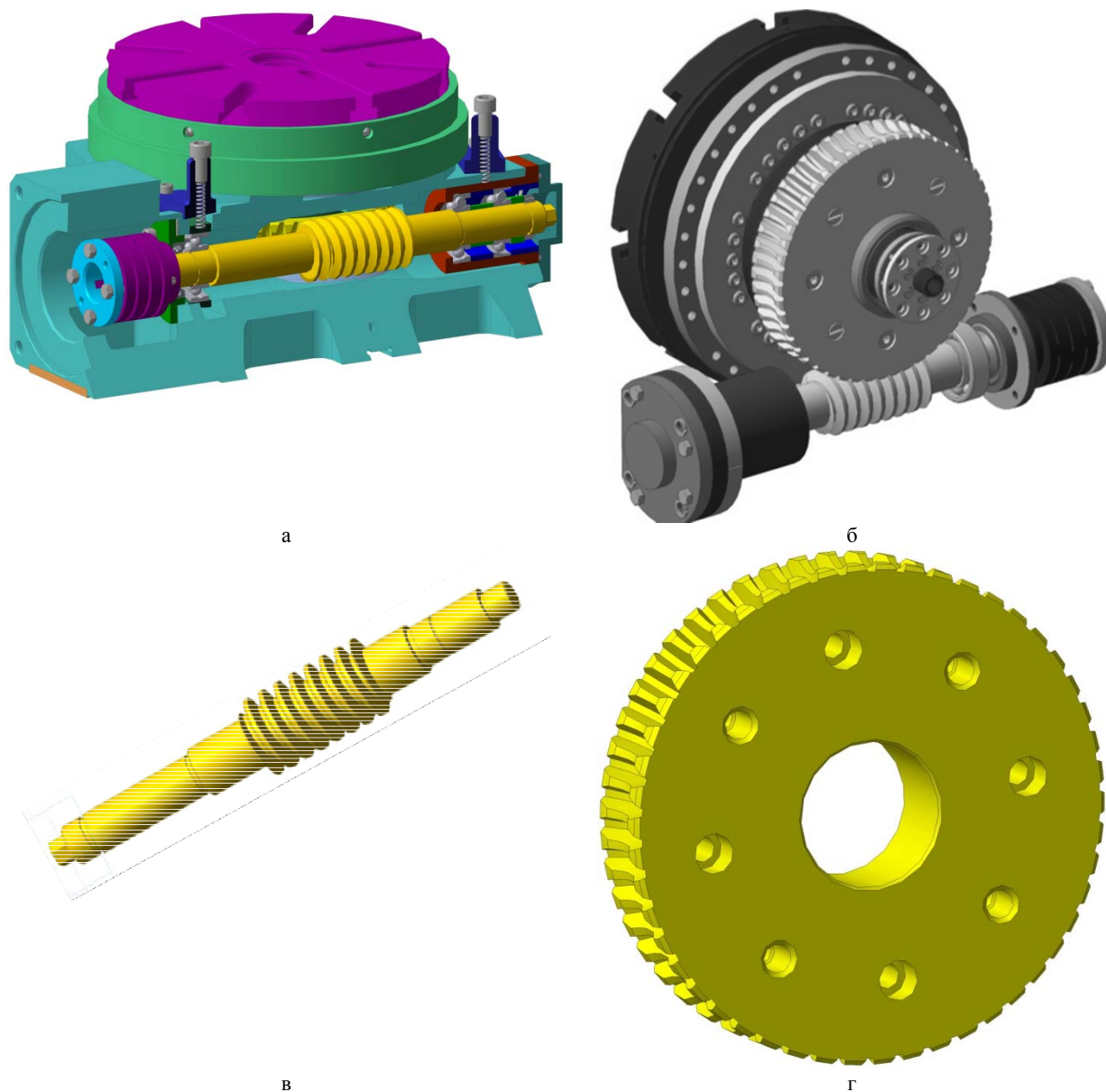


Рис.3. 3D-модель поворотного стола:

а – сечение поворотного стола; б – червячная передача; в – червяк; г – червячное колесо

достаточно высокой точностью визуализации рабочих поверхностей (цилиндрические зубчатые колеса, шкивы и т. д.). При моделировании конических зубчатых колес с круговым зубом и червячных колес визуализация далеко не полная – зубья (а точнее – впадины между ними) система не генерирует, поэтому такие модели являются весьма условными. Для получения полноценной 3D – модели червячного колеса нужно применить иные методы моделирования, один из которых представлен ниже на примере САПР КОМПАС 3D [17, 18, 19].

Профилирование зуба происходит путем вырезания впадины, как это реализуется в процессе нарезания зубьев на зуборезном станке. Трехмерная операция «Вырезание» осуществляется по построенным и упорядоченным в определенном положении торцовым сечениям при помощи команды «Вырезать элемент по сечениям». При этом следует учитывать ряд особенностей круговых зубьев:

1. Вдоль впадины зуба не сохраняется геометрическое подобие профилей (сечение постоянно изменяется по форме и размерам).

2. Траектория расположения сечений очерчивается винтовой поверхностью, поэтому сечения занимают сложные пространственные положения.

Для решения данной задачи предлагается следующая последовательность действий:

3. Определение пространственного положения торцовых сечений (плоскостей, на которых они строятся);

4. Расчет дополнительных геометрических параметров червячного колеса, на основании которых строятся торцовые сечения;

5. Построение сечений;

6. Собственно вырезание.

На рис.4 показано операции построения эвольвент боковых поверхностей зуба (рис.4,а) и эскизы генерируемых сечений (рис.4,б)

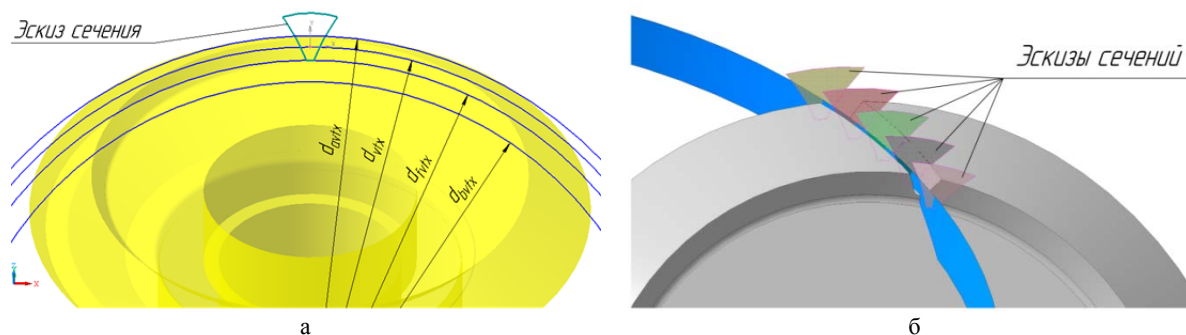


Рис. 4. Трехмерные операции построения зуба: а – построение эвольвент зуба; б – эскизы сечений

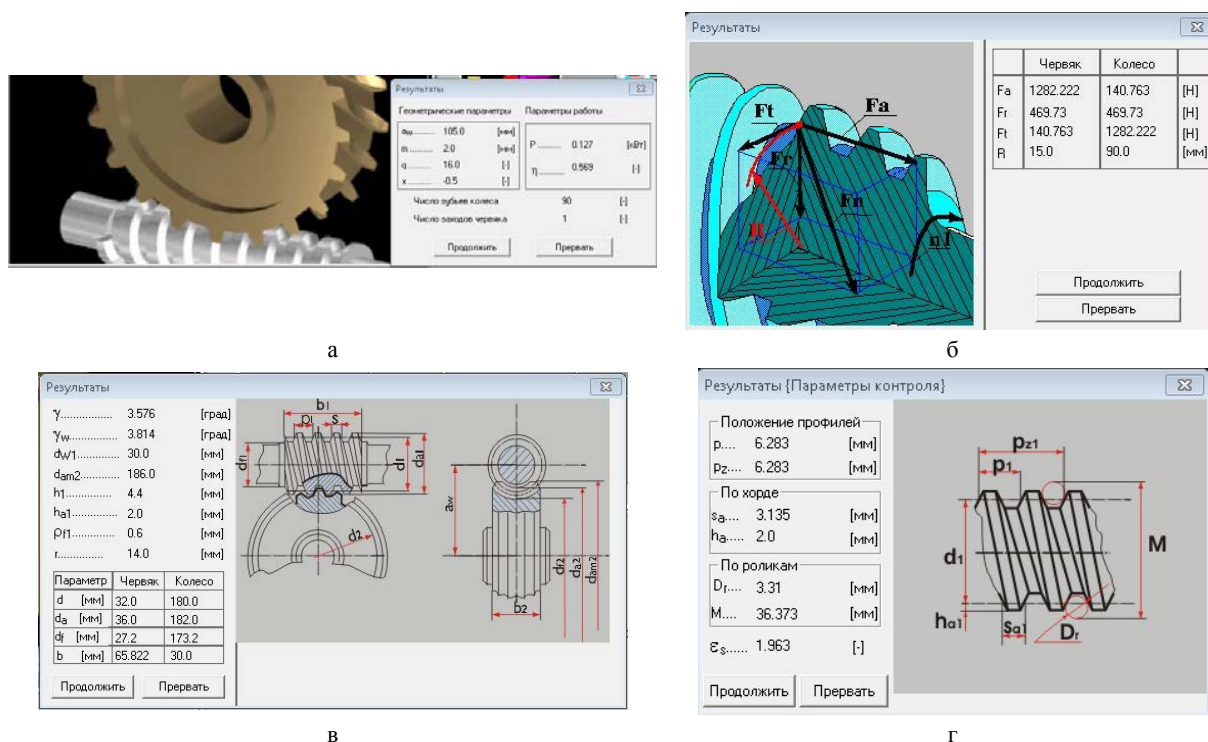


Рис. 5. Результаты расчета червячной передачи:

а – основные параметры; б – силы в зацеплении; в – геометрические параметры; г – параметры контроля

Для оценки основных конструктивных характеристик червячной передачи привода поворота стола станка ОЦЗВ произведем ее расчет с помощью системы автоматизированного проектирования APM WinMachine [20, 21].

Расширенный проектировочный расчет червячной передачи (ЧП) осуществим в модуле проектирования механических передач вращения APM Trans [22, 23]. При заданной внешней нагрузки, материале червяка и колеса, типе термообработки определим основные геометрические параметры передачи, силы, действующие в ней, параметры контроля положения боковых поверхностей, а также допуски и посадки в зацеплении (рис.5).

В процессе исследования червячной передачи в APM FEM [17, 24, 25] построена конечно-элементная сетка (рис. 6, а), с числом конечных элементов 11515, и количеством узлов для стержневых элементов более, чем 3000. В системе APM FEM каждый конечный стержневой элемент включает два узла, которые имеют 6 степеней свободы. Взаимодействие конечных элементов друг с другом реализовано через их узлы, а моделирование его сводится к решению системы алгебраических уравнений. Совместным решением системы уравнений, на базе предварительно сформированной матрицы жесткости являются величины смещений (рис. 6, б) и величины напряжений (рис. 6, в). Расчет стержневых элементов ведется с учетом всех концентраторов напряжений. Это позволяет более точно определять величины действующих напряжений.

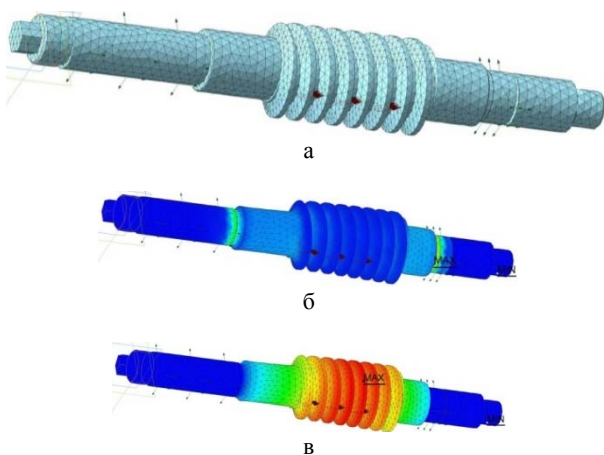


Рис. 6. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния червячной передачи: а – конечно-элементная сетка; б – поля напряжений; в – поля перемещений

Выше рассмотренные 3D-модели обрабатывающего центра и его основных узлов представлены на 15 международном конкурсе «Будущие Асы Цифрового машиностроения». Представленный проект стал серебряным призером этого конкурса.

Получены три патента на полезные модели:

- № 95715 «Безазорна черв'ячна передача»;

- № 99664 «Поворотний стіл металорізального верстата»

- № 113876 «Поворотний стіл металорізального верстата».

Выводы. Проведено комплексное исследование конструкции червячной передачи обрабатывающего центра модели ОЦЗВ с использованием процедур 3D-моделирования в САПР КОМПАС и инженерного анализа конструкции методом конечных элементов.

Построена 3D-модель червячной передачи, дающая реальное представление о ее конструкции. При профилировании поверхностей зуба использована усовершенствованная машинная процедура с учетом того, что не сохраняется геометрическое подобие профилей. Реализована процедура анализа и расчета напряженно-деформированного состояния червячной передачи в модуле APM FEM с учетом влияния внешней загрузки и собственного веса каждого из элементов. Выполнен расчет элементов червячной передачи, представленных в виде стержней с учетом имеющихся концентраторов напряжений, который позволяет более точно оценить воздействие изменяющихся внешних нагрузок. Широкий спектр возможностей модуля APM FEM позволяет совершенствовать качество проектируемых приводов металлорежущих станков, значительно сократить вес конструкции, а следовательно и понизить его стоимость.

Л и т е р а т у р а

1. Детали и механизмы металлорежущих станков / Под ред. Д.Н. Решетова. Т. 2. – М.: Машиностроение, 1972. – 520 с.
2. Детали машин. Расчет и конструирование. Справочник, Т. 3 / Под ред. Ачеркана Н.С. – М.: Машиностроение, 1969. – 472 с.
3. Проектирование механических передач / С. А. Чернавский, Г.А. Снесарев, Б.С.Козинцов и др. – М.: Машиностроение, 1984. – 560 с.
4. Бернацкий И.П., Вьюшкин Н.И., Герасимов В.К., Комков В.Н. Рациональный выбор параметров зацепления червячных цилиндрических передач // Зубчатые и червячные передачи. – Л.: Машиностроение, 1974. – С. 193-210.
5. Бернацкий И.П. Исследование червячных с вогнутым профилем витков червяка, нарезаемых резцом / И.П. Бернацкий // Известия вузов.Машиностроение. – 1962. – №10. – С.29-37.
6. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений. – М.: Наука, 1968. – 584 с.
7. Shevchenko S., Muhovaty A., Krol O. Geometric Aspects of Modifications of Tapered Roller/ Procedia Engineering150 (2016) 1107-1112.
8. Кроль О.С., Шевченко С.В., Соколов В.І. Проектування металорізальних верстатів в середовищі APMWinMachine. Підручник. ISBN 978-966-590-926-2 (Затверджено МОНМСУ як підручник, гриф №1/11-

4102 від 25.05.11р.). - Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2011. - 400 с.

9. Кріль О.С. Параметрическое моделирование металлорежущих станков и инструментов. Монография. ISBN 978-966-590-935-4 / Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2012. - 116 с.
10. Кріль О. С. Методы и процедуры 3D-моделирования металлорежущих станков и инструментов. Монография. ISBN 978-617-11-0049-7/ О.С. Кріль. - Северодонецк: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2015. - 120 с.
11. Krol O. 3D-modeling of the rotary table for tool SVM1F4 with non-clearance worm gearing. Krol, S. Shevchenko, I. Sukhorutchenko, A. Lysenko [Text] // TEKA Commision of Motorization and Energetic in Agriculture. -Vol.14. - № 1. 2014.- Lublin, Poland. - P. 126-133.
12. . Krol O. Modeling of construction spindle's node machining centre SVM1F4/ O. Krol, V. Osipov //TEKACom. Mot. andEnerg. in Agriculture. - OLPAN, 2013, Vol.13, № 3,Lublin, Poland. - P. 108-113.
13. Krol O. 3D-modeling and optimization spindle's node machining centre SVM1F4 /O. Krol, I. Sukhorutchenko [Text] // TEKA Commision of Motorization and Energetic in Agriculture. -Vol.13. - № 3. 2013.- Lublin, Poland. -P. 114-119.
14. Кріль О.С., Кузовов А.Ю., Суржиков С.Н. Исследование и 3D-моделирование поворотного стола обрабатывающего центра // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля- 2016. - №2 (226). - С. 34-39.
15. Кріль О.С., Шевченко С.В., Сіндєєва О.В., Покінтелиця М.І. Проектування механічних передач металорізальних верстатів за допомогою системи WinMachine. Навчальний посібник, ISBN 978 - 966 - 590 - 652 - 0 / Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2007. - 200с.
16. Решетов Д. Н. Детали машин. - М.: Машиностроение, 1989. - 496 с.
17. Кріль О.С. Тривимірне моделювання металорізальних верстатів та інструментального оснащення. Навчальний посібник. ISBN 978-617-11-0074-9/ О.С. Кріль, В.І. Соколов. - Северодонецк: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2016. - 160 с.
18. Krol O., Khmelniysky A. 3D-modelling and investigating of spinle's node of angular head for multyoperation tool/ TEKA Commision of Motorization and Energetic in Agriculture. - Lublin, Poland. -Vol.15. - № 3. (2015), P. 35-40.
19. Кріль О.С. 3D-моделирование шпиндельного узла угловой головки многооперационного станка/ О.С.Кріль, А.В.Хмельницкий // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля- 2015. - №5 (222). -С. 24-32.
20. Кріль О.С. Моделирование шпиндельного узла обрабатывающего центра / О.С.Кріль, Е.И.Бурлаков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. - Х: НТУ «ХПІ» - № 11(985), 2013. - С. 33-38.
21. Кріль О.С. Твердотельное моделирование и исследование шпиндельного узла обрабатывающего центра / О.С.Кріль, А.А.Кріль, Е.И. Бурлаков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. - Х: НТУ «ХПІ» - № 16(989), 2013. - С. 14-18.
22. Нерубашенко А.А., Кріль О.С., Кріль А.А. Создание базы данных параметрических моделей деталей станков в модуле APM Base // Вісник СевНТУ, 2010, вип.107. - С.107-109

23. Кріль О.С., Кріль А.А., Сіндєєва Е.В. Моделирование конструкции четырехопорного вала в САПР APM «WinMachine» // «Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні». Зб. наук. пр. - Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2008. - С. 139 - 143
24. Соколов В.І., Кріль О.С., Єпіфанова О.В. Гідравліка. - Северодонецк: СНУ ім. В. Даля. - 2017. - 160 с.
25. Кріль О.С., Шумакова Т.О., Соколов В.І. Проектування зуборізних інструментів за допомогою системи КОМПАС. - Луганськ: СНУ ім. В. Даля. - 2013. - 142 с.

References

1. Details and mechanisms of metal-cutting machine tools / Ed. D.N. Reshetov. T 2. - M.: Mechanical Engineering, 1972. - 520 p.
2. Details of machines. Calculation and design. Handbook, T. 3 / Ed. N.S. Acherkan - M.: Mechanical Engineering, 1969. - 472 p.
3. The design of mechanical transmission / S.A. Chernovsky, G.A. Snesarev, B. S. Kozintsov and others. - M.: Mechanical Engineering, 1984. - 560 p.
4. Bernatsky I.P., Vjushkin N.I., Gerasimov V.K., Komkov V.N. Rational choice of the gearing parameters of worm gears // Toothed and worm gears. - L.: Mechanical Engineering, 1974. - P. 193-210.
5. Bernatsky I.P. Investigation of worm-like with a concave profile of the wavy curls, cut by a cutter / I.P. Bernatsky // Izvestiya Vuzov.Mashinostroenie. - 1962. - №10. - P.29-37.
6. Litvin F.L. The theory of gearing. - M.: Nauka, 1968. - 584 p.
7. Shevchenko S., Muhovaty A., Krol O. Geometric Aspects of Modifications of Tapered Roller / Procedia Engineering 150 (2016) 1107-1112.
8. Krol O.S., Shevchenko S.V., Sokolov V.I. Design of metal-cutting machines in the environment of APM WinMachine. Textbook. ISBN 978-966-590-926-2 (approved by MONMSU as textbook, neck No. 1 / 11-4102, dated May 25, 2011 year). - Lugansk: Publishing house of SNU, 2011. - 400 p.
9. Krol O.S. Parametric modeling of metal-cutting machines and tools. Monograph. ISBN 978-966-590-935-4 / Lugansk: Publishing house of SNU, 2012. - 116 p.
10. Krol O.S. Methods and procedures of 3D-modeling of metal-cutting machine tools and instruments. Monograph. ISBN 978-617-11-0049-7 / O.S. Krol. - Severodonetsk: Publishing house of SNU, 2015. - 120 p.
11. Krol O. 3D-modeling of the rotary table for the tool SVM1F4 with non-clearance worm gearing O. Krol, S. Shevchenko, I. Sukhorutchenko, A. Lysenko [Text] // TEKA Commision of Motorization and Energetic in Agriculture. -Vol.14. - No. 1. 2014. - Lublin, Poland. - P. 126-133.
12. . Krol O. Modeling of construction spindle's node machining center SVM1F4 / Krol O, Osipov V. // TEKA Com. Mot. and Energ. in Agriculture. - OL PAN, 2013, Vol.13, No 3, Lublin, Poland. - P. 108-113.
13. Krol O. 3D-modeling and optimization spindle's node machining center SVM1F4 / O. Krol, I. Sukhorutchenko [Text] // TEKA Commision of Motorization and Energetic in Agriculture. -Vol.13. - No. 3. 2013. - Lublin, Poland. - P. 114-119.
14. Krol O.S., Kuzovov A.Yu., Surzhikov S.N. Investigation and 3D modeling of the turning table of the processing center // Bulletin of the SNU.-2017. - №3 (22_). - P. _.

15. Krol O.S., Shevchenko S.V., Sindyeveva O.V., Pokintelitsya M.I. Design of mechanical gears of metal-cutting machines with the help of a system APM WinMachine. Handbook, ISBN 978 - 966 - 590 - 652 - 0 / Lugansk: Publishing house of SNU, 2007. – 200 p.
16. D.N. Reshetov. Details of machines. – M.: Mechanical Engineering, 1989. – 496 p.
17. Krol O.S. Three-dimensional modeling of machine tools and tool equipment. Handbook. ISBN 978-617-11-0074-9 / O.S. Krol, V.I. Sokolov. – Severodonetsk: Publishing house of SNU, 2016. – 160 p.
18. Krol O., Khmelnsky A. 3D-modelling and investigating of the spindle's node for the angular head for multyoperation tool / TEKA Commision of Motorization and Energetic in Agriculture. – Lublin, Poland. – Vol. – No. 3. (2015), p. 35-40.
19. Krol OS 3D-modeling of the spindle node of the angular head for the multi-operation machine / O.S. Krol, A.V. Khmelnsky // Bulletin of the SNU. – 2015. – №5 (222). – P. 24 - 32.
20. Krol O.S. Modeling of the spindle unit of the machining center / O.S.Krol, E.I.Burlakov // Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technologies - Kharkiv: NTU "KhPI" - № 11 (985), 2013. - C. 33 - 38.
21. Krol O.S. Solid modeling and investigation of the spindle node of the machining center / O.S.Krol, A.A. Krol, E.I. Burlakov // Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technologies. – Kharkiv: NTU " KhPI". – № 16 (989), 2013. – P. 14-18.
22. Nerubashchenko A.A., Krol O.S., Krol A.A. Creation of a database of parametric models for machine parts in the APM Base module // Bulletin of SevNTU, 2010, issue 107. – p.107-109.
23. Krol O.S., Krol A.A., Sindeeva E.V. Modeling of the design of the four-shaft shaft in the CAD APM "WinMachine" // "Resource-saving technologies of production and processing of materials in machine building". Digest of scientific works. – Lugansk: Publishing house of SNU, 2008. – p. 139-143.
24. V. Sokolov, O. Krol, O. Yepifanova. Hydraulics. V. Dahl EUNU, Severodonetsk, 2017.
25. Krol O., Shumakova T., Sokolov V. Design metal cutting instruments by dint of system of KOMPAS. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2013.

Кроль О.С., Фіронов Д.В., Великоцький В.В.
Дослідження і 3D-моделювання поворотного столу
обробного центра

У статті проведено дослідження конструкції і геометрії черв'ячної передачі. Запропоновано модифіковану процедуру комп'ютерного профілювання робочих поверхонь зуба черв'ячного колеса. Здійснено силовий і геометричний розрахунки черв'ячної передачі в модулі APM Trans. Виконано дослідження напружено-деформованого стану контактних поверхонь черв'яка методом кінцевих елементів з використанням модуля APM FEM. Побудовано 3D-моделі черв'ячної передачі, яка використовується в механізмі повороту обробного центру ОЦЗВ в інтегрованій САІР КОМПАС-3D.

Ключові слова: черв'ячна передача, обробний центр, механізм повороту, 3D- модель

Krol O., Fironov D., Velikotsky V. Research and 3D-
modelling of worm gear of the feed drive for the machining
center

The article investigates the construction and geometry of the worm gear. A modified procedure for computer profiling of the working surfaces for a tooth of a worm wheel is proposed. The power and geometric calculations of the worm gear in the APM Trans module are carried out. Investigation of the stress-strain state of the worm contact surfaces by the finite element method using the FEM APM module is performed. 3D models of the worm gear used in the rotation mechanism of the processing center OTS3V in the integrated CAD KOMPAS-3D are constructed. The control parameters, including the profile parameters for the chord and for the rollers are calculated

Keywords: worm gear, machining center, swing mechanism, 3D model

Кроль О.С. – к.т.н., доцент, професор кафедри машинобудування та прикладної механіки Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля, e-mail: krolos.snu.edu@gmail.com

Фіронов Д.В. – студент кафедри машинобудування та прикладної механіки Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля

Великоцький В.В. – студент кафедри машинобудування та прикладної механіки Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля

Рецензент: д.т.н., проф. **Чернецька-Білецька Н.Б.**

Стаття подана 21.09.2017

УДК 621.9.06

**ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ ВИНТ-ГАЙКА КАЧЕНИЯ
ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА В APM WINMACHINE****Кроль О.С., Кадаффи М.С., Бойчук Д.А., Дерябин И.А.****RESEARCH AND MODELLING OF ROLLING SCREW-NUT FOR
THE MACHINING CENTER IN APM WINMACHINE****Krol O., Kadaffi M., Boychuk D., Deryabin I.A.**

В статье проведено исследование конструкции и геометрии передачи винт-гайка качения (ВГК). Проведен расчет работоспособности ВГК-передачи привода подач обрабатывающего центра и дана оценка параметрам долговечности и несущей способности этой передачи. Выполнено проектирование ВГК-передачи в модуле APM Screw для случая рассмотрения неидеальных передач с учетом погрешностей изготовления деталей в контакте «тело качения-дорожка качения». Построены 3D-модели ВГК-передачи, используемой в механизмах привода подач обрабатывающего центра ОЦЗВ в интегрированной САПР КОМПАС-3D.

Ключевые слова: Винт-гайка качения, обрабатывающий центр, ресурс передачи, 3D-модель

Введение. В состав разрабатываемых конструкций станков в качестве основной единицы входят передачи винт – гайка, которые по функциональному назначению делятся на грузовые и ходовые. В машиностроении в приводах станков все большее распространение находят передачи винт-гайка качения, которая предназначена для преобразования вращательного движения в поступательное. Приводы должны реализовать большой диапазон режимов резания, повышенную производительность и точность позиционирования формообразующих органов.

Для современных станочных комплексов характерно повышенная скорость формообразующих узлов более 20 м/мин, а в токарных и сверлильных станках с высоким быстродействием привода характерно время разгона до максимальной скорости не более 0,2 с). Для того чтобы синхронизировать повышенные скорости быстрых перемещений и низкие скорости установочных движений диапазон регулирования привода подач станков с ЧПУ может находиться в диапазоне от 100 до 10 000.

В приводах подач в качестве тягового устройства используется передача винт-гайка

качения (ВГК). Передача винт-гайка качения применяется как в приводах подач без отсчета перемещений (универсальных станков, силовых столов агрегатных станков), так и в приводах подач и позиционирования станков с ЧПУ и обрабатывающих центров. Для передачи свойственны высокий коэффициент полезного действия (0,85...0,9), малое различие между силами трения движения и покоя, незначительное влияние частоты вращения винта на силу трения в механизме, минимизация осевого зазора.

Постановка проблемы. Традиционные методы расчета передач винт-гайка качения основаны на усредненных параметрах процессов изготовления и эксплуатации. Вместе с тем, реальное многономенклатурное производство связано с разнообразными технологическими процессами, широким диапазоном режимов резания и комбинированным характером физических явлений. Поэтому интерес представляют те методы расчета, которые учитывают погрешности возникающие в процессе изготовления, а результаты полученные при этом могут значительно отличаться от традиционных расчетов. Что касается ВГК-передачи, то наличие каналов возврата шариков приводит к проблеме неравномерности нагружения по различным виткам этого устройства. Следовательно нужны методы, процедуры и автоматизированные системы проектирования т.н. неидеальных передач металлорежущих станков.

Анализ последних исследований и публикаций. Вопросы геометрии и кинематики, передач винт-гайка качения рассматриваются в различных литературных источниках. Например, в работах [1, 2, 3] изложены общие вопросы геометрии и кинематики ВГК-передач.

В современных станках с ЧПУ широко применяются две структурные схемы привода подач [2]:

1. Схема с жесткой связью электродвигателя ходового винта, которая изображена на рис.1,а.

2. Схема с одноступенчатым редуктором и выборкой зазора в зубчатом зацеплении рассмотрена на рис. 1,б.

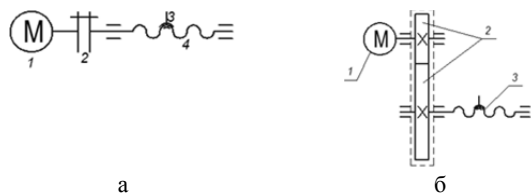


Рис. 1. Схемы привода подач:

- а – с жесткой связью (1 – электродвигатель; 2 – муфта; 3 – передача винт-гайка качения; 4 – винт);
б – с редуктором (1 – электродвигатель; 2 – зубчатая передача; 3 – винтовая передача)

Эти варианты отражают использование коротких кинематических схем приводов подач, обеспечивающие более точную работу последних. Это стало возможным при применении специальных узлов и механизмов, имеющих свои отличительные особенности [4, 5, 6].

1. Первая особенность связана с независимостью частоты вращения от вращающего момента и момента сопротивления, что приводит к повышению качества, точности и производительности обработки. Регулирование скорости подачи осуществляется при постоянном максимально допустимом моменте. Поэтому в основу выбора электродвигателя положена не мощность, а момент сил сопротивления в механизме подачи.

2. К приводу подач предъявляются также требования по возможности создания больших ускорений, значительного диапазона регулирования частоты вращения при высокой равномерности, особенно при малых частотах [7, 8]. Вышеперечисленным требованиям удовлетворяют специальные двигатели постоянного тока – высокомоментные серии ПБВ, с возбуждением от постоянных магнитов или серии 2П, ПБС с электромагнитным возбуждением.

Интересен подход к проектированию и моделированию ВГК-передат на основе процедуры, базирующейся на параметрической геометрической модели с возможностью проведения виртуальных экспериментов для исследования жесткости и передаточной характеристики ВГК при изменении нагрузки и скорости [9]. Данный подход – это инструмент исследования новых геометрий ВГК для их оптимизации и дальнейшего применения в мехатронных модулях.

Цель статьи. Повышение эффективности процедур автоматизированного проектирования ВГК-передат за счет применения средств 3D-моделирования, методов расчета неидеальных передач с использованием модулей САПР АРМ WinMachine.

Результаты исследований. В обрабатывающем центре ОЦЗВ сверлильно-фрезерно-расточного типа в приводах главного движения и подачи широко используются передачи винт-гайка качения. На рис.2 представлены представленные кинематические схемы этих приводов.

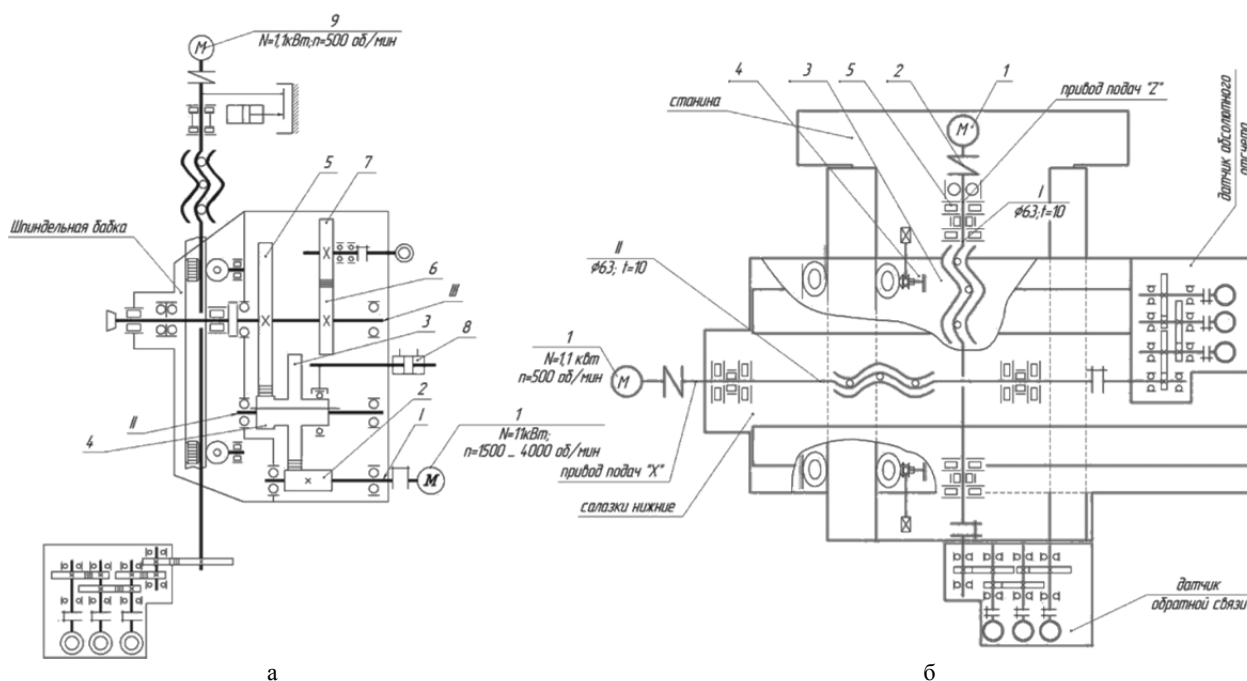


Рис. 2. Передачи винт-гайка качения:

- а – привод главного движения ОЦЗВ; б – привод подач

Привод подач по каждой координате является самостоятельным, конструктивно подобным. Исполнительным звеном в перемещении подвижных органов является безлюфтовая пара винт-гайка качения, которая получает вращение по цепочке: электродвигатель – эластичная муфта – винт-гайка качения. Электродвигатель имеет бесступенчатую регулировку скорости.

Перемещение исполнительных органов салазок нижних, стола-салазок и шпиндельной бабки (соответственно оси координат «Z», «X», «В») осуществляется от индивидуальных приводов подачи по каждой оси координат. Приводы подач унифицированы. От электродвигателя 1 через муфту 2 вращение передается на винт 3 передачи винт-гайка качения, корпус гайки 4 которой закреплен на подвижном органе. В качестве привода используется высокомоментный электродвигатель постоянного тока, что позволяет проводить бесступенчатое регулирование подач. Муфта эластичная, имея высокую крутильную жесткость, позволяет передавать больший крутящий момент и допускает незначительную несоосность и перекося осей винта и вала двигателя при монтаже.

Винт передачи ВГК смонтирован на двух опорах, в конструкцию которых встроены подпружиненные упоры для смягчения удара в аварийных ситуациях. В опорах установлены с предварительным натягом прецизионные подшипники 5, обладающих высокой нагрузочной способностью и жесткостью.

На рис. 3 представлена конструкция передачи ВГК обрабатывающего центра.

Основным критерием работоспособности и расчета ВГК-передачи является износостойкость, а основной причиной выхода из строя винтов и гаек является недопустимое изнашивание их резьбы.

Проведем расчет ВГК-передачи ОЦЗВ [10, 11, 12].

К исходным данным относятся:

1. Масса перемещающихся узлов привода подач:

$$M_x = 1850 \text{ кг}; M_z = 1000 \text{ кг}; M_y = 3000 \text{ кг}.$$

2. Размеры ВГК: условный диаметр – $d_0 = 63$ мм; шаг: $P = 10$ мм;

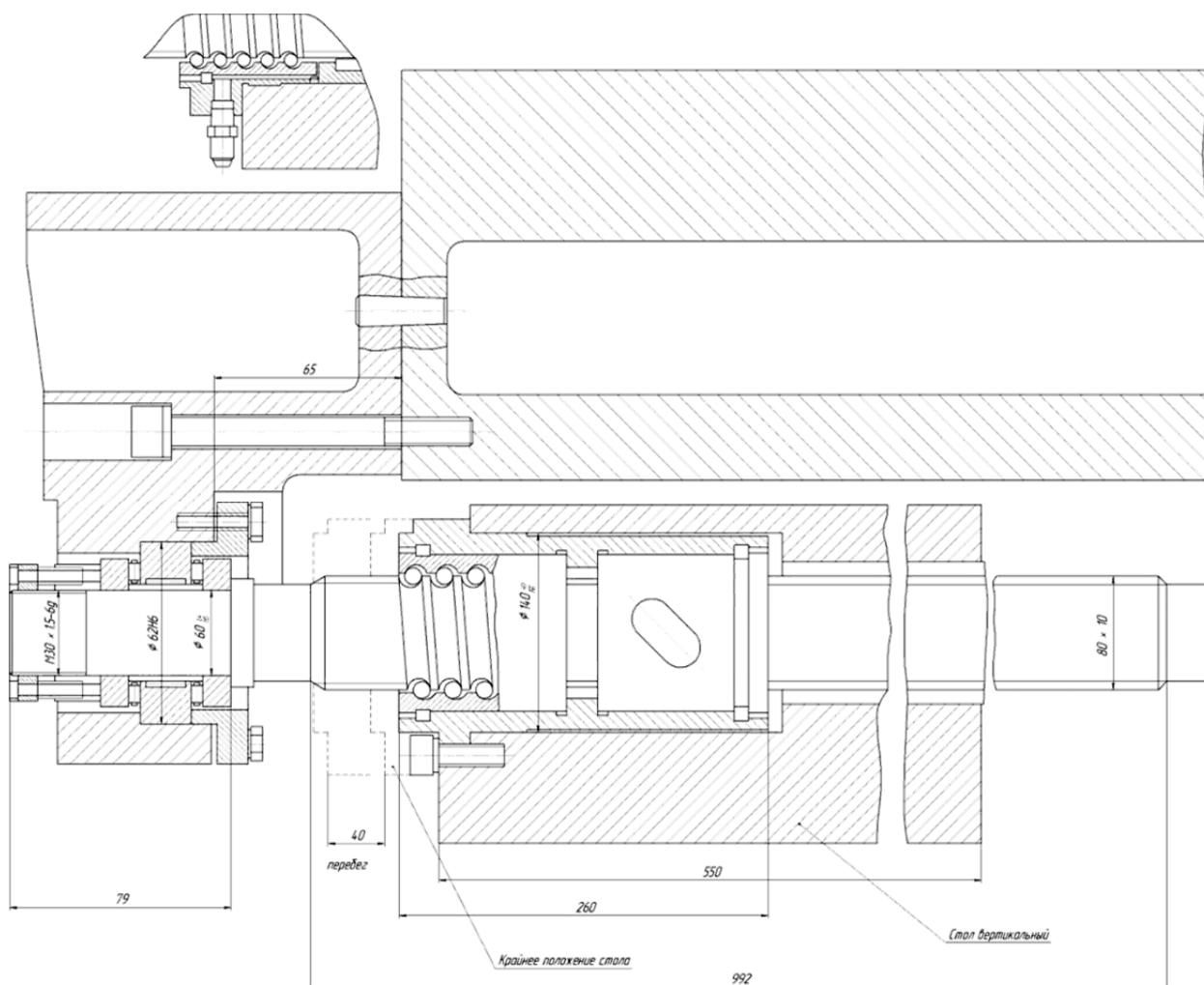


Рис. 3. Фрагмент чертежа ВГК

3. Скорость перемещения исполнительных органов – $V_{xx} = 10$ м/мин;

4. Приведенный коэффициент трения f «бронза-сталь» – при установившемся движении $f = 0,04$, при разгоне $f = 0,05$, а при страгивании с места на средних скоростях $f = 0,07$.

5. Двигатель ВЭМ 225УЗ, $J = 0,0433$ Н·м²; $M_{ном} = 20,5$ Н·м.

При резании момент двигателя равен сумме моментов от сил резания ($M_{дв.р}$) и трения ($M_{т}$)

$$M_{дв.хх} = M_{дв.дин} + M_{дв.т} \text{ (страгивание)}$$

$$M_{дв.раб} = M_{дв.р} + M_{дв.т} \text{ (движение)}$$

Расчет динамических моментов $M_{дв.дин}$ осуществляется по формуле

$$M_{дв.дин} = J_{\Sigma} i \varepsilon_{max}$$

где J_{Σ} – момент инерции механической части привода подач, приведенный к валу электродвигателя, Н·м²;

i – передаточное число;

ε_{max} – максимальное ускорение вала исполнительного механизма, 1/с²

$$\varepsilon_{max} = \frac{\omega_{max}}{T_m} = \frac{\pi \cdot n_{max}}{30 \cdot T_m} = \frac{\pi \cdot V_{max}}{30 \cdot p \cdot T_m},$$

где $V_{max} = V_{xx}$ (исходные данные), мм/мин;

p – шаг винта, мм;

T_m – механическая постоянная времени разгона (торможения) привода.

$$T_m = \frac{V_{xx}}{a} = \frac{10}{60 \cdot 0,3} = 0,42 \text{ с},$$

где a – линейное ускорение, м/с²; для станков высокой точности $a = 0,2 \div 0,4$ м/с².

Принимаем $T_m = 0,5$ с

$$\varepsilon_{max} = \frac{\pi \cdot 1000}{30 \cdot 10 \cdot 0,5} = 209,4, 1/\text{с}^2.$$

Расчет динамических моментов, $M_{дин}$:

$$M_{дин х} = (J_y + J_x) \varepsilon_{max} = (0,0433 + 0,024) \cdot 209,4 = 14,1 \text{ Н·м};$$

$$M_{дин у} = (J_y + J_y) \varepsilon_{max} = (0,0433 + 0,021) \cdot 209,4 = 13,5 \text{ Н·м};$$

$$M_{дин з} = (J_y + J_z) \varepsilon_{max} = (0,0433 + 0,026) \cdot 209,4 = 14,5 \text{ Н·м}.$$

Расчет нагрузок на привод подач. При этом рассматриваются 2 режима страгивания и максимального рабочего режима.

Нагружение на винт при страгивании определяется по формуле:

$$Q = Mgf + F_{mn},$$

где F_{mn} – сила трения в направляющих, Н

$$F_{mn} = 0,0025 \cdot H_n (\sum bi) f \cdot 9,8,$$

где H_n – длина направляющих, мм;

$\sum bi$ – сумма размеров по ширине касательных граней направляющих, мм

$$F_{np x} = 0,0025 \cdot 780 \cdot 242 \cdot 0,07 \cdot 9,8 = 323,7 \text{ Н};$$

$$F_{np y} = 0,0025 \cdot 650 \cdot 242 \cdot 0,07 \cdot 9,8 = 270,0 \text{ Н};$$

$$F_{np z} = 0,0025 \cdot 820 \cdot 242 \cdot 0,07 \cdot 9,8 = 340,3 \text{ Н}.$$

Нагружение на винт при страгивании:

$$Q_{хстр.} = 1850 \cdot 9,8 \cdot 0,07 + 323,7 = 1592,8 \text{ Н};$$

$$Q_{зстр.} = 3000 \cdot 9,8 \cdot 0,07 + 340,3 = 2398,3 \text{ Н}.$$

Нагружение на винт при рабочем режиме для столов станков с прямоугольными направляющими определяется по формуле:

$$Q = 1,1 P_{под} + (P' + P'' + M \cdot g) f,$$

где $P_{под}$ – составляющая силы резания, действующая в направлении подачи, Н;

P', P'' – составляющие сил резания, Н;

f – приведенный коэффициент трения.

Нагружение на винт при рабочем режиме в приводах по координатам:

- привод по координате «Х»

$$Q_x = 1,1 \cdot 421 \cdot 9,8 + (328 \cdot 9,8 + 249 \cdot 9,8 + 1850 \cdot 9,8) 0,04 = 5490 \text{ Н};$$

- привод по координате «Z»

$$Q_z = 1,1 \cdot 842 \cdot 9,8 + 3000 \cdot 9,8 \cdot 0,04 = 10253 \text{ Н};$$

- привод по координате «У»

$$Q_y = 1114 \cdot 9,8 = 10917 \text{ Н};$$

Расчет моментов сопротивления нагружению, определяемый по формуле

$$M_c = Q \cdot \frac{d_{кв}}{2} \cdot \text{tg} \cdot (\lambda_6 + \rho) + M_0 + M_m,$$

где Q – максимальное нагружение на винт привода, Н;

$d_{кв}$ – рабочий диаметр винта, мм;

λ_6 – угол винтовой линии резьбы;

ρ – приведенный угол трения;

Моменты холостого хода M_0 и момент трения в уплотнениях и подшипниках M_m передачи ВГК составляет:

$$M_0 = 1,47 \text{ Н·м}; M_m = 4 \text{ Н·м}.$$

Находим рабочий диаметр винта

$$d_{кв} = d_o - 2r_1 \cos \alpha = 63 - 2 \cdot 3 \cdot 0,707 = 58,8 \text{ мм}$$

где d_o – условный диаметр винта, мм;

r_1 – радиус шарика, мм;

α – угол контакта.

Угол подъема винтовой линии резьбы:

$$\text{tg} \lambda_6 = \frac{t}{\pi \cdot d_{кв}} = \frac{10}{\pi \cdot 58,8} = 0,05413; \quad \lambda_6 = 3^\circ 05'55'.$$

Приведенный угол трения ρ равен

$$\operatorname{tg} \rho = \frac{0,001}{r_1 \cdot \sin \alpha} = \frac{0,001}{0,3 \cdot 0,707} = 0,00472.$$

Таблица 1

Параметры нагружения передачи ВГК

Наименование привода, Режим работы	Нагружение на винт, Н	Момент сопротивления нагружению M_c , Н·м	Момент сопротивления, приведенный к валу двигателя $M_{дв}$, Н·м	Суммарный момент двигателя $M_{дв.сум}$, Н·м
Привод по координате «Х» Разгон до скорости V_{xx}	1593 5490	8,24 15,0	8,5 15,0	22,6 15,5
Привод по координате «У» Разгон до скорости V_{xx}	1798,0 10917,0	8,59 24,42	8,7 24,8	22,9 24,8
Привод по координате «Z» Разгон до скорости V_{xx}	2398,0 10253,0	9,63 23,27	9,9 24,0	24,4 24,0

Подставляем значения $d_{кв}$, $\lambda_{в}$, ρ , M_0 и M_m в формулу для определения моментов сопротивления нагружению M_c и сводим все результаты в табл.1,

где представлены также расчетные значения моментов сопротивления приведенных к валу электродвигателя $M_{дв}$ и суммарный момент двигателя $M_{дв.сум}$, возникающие в процессе фрезерования.

При сравнении полученных значений $M_{дв}$ и $M_{дв.сум}$ с допустимыми значениями работы двигателя можно сделать вывод о том, что двигатель будет работать в номинальном режиме без перегрева.

Существует другой подход к проектированию ВГК-передачи, использующий новую методику, когда рассматривается т.н. неидеальная передача [13, 14, 15, 16]. Для этих целей предназначен модуль APM Screw [14, 17] – модуль проектирования и расчета винтовых передач. Этот подход учитывает погрешности изготовления деталей в контакте: «тело качения-дорожка качения». Неидеальное представление позволяет уточнить методы инженерного расчета и приблизить их модели к реальным. В основе расчета параметров неидеальной винтовой передачи лежит расчет ее контактной жесткости. Определение контактных напряжений лежит в основе расчета статической прочности передачи. При этом следует помнить, что эти напряжения не должны превышать 3500 МПа так как, в противном случае, велика опасность появления пластических деформаций.

Другие характеристики винтовой передачи в большей или меньшей степени зависят от параметра жесткости: моменты трения; потери мощности; осевые радиальные и угловые биения; долговечность; наибольшие контактные напряжения и др.

Неидеальное представление винтовой пары позволяет определить, кроме средних значений параметров потерь мощности, момента трения, смещений и т.д., величины их рассеяния, а потому большинство расчетных характеристик представляется в статистически обработанном виде.

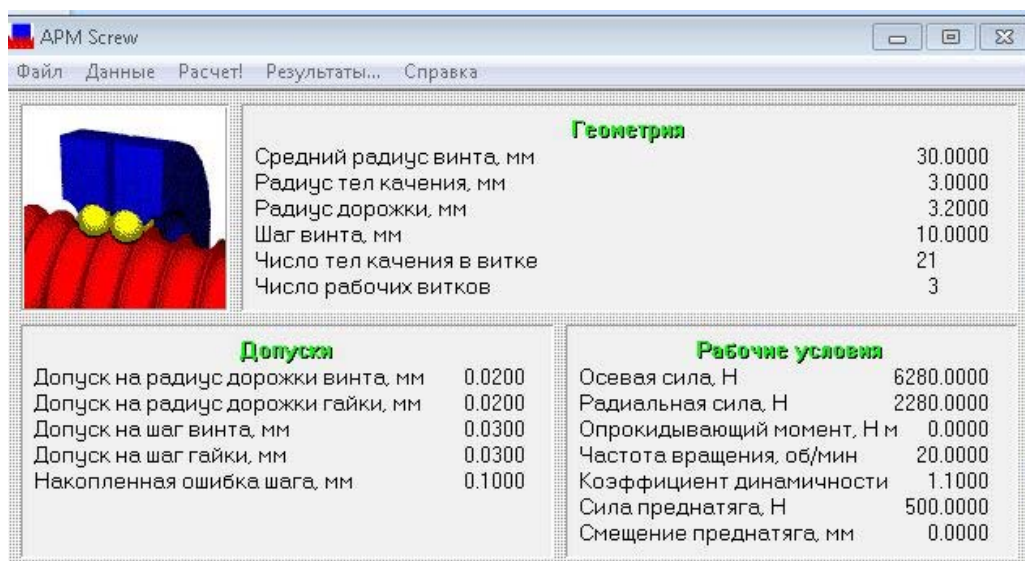


Рис. 4. Исходные данные

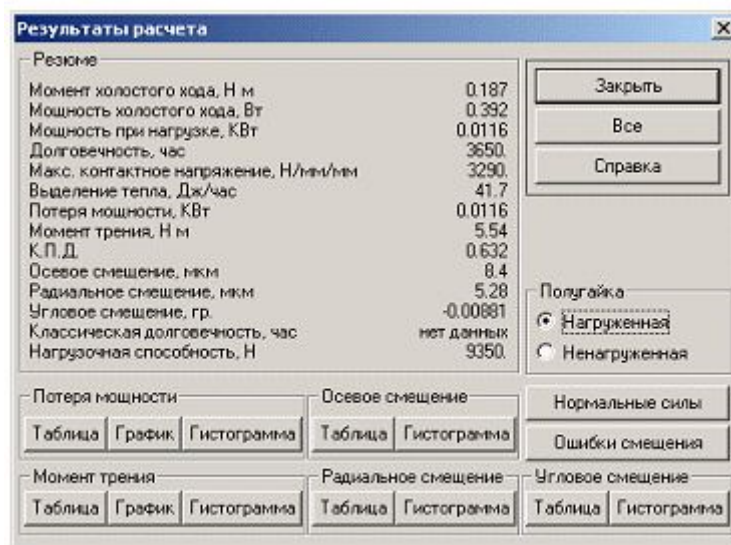


Рис. 5. Результаты расчета

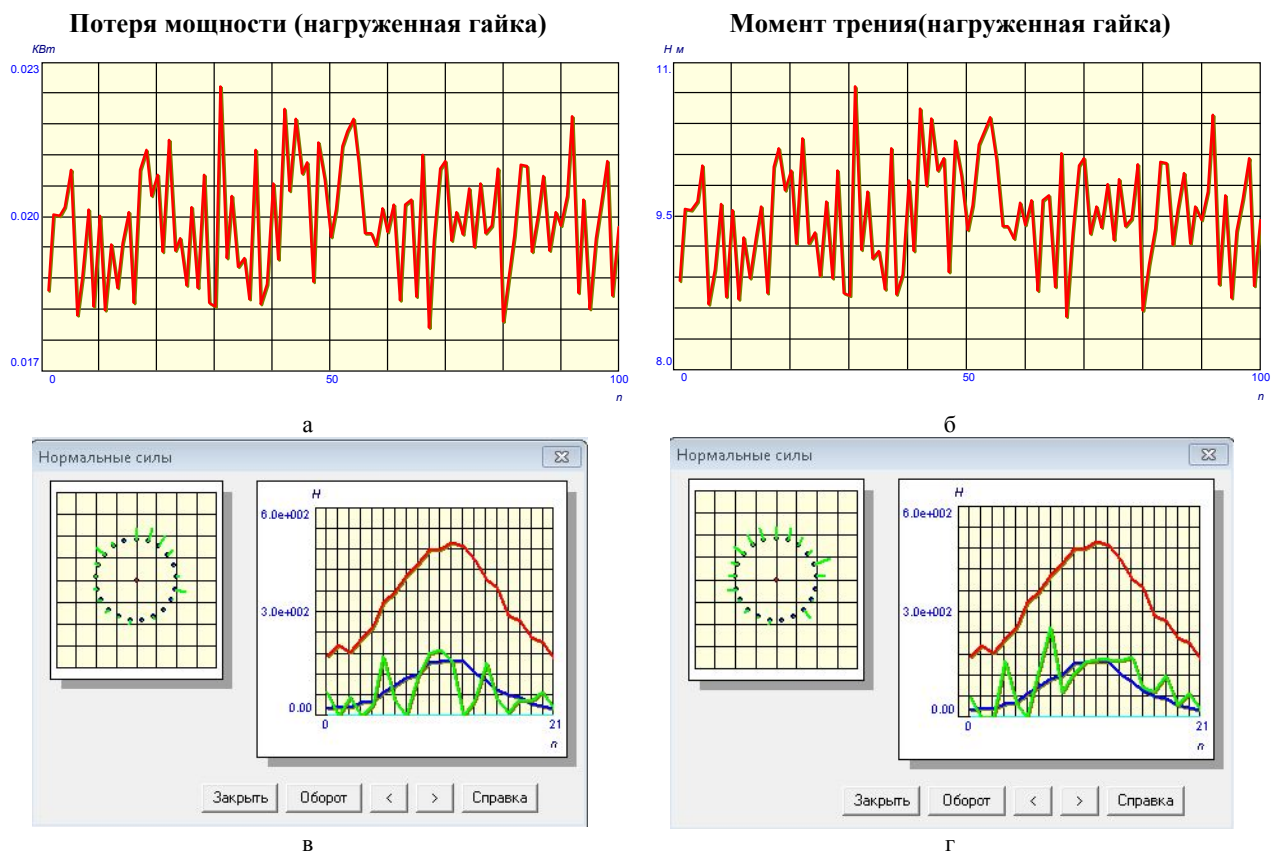


Рис. 6. Энергетические характеристики передачи:

а – потеря мощности; б – момент трения; в, г – нормальные силы

С помощью APM Screw можно рассчитать и спроектировать следующие типы винтовых передач: винтовые передачи скольжения; шарико-винтовые передачи с преднатягом; шарико-винтовые передачи без преднатяга; планетарно-винтовые передачи. С помощью APM Screw можно рассчитать следующие характеристики ВГК передач: геометрические параметры передач; силы, действующие в передаче;

долговечность; потери мощности на трение; максимальную допустимую нагрузку и др.

Рассчитаем передачу ВГК привода подач обрабатывающего центра ОЦЗВ (рис. 2) в модуле APM Screw. Введем исходные данные (рис. 4):

С помощью модуля APM Screw получены следующие результаты (рис.5):

Энергетические характеристики передачи с предварительным натягом могут быть рассчитаны,

как для ненагруженной, так и нагруженной полугайки. Для последней эти характеристики представлены на рис. 6.

Модуль APM Screw позволяет эффективно исследовать распределение нормальных сил, действующих на тела качения в пространстве дорожек качения. В диалоговом окне «Нормальные силы» изображается нагрузка на тела качения в первом из рабочих витков шарико-винтовой передачи (рис.6,в). Нажимая кнопку «Оборот», можно посмотреть распределение нормальных сил (рис.6,г) при различных положениях винта (100 значений), а с помощью кнопок «<<» и «>>» можно выбрать различные витки передачи.

Наряду с энергетическими, модуль предоставляет расчетные данные о точностных характеристиках (рис.7).

Результаты расчета ресурса передачи показывают, что выполняется условие пригодности шариковинтовой передачи

$$L_{ah} \geq L_{ahT} \rightarrow 41116 > 5000,$$

где L_{ah} – расчетный ресурс, ч;

L_{ahT} – требуемый ресурс, ч.

Требуемый ресурс работы передачи ВГК находится в диапазоне $(5 \dots 10) \cdot 10^3$, час.

Ниже представлен фрагмент расчета расчетного ресурса в программной среде Maple:

```
>fa:=6280.0:kp:=1.0:
ka:=.8:km:=1.0:ca:=62030.0:d:=63.0:t:=10.0:dsh:=6.
0:nc:=20.0:
>catp:=1.25*fa/(kp*ka*km);
catp:=9812.500000
>cap:=ca*(kp*ka*km);
cap:=49624.0000
>la:=cap/fa;
la:=7.901910828
>lah:=10**6*(cap/fa)**3/(60*nc);
lah:=4.111640423 105.
```

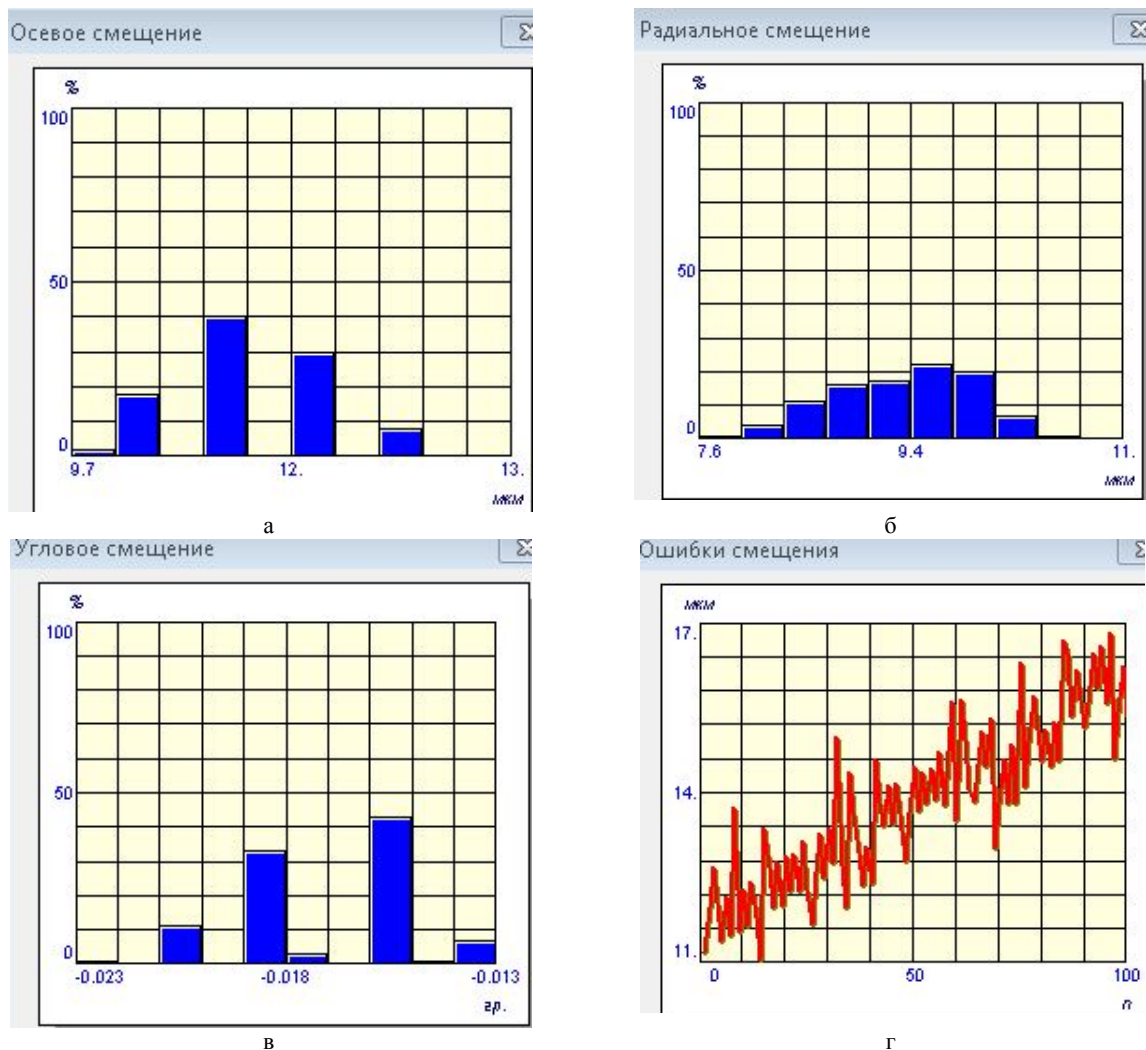


Рис. 7. Точностные характеристики:

а – осевое смещение; б – радиальное смещение; в – угловое смещение; г – ошибки смещения

Для исследования конструкции ВГК-передачи обрабатывающего центра ОЦЗВ, с помощью которой осуществляется движение подачи узла стола салазки построим 3D-модель (рис.8, рис.9) этой передачи в САПР КОМПАС-3D [18, 19, 20, 21].

Полученные 3D-модели являются основой всестороннего инженерного анализа проектируемого объекта с использованием

инструментов CAE-анализа, а также осуществления комплекса расчетов по критериям прочности и жесткости ВГК-передач. Для этого используются программы дающие представления о напряженно-деформированном состоянии компонентов привода подач, входящие в программный комплекс CAD/CAE системы APM WinMachine и САПР КОМПАС-3D [22-26].

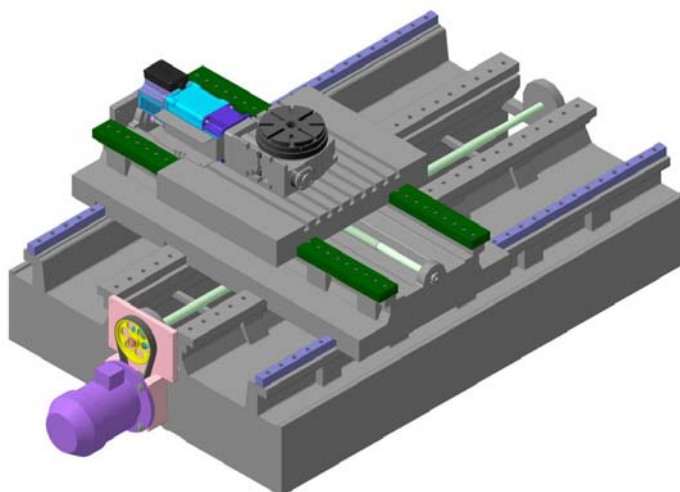


Рис. 8. 3D-модели ВГК-передачи стола обрабатывающего центра

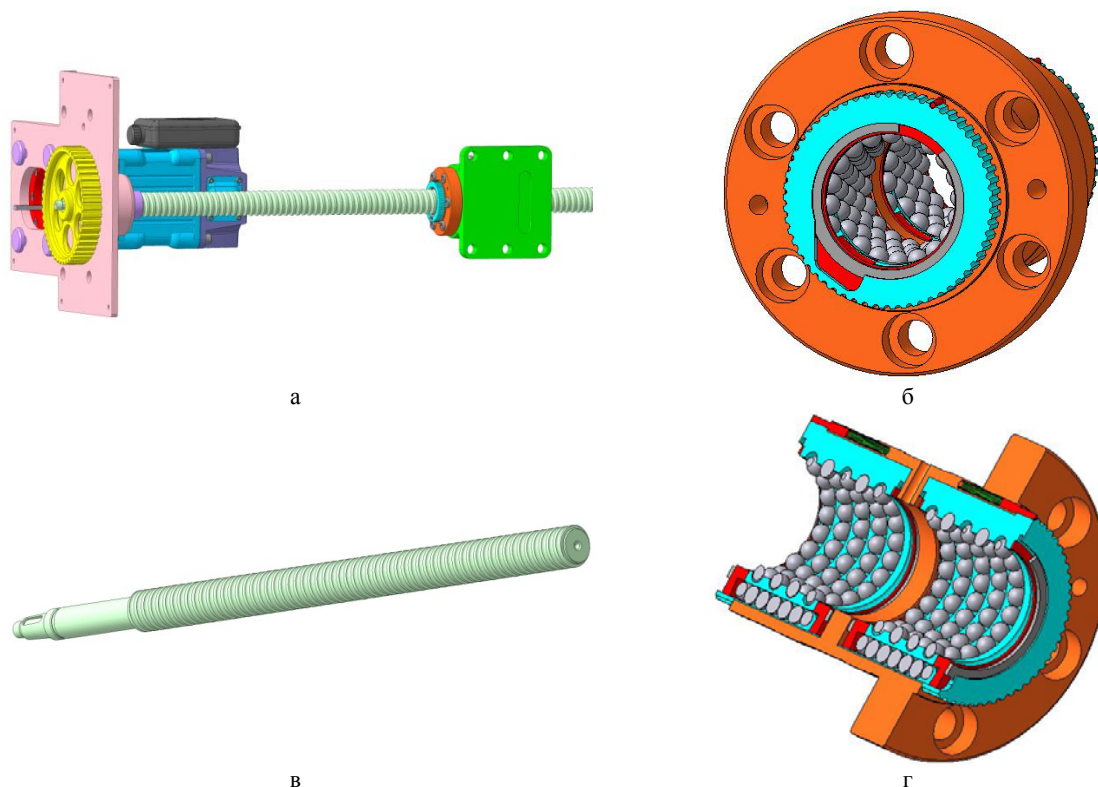


Рис. 9. 3D-модели компонентов ВГК-передачи:
а – сборочный узел; б – гайка в сборе; в – винт; г – гайка в разрезе

Выводы. Проведено комплексное исследование конструкции передачи винт-гайка качения обрабатывающего центра модели ОЦЗВ с использованием процедур автоматизированного проектирования в САПР APM WinMachine и 3D-моделирования конструкции ВГК-передачи.

Проведен расчет основных параметров передачи в модуле APM Screw – модуле проектирования и расчета винтовых передач. Полученные результаты, отличаются тем, что в автоматизированном расчете рассматривалась т.н. неидеальная конструкция, и учитывались погрешности изготовления в зоне контакта тел качения и дорожек качения ВГК-передачи. Расчетное значение критерия по традиционной методике значительно превышает требуемый ресурс 5000 часов, в то время как учет неидеальности контакта (ресурс не превышает 3650 часов) делает проблематичным использование этой передачи на максимальных нагрузках на привод подач. Кроме того, приближается к пределу и контактные напряжения, достигающие значения 3290 МПа, что может привести к нарушению работоспособности по критерию несущей способности. Широкий спектр возможностей модуля APM Screw позволяет совершенствовать качество проектируемых приводов металлорежущих станков, проводить комплексные исследования и намечать пути совершенствования конструкций ВГК-передач.

Л и т е р а т у р а

1. Детали и механизмы металлорежущих станков / Под ред. Д.Н. Решетова. Т. 2. – М.: Машиностроение, 1972. – 520 с.
2. Детали машин: учебник для академического бакалавриата / М.Н. Иванов, В.А. Финогенов. – 15-е изд. испр. и доп. – М.: Юрайт, 2014. – 408 с.
3. Леликов О.П. Основы расчета и проектирования деталей и узлов машин: конспект лекций по курсу “Детали машин”. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2007. – 464 с.
4. Shevchenko S., Muhovaty A., Krol O. Geometric Aspects of Modifications of Tapered Roller/ Procedia Engineering 150 (2016) 1107-1112.
5. Кріль О.С., Шевченко С.В., Соколов В.І. Проектування металорізальних верстатів в середовищі APM WinMachine. Підручник. ISBN 978-966-590-926-2 (Затверджено МОНМСУ як підручник, гриф №1/11-4102 від 25.05.11р.). – Луганськ: Вид-во СХУ ім. В. Даля, 2011. – 400 с.
6. Кріль О.С. Параметрическое моделирование металлорежущих станков и инструментов. Монография. ISBN 978-966-590-935-4 / Луганськ: Вид-во СХУ ім. В. Даля, 2012. – 116 с.
7. Кріль О.С., Кріль А.А., Синдеева Е.В. Моделирование конструкции четырехопорного вала в САПР APM «WinMachine» // «Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні». Зб. наук. пр. – Луганськ: СХУ ім. В. Даля, 2008. – С. 139-143.
8. 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.
9. Кузнецов А.В. Моделирование многокомпонентных динамических систем на примере шарико-винтовой передачи // Технические науки - от теории к практике: сб. ст. по матер. XIV междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск: СибАК, 2012. – С. 39-47.
10. Кріль О.С., Шевченко С.В., Синдеева О.В., Покінтелиця М.І. Проектування механічних передач металорізальних верстатів за допомогою системи WinMachine. Навчальний посібник, ISBN 978-966-590-652-0 / Луганськ: Вид-во СХУ ім. В. Даля, 2007. – 200 с.
11. Кріль О.С., Кріль А.А. Расчет податливости станка СФ68ВФ4 и моделирование динамики формообразования // Вісник СевНТУ, вип. 117 «Машинобудування та транспорт», Севастополь. – 2011. – С. 81-84.
12. Krol O., Khmelnytsky A. 3D-modelling and investigating of spindle's node of angular head for multyoperation tool/ TEKA Commision of Motorization and Energetic in Agriculture. – Lublin, Poland. –Vol.15. – № 3. (2015), p. 35-40.
13. Шелюфаст В.В. Основы проектирования машин.–М.: Изд-во АПМ, 2005. – 472 с.
14. Замрий А.А. Практический учебный курс CAD/CAE APM WinMachine. Учебно-методическое пособие. – М.: Изд-во АПМ, 2007. – 144 с.
15. Нерубашенко А.А., Кріль О.С., Кріль А.А. Создание базы данных параметрических моделей деталей станков в модуле APM Base // Вісник СевНТУ, 2010, вип.107. – С.107-109
16. Кріль О.С. Построение параметрических моделей ременных передач с использованием системы APM WINMACHINE//Восточноєвропейський журнал передових технологій. – X: - 2012. № 2/7(62). – С. 61-63.
17. APM Screw. Система проектирования и расчета винтовых передач. Руководство пользователя. – М.: Изд-во АПМ, 2015. – 12 с.
18. Кріль О.С. Тривимірне моделювання металорізальних верстатів та інструментального оснащення. Навчальний посібник. ISBN 978-617-11-0074-9 / О.С. Кріль, В.І. Соколов. – Северодонецьк: Вид-во СХУ ім. В.Даля, 2016. – 160 с.
19. Krol O. Modeling of construction spindle's node machining centre SVM1F4/ Krol O, Osipov V./TEKA Com. Mot. and Energ. in Agriculture. – OL PAN, 2013, Vol.13, No 3, Lublin, Poland. – P. 108-113.
20. Krol O. 3D-modeling and optimization spindle's node machining centre SVM1F4 /O. Krol, I. Sukhorutchenko [Text] // TEKA Commision of Motorization and Energetic in Agriculture. –Vol.13. – № 3. 2013.– Lublin, Poland. – P. 114-119.
21. Кріль О. С. Методы и процедуры 3D-моделирования металлорежущих станков и инструментов. Монография. ISBN 978-617-11-0049-7/ О.С. Кріль. – Северодонецьк: Вид-во СХУ ім. В.Даля, 2015. – 120 с.
22. Кріль О.С. Моделирование шпиндельного узла обрабатывающего центра / О.С.Кріль, Е.И.Бурлаков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – X: НТУ «ХПІ» – № 11(985), 2013. – С. 33-38.
23. Кріль О.С. Твердотельное моделирование и исследование шпиндельного узла обрабатывающего центра/О.С.Кріль, А.А.Кріль, Е.И. Бурлаков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія:

Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХПІ» – № 16(989), 2013. – С. 14-18.

24. Кріль О.С. Исследование шпиндельного узла многооперационного станка модели СФ16МФ3/ О.С. Кріль // Вісн. Східноукр. Нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2014. – № 6. – С. 121-125.
25. Соколов В.І., Кріль О.С., Єпіфанова О.В. Гідравліка. – Северодонецьк: СНУ ім. В. Даля. – 2017. – 160 с.
26. Кріль О.С., Шумакова Т.О., Соколов В.І. Проектування зуборізних інструментів за допомогою системи КОМПАС. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля. – 2013. – 142 с.

References

1. Details and mechanisms of metal-cutting machine tools / Ed. D.N. Reshetov. Т 2. – М.: Mechanical Engineering, 1972. – 520 p.
2. Details of machines: a textbook for academic Bachelor's degree/ M.N. Ivanov, V.A. Finogenov. – 15 th ed. Correction and additional. – М.: Yurayt, 2014. – 408 p.
3. Lelikov, O.P. Basics of calculation and design of parts and machine components: a summary of lectures on the course "Machine parts." – 3rd ed. Rewrite and additional. – М.: Mechanical Engineering, 2007. – 464 p.
4. Shevchenko S., Muhovaty A., Krol O. Geometric Aspects of Modifications of Tapered Roller/ Procedia Engineering 150 (2016) 1107-1112.
5. Krol O.S., Shevchenko S.V., Sokolov V.I. Design of metal-cutting machines in the environment of APM WinMachine. Textbook. ISBN 978-966-590-926-2 (approved by MONMSU as textbook, neck No. 1 / 11-4102, dated May 25, 2011 year). – Lugansk: Publishing house of SNU, 2011. – 400 p.
6. Krol O.S. Parametric modeling of metal-cutting machines and tools. Monograph. ISBN 978-966-590-935-4 / Lugansk: Publishing house of SNU, 2012. – 116 p.
7. Krol O.S., Krol A.A., Sindeeva E.V. Modeling of the design of the four-shaft shaft in the CAD APM "WinMachine" // "Resource-saving technologies of production and processing of materials in machine building". Digest of scientific works. – Lugansk: Publishing house of SNU, 2008. – P. 139-143.
8. Krol O.S., Krol A.A. Parametrization of the transverse layouts of the drive of the main motion // Tool reliability and optimization of technological systems. Digest of scientific works – Kramatorsk: issue 24, 2009. – P. 164-168.
9. Kuznetsov A.V. Modeling of multicomponent dynamical systems using the example of a ball-screw transmission // Technical sciences – from theory to practice: Digest by mater. XIV Intern. scientific-practical. Conf. – Novosibirsk: SibAK, 2012. – P. 39-47.
10. Krol O.S., Shevchenko S.V., Sindyeveva O.V., Pokintelitsya M.I. Design of mechanical gears of metal-cutting machines with the help of a system APM WinMachine. Handbook, ISBN 978 - 966 - 590 - 652 - 0 / Lugansk: Publishing house of SNU, 2007. – 200 p.
11. Krol O.S., Krol A.A. Calculation of the compliance of the SF68VF4 machine and the modeling of the dynamics of shaping // Bulletin of SevNTU, Issue 117 "Machinebuilding and transport", Sevastopol, 2011. – P. 81-84.
12. Krol O., Khmel'nitsky A. 3D-modelling and investigating of spinle's node of angular head for multyoperation tool/ TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Lublin, Poland. – Vol.15. – № 3. (2015), P. 35-40.
13. Shelofast V.V. Fundamentals of designing machines. – М.: Publishing house of the APM, 2005. – 472 p.
14. Zamriy A.A. Practical training course CAD/CAE APM WinMachine. Teaching-methodical manual. – М.: Publishing House of the APM, 2007. – 144 p.
15. Nerubaschenko A.A., Krol O.S., Krol A.A. Creation of a database for parametric models of machine parts in the APM Base module // Bulletin of SevNTU, 2010, issue.107. – P.107-109.
16. Krol O.S. Construction of parametric models of belt transmissions using the AWM WINMACHINE system / Eastern European Journal of Advanced Technologies. – Kharkiv – 2012. No. 2/7 (62). – P. 61-63.
17. APM Screw. System for designing and calculating screw gears. User guide. – М.: Publishing House of APM, 2015. – 12 p.
18. Krol O.S. Three-dimensional modeling of machine tools and tool equipment. Handbook. ISBN 978-617-11-0074-9 / O.S. Krol, V.I. Sokolov. – Severodonetsk: Publishing house of SNU, 2016. – 160 p.
19. Krol O. Modeling of construction spindle's node machining centre SVM1F4/ Krol O, Osipov V.//TEKA Com. Mot. and Energ. in Agriculture. – OL PAN, 2013, Vol.13, № 3, Lublin, Poland. – P. 108-113.
20. Krol O.3D-modeling and optimization spindle's node machining centre SVM1F4 /O. Krol, I. Sukhorutchenko [Text] // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. –Vol.13. – № 3. 2013. – Lublin, Poland. – P. 114-119.
21. Krol O.S. Methods and procedures of 3D-modeling of metal-cutting machine tools and instruments. Monograph. ISBN 978-617-11-0049-7 / O.S. Krol. – Severodonetsk: Publishing house of SNU, 2015. – 120 p.
22. Krol O.S. Modeling of the spindle unit of the machining center / O.S.Krol, E.I.Burlakov // Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technologies – Kharkiv: NTU "KhPI" – № 11 (985), 2013. – P. 33-38.
23. Krol O.S. Solid modeling and investigation of the spindle knot of the machining center / O.S.Krol, A.A. Krol, E.I. Burlakov // Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technologies. – Kharkiv: NTU "KhPI". – № 16 (989), 2013. – P. 14-18.
24. Krol O.S. Investigation of the spindle unit of the multi-operation machine model SF16MF3 / O.S. Krol // Bulletin of SNU. – 2014. – No. 6. – P. 121-125.
25. V. Sokolov, O. Krol, O. Yepifanova. Hydraulics. V. Dahl EUNU, Severodonetsk, 2017.
26. Krol O., Shumakova T., Sokolov V. Design metal cutting instruments by dint of system of KOMPAS. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2013.

Кріль О.С., Кадаффі М.С., Бойчук Д.А., Дерябін І. О. Дослідження та моделювання передачі гвинт-гайка кочення обробного центра в АРМ WinMachine

У статті проведено дослідження конструкції і геометрії передачі гвинт-гайка кочення (ВГК). Проведено розрахунок працездатності ВГК-передачі приводу подач обробного центру і дана оцінка параметрів довговічності і несучої здатності цієї передачі. Виконано проектування ВГК-передачі в модулі APM Screw для випадку розгляду неідеальних передач з урахуванням похибок виготовлення деталей в контакті «тіло кочення-доріжка кочення». Побудовано 3D-моделі ВГК-передачі, використаної в механізмах приводу подач обробного центру ОЦЗВ в інтегрованої САПР КОМПАС-3D.

Ключові слова: гвинт-гайка кочення, обробний центр, ресурс передачі, 3D-модель

Krolo O., Kadaffi M., Boychuk D., Deryabin I.
Research and modelling of screw-nut rolling for the machining center

The article deals with the design and geometry of screw-nut rolling (VGK) transmission. The calculation of the efficiency of the VGK transmission of the feed drive of the machining center is carried out and the parameters of the longevity and bearing capacity of this transmission are estimated. The design of the VGK transmission in the APM Screw module has been completed for the case of non-ideal gears considering the manufacturing errors in the "rolling-track" contact. The 3D models of the VGK-transmission used in the mechanisms of the feed of the machining center OTS3V in the integrated CAD KOMPAS-3D are built.

Keywords: screw-nut rolling, machining center, transmission resource, 3D-model

Кроль О.С. – к.т.н., доцент, профессор кафедри машинобудування та прикладної механіки Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля, e-mail: krolos.snu.edu@gmail.com

Кадаффи М.С. – студент кафедри машинобудування та прикладної механіки Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля

Бойчук Д.А. – студент кафедри машинобудування та прикладної механіки Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля

Дерябін І. – студент кафедри комп'ютерної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля

Рецензент: д.т.н., проф. **Соколов В.І.**

Стаття подана 21.09.2017

УДК 004.932; 658:675.025.55

ДВУХПРИЗНАКОВОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПЕРФОРАЦИОННОГО МАРКЕРА

Логунов А. Н

TWO-SIGNIFICANT RECOGNITION OF PERFORATIVE MARKER IMAGE

Logunov O.M.

В статье рассмотрено снижение вероятности ошибки классификации при распознавании изображения перфорационного маркера за счет использования в качестве признаков классификации пикселей откликов двух различных корреляционных фильтров. На основании обработки партии реальных изображений получены объёмные графики зависимости вероятности ошибки от коэффициентов разделяющей функции.

Ключевые слова: перфорационный маркер, корреляция, распознавание, идентификация, признак.

Введение. Система управления качеством продукции выдвигает требование идентификации и прослеживаемости изделий на всех стадиях обработки. В кожевенном производстве идентификация осуществляется методом нанесения перфорационного маркера на обрабатываемое изделие. Современный уровень управления предприятием требует реализации автоматического считывания идентификационных маркеров [1-5].

Метод распознавания визуальных образов основан на вычислении коэффициента корреляции r_c двух прямоугольных матриц равного размера A и B , содержащих значения яркости пикселей соответственно участка изображения и эталона [6]. Существенным недостатком является низкое быстродействие системы распознавания при его использовании. Увеличение быстродействия возможно в случае использования алгоритмов быстрого преобразования Фурье для вычисления корреляции [7]. В настоящее время отсутствуют методы двумерной фильтрации, в которых сочетаются предельно достижимое качество фильтрации и низкие требования к вычислительным ресурсам ЭВМ, реализующей обработку [8].

Цель работы. Уменьшения вероятности ошибки распознавания за счет использования двух признаков на этапе классификации пикселя изображения. В качестве признаков были использованы отклики двух различных корреляционных фильтров.

Результаты исследований. Для определения вероятности ошибки была построена гистограмма отклика, созданная на основании нескольких тысяч реальных изображений элементов маркировки, полученных в процессе производственной эксплуатации.

Для отображения гистограмм использовался формат bmp-файла, при этом число попаданий d_{ij} в двумерный интервал гистограммы связано с цветовыми компонентами следующей формулой $d_{ij} = r_{ij} + 2^8 g_{ij} + 2^{16} b_{ij}$.

Для устранения локальных выбросов гистограммы использовалось сглаживание с помощью окна Гаусса:

$$G_{i,j} = \exp \left[-\frac{(i - m_g)^2}{d_g} \right] \cdot \exp \left[-\frac{(j - m_g)^2}{d_g} \right]$$

где $m_g=4$; $d_g=1.5$; $i=0,1,\dots,2m_g$; $j=0,1,\dots,2m_g$.

Матрица окна Гаусса в этом случае имеет вид:

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0.0000001 & 0.0000016 & 0.000012 & 0.0000233 & 0.000012 & 0.0000016 & 0.0000001 & 0 \\ 0.0000001 & 0.0000061 & 0.0001722 & 0.0012726 & 0.0024788 & 0.0012726 & 0.0001722 & 0.0000061 & 0.0000001 \\ 0.0000016 & 0.0001722 & 0.0048279 & 0.035674 & 0.0694835 & 0.035674 & 0.0048279 & 0.0001722 & 0.0000016 \\ 0.000012 & 0.0012726 & 0.035674 & 0.2635971 & 0.5134171 & 0.2635971 & 0.035674 & 0.0012726 & 0.000012 \\ 0.0000233 & 0.0024788 & 0.0694835 & 0.5134171 & 1 & 0.5134171 & 0.0694835 & 0.0024788 & 0.0000233 \\ 0.000012 & 0.0012726 & 0.035674 & 0.2635971 & 0.5134171 & 0.2635971 & 0.035674 & 0.0012726 & 0.000012 \\ 0.0000061 & 0.0001722 & 0.0048279 & 0.035674 & 0.0694835 & 0.035674 & 0.0048279 & 0.0001722 & 0.0000061 \\ 0.0000001 & 0.0000061 & 0.0001722 & 0.0012726 & 0.0024788 & 0.0012726 & 0.0001722 & 0.0000061 & 0.0000001 \\ 0 & 0.0000001 & 0.0000016 & 0.000012 & 0.0000233 & 0.000012 & 0.0000016 & 0.0000001 & 0 \end{bmatrix}$$

Сглаженные с помощью окна Гаусса плотности вероятности тестовых выборок в виде функции двух переменных показаны на рис. 1.

Граница разделения плоскости признаков на области принятия решений R_d и R_f в случае двух классов [9] в самом простом случае имеет вид линейной функции

$$j_R = a_q \cdot i_R + b_p \quad (1)$$

где i_R – приведенное к диапазону 0...255 значение признака 1 (отклик на двумерный корреляционный фильтр);

j_R – приведенное к диапазону 0...255 значение признака 2 (отклик на фильтр ядро-рамка).

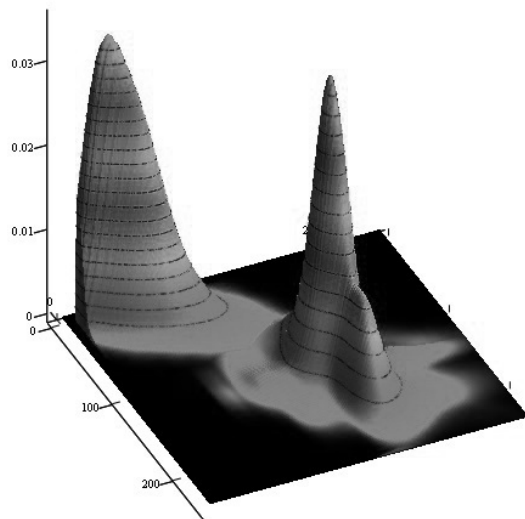


Рис. 1. Распределение плотности вероятности тестовых выборок после выполнения сглаживания (слева – отверстия, справа – фон)

Коэффициенты разделяющей функции находятся как решение задачи минимизации выражения ошибки классификации для тестовой выборки.

Представив коэффициенты в формуле (1) равными: $a_q = -0,02q - 3,1$; $b_p = 280 + p$; $p = 0, 1, \dots, 50$; $q = 0, 1, \dots, 50$, получим сетку, в узлах которой рассчитываются значения ошибки классификации. Вид этой функции в логарифмическом масштабе показан на рис. 2.

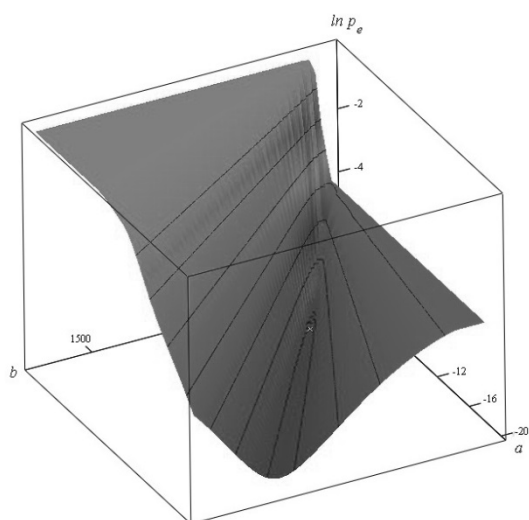


Рис. 2. Зависимость логарифма вероятности ошибки классификации от коэффициентов разделяющей функции (минимум показан крестиком)

Минимум ошибки достигается при значениях коэффициентов $a_{kl} = -3,5$; $b_{kl} = 304$ для тестовой выборки. Оптимальная граница разделения показана на рис. 3 и соответствует вероятности ошибки классификации $P_{25} = 0,00071$. Это значение в 70 раз меньше, чем вероятность ошибки при использовании в качестве признака яркости исходного изображения в работе [10].

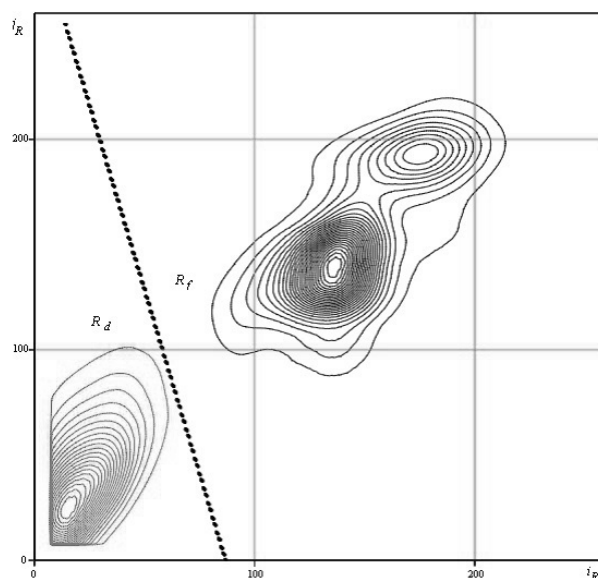


Рис. 3. Оптимальная граница разделения тестовых выборок (показана пунктиром)

Таким образом, использование для распознавания двух признаков: отклика на двумерный корреляционный фильтр и фильтр ядро-рамка позволяет значительно снизить вероятность ошибки

Как и следовало ожидать, использование двух признаков позволяет уменьшить вероятность ошибки при распознавании, но значительно увеличивает время машинной обработки. Ослабить это противоречие позволяет использование разделения пикселей изображения с интервалом, задаваемым двумя значениями границ k_1 и k_2 . При этом классификация пикселей попавших внутрь интервала откладывается, и для их классификации используются два признака. Если разделяющий интервал больше области перекрытия распределений признаков, то вероятность ошибки классификации на этом этапе была бы равна нулю. На практике достаточно интервал выбрать таким, чтобы вероятность ошибки не превосходила значения для классификации с двумя признаками.

Литература

1. Логунов А. Н. Исследование эффективности цифровых фильтров в системе автоматизированного считывания маркировки изделий / А. Н. Логунов //

- Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту імені Володимира Даля. – 2003. – №4(62). – С. 138-143.
2. Кампанелла Дж. Экономика качества. Основные принципы и их применение / Дж. Кампанелла; пер. с англ. А. Раскина; [под науч. ред. Ю.П. Адлера и С.Е. Щепетовой]. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2005. – 232с., ил. – (Практический менеджмент).
 3. Логунов. А.Н. Маркировка изделий, подвергающихся жестким технологическим воздействиям / А.Н. Логунов // Тезисы науч.-практ. конф. «Информационно-вычислительные системы в химической промышленности», Северодонецк, 25 – 27 июня 2007г. – 1 электрон. оптич. диск (CD-ROM). – Систем. требов.: Pentium; 32 Mb RAM; Windows 98/2000/NT/XP. – Название с титул. листа.
 4. Stosic P. What cost quality? The role of rawstock improvement / P. Stosic // World Leather. – 1999. – №5. – P 29-32.
 5. Hide and skin quality systems / FAIR Project Improving Hide and Skin Quality // Newsletter. – 2001. – № 6 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.leathercouncil.org/fair/news6.htm>.
 6. Фукунага К. Ведение в статистическую теорию распознавания образов: [перевод с англ.] / К. Фукунага. – М.: Наука: Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 368 с.
 7. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов: [пер. с англ.] / Р. Блейхут. – М.: Мир, 1989. – 448 с.
 8. Грузман И. С. Цифровая обработка изображений в информационных системах: [учеб. пособие] / И. С. Грузман, В. С. Киричук, В.П. Косых и др. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 168 с.
 9. Воробьев С.П. Параметрическое обучение в теории распознавания образов: [учеб. пособие] / С.П. Воробьев, С.С. Осипов. – СПб: ГУАП, 2005. – 46 с.
 10. Дубровкина М.В. Повышение достоверности распознавания кода при идентификации кожи в процессе её обработки: дис. ... кандидата техн. наук: 05.13.06 / Дубровкина Маргарита Васильевна. – Луганск, 2009. – 229 с.
 4. Stosic P. What cost quality? The role of rawstock improvement / P. Stosic // World Leather. – 1999. – №5. – P 29-32.
 5. Hide and skin quality systems / FAIR Project Improving Hide and Skin Quality // Newsletter. – 2001. – № 6: <http://www.leathercouncil.org/fair/news6.htm>.
 6. Fukunaga K. Keeping in the statistical theory of pattern recognition: [translation from English] / K. Fukunaga. – Moscow: Nauka: The main edition of physics and mathematics, 1979. – 368 p.
 7. Bleyhut R. Rapid algorithms of digital signal processing: [trans. from the English] / R. Bleikhut. – Moscow: Mir, 1989. – 448 p.
 8. Gruzman IS Digital processing of images in information systems: [textbook. manual] / I. S. Gruzman, V. S. Kirichuk, V.P. Kosykh and others - Novosibirsk: Izd-vo NSTU, 2000. - 168 p.
 9. Vorobyev S.P. Parametric learning in the theory of pattern recognition: [Textbook. allowance] / S.P. Vorobiev, S.S. Osipov. - SPb: GUAP, 2005. - 46 p..
 10. Dubrovkina M.V. Increase the reliability of code recognition in the identification of the skin in the process of its processing: dis. ... candidate of technical. sciences: 05.13.06 / Dubrovkina Margarita Vasil'evna. - Lugansk, 2009. - 229 p.

Логунов О. М. Розпізнавання зображення перфораційного маркера за двома ознаками.

У статті розглянуто зниження ймовірності помилки класифікації при розпізнаванні зображення перфораційного маркера за рахунок використання в якості ознак класифікації пікселів відгуків двох різних кореляційних фільтрів. На підставі обробки партії реальних зображень отримані об'ємні графіки залежності ймовірності помилки від коефіцієнтів функції, що розділяє.

Ключові слова: перфораційний маркер, кореляція, розпізнавання, ідентифікація, ознака.

Logunov O.M. Two-significant recognition of perforative marker image.

The article considers the reduction of the probability of classification error when recognizing the image of a perforation marker due to the use of two different correlation filters as signs of the classification of the pixels of the responses. Based on the processing of a batch of real images, volumetric graphs of the dependence of the error probability on the coefficients of the separating function were obtained.

Key words: perforation marker; correlation, recognition, identification, attribute.

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

Рецензент: д.т.н., проф. Харламов Ю.О.

References

1. Logunov O. M. efficiency of digital filters in the system of automated reading of product markings / O. M. Logunov // Visnik Of The Volodymyr Dahl East Ukrainian National University. – 2003. – №4(62). – p. 138-143.
2. Campanella J. The economy of quality. Basic principles and their application / J. Campanella; trans. with English. A. Raskin; [under the science. Ed. Yu.P. Adler and S.E. Shchepetovoy]. - Moscow: RIA "Standards and Quality", 2005. - 232s., Ill. - (Practical management).
3. Logunov O. M. Marking of products subjected to severe technological influences / O. M. Logunov // Theses of scientific-practical. Conf. "Information and Computing Systems in the Chemical Industry", Severodonetsk, June 25 - 27, 2007. - 1 electron. optical. disk (CD-ROM). - Systems. Requires: Pentium; 32 Mb RAM; Windows 98/2000 / NT / XP. - Title with title. sheet.

УДК 624.9.048

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ И КОНСТРУКТОРСКИЙ МОНИТОРИНГ,
КОМПОНЕТИКА И 3D ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГИБРИДНЫХ ВИБРОСТАНКОВ,
РЕГЛАМЕНТ И ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ МУЛЬТИЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ
ОТДЕЛОЧНО-ЗАЧИСТНОЙ ВИБРООБРАБОТКИ**

Мицык А.В.

**TECHNOLOGICAL AND DESIGN MONITORING, COMPOSITION
AND 3D VISUALIZATION OF HYBRID VIBRATION MACHINES, REGULATION
AND IMPLEMENTATION EXPERIENCE OF MULTIENERGY TECHNOLOGIES
OF FINISHING-GRINDING VIBRATION PTREATMENT**

Mitsyk A.V.

Изложены общие сведения и актуальность вопроса технологического и конструкторского мониторинга процесса виброобработки. Приведены принципы конструирования и эксплуатации узлов гибридных вибростанков, а также управление процессом виброобработки. Определены модульные особенности мультиэнергетической технологии и компонетики гибридных вибростанков отделочно-зачистной обработки с использованием принципиальных схем и 3D визуализации. Представлен опыт внедрения мультиэнергетических технологий с регламентом проведения операций отделочно-зачистной обработки деталей промышленных производств.

Ключевые слова: виброобработка, мультиэнергетические технологии, гибридные вибростанки, компонетика, 3D визуализация, конструирование и эксплуатация узлов, управление процессами, опыт внедрения.

Общие сведения и актуальность вопроса.

Постоянное промышленное внедрение и совершенствование процесса вибрационной отделочно-зачистной обработки, поиск путей его интенсификации и расширение технологических возможностей требует создания новых разновидностей метода и соответствующего оборудования для их реализации. Основной предпосылкой к конструкторским и технологическим разработкам является принцип комбинирования различных схем обработки и синтезирование двух и более видов энергетического воздействия на свободную абразивную среду и обрабатываемые детали [1, 2].

Из практики станкостроения известно, что перспективным видом технологического обеспечения являются модульные агрегатированные системы и гибридные станки. Однако, их потенциал в отделочно-зачистной обработке свободной

абразивной средой, подверженной динамическому воздействию вибрационных, центробежных и струйных гидравлических эффектов раскрыт недостаточно. Проблема разработки компоновок технологических систем исследована минимально, что связано с одной стороны с задачей синтеза маршрута обработки детали, сложности ее геометрической формы, габаритными размерами, точностью и шероховатостью формообразующих поверхностей, а с другой стороны с отсутствием общей теории компонетики технологических систем и гибридных вибростанков [3].

Оценивая перспективы вибрационных технологий и оборудования для обработки номенклатуры средне- и крупногабаритных корпусных и тел вращения деталей с малодоступными местами поверхности для традиционных рабочих сред, имеет смысл создание систем и гибридных вибростанков, одновременно использующих как низкочастотные колебания, так и другие схемы энергетического воздействия на рабочую среду и обрабатываемые детали [4].

Анализируя технологию изготовления упомянутых деталей, очевидно, что в условиях массового типа производства их совместная обработка по принципу «внавал» технологически и экономически нецелесообразна, так как при циркуляции содержимого резервуара происходит столкновение деталей, что приводит к дефектам и неисправимому браку. Такая ситуация исключает обработку «внавал» и диктует переход к закреплению деталей при их размещении в резервуаре. Позитивные результаты также достигаются, когда детали, установленные в приспособлении внутри резервуара подвергаются дополнительному виду энергетического воздействия.

Предлагаемые авторами настоящей статьи разновидности способов виброобработки позволили расширить его технологические возможности, применяя мелкодисперсную рабочую среду в виде шлифзерна и различных шлифпорошков, что положительно отразилось на обработке выделенных деталей.

Таким образом, представляет научный и производственный интерес концептуальный подход к созданию новой физики обработки модельного ряда гибридных вибростанков в виде агрегатированных технологических систем отделочно-зачистной виброобработки при компонентности которых используется: синтез воздействий вибрационных сил в вертикальной и горизонтальных плоскостях колебательного движения, реализуемых горизонтальными и вертикальными вибровозбудителями; воздействие центробежных сил, реализуемых импеллерами и шпинделем; воздействий вибрационных сил в горизонтальной плоскости колебательного движения и центробежных сил, реализуемых вибровозбудителями импеллерами и шпинделями; воздействий струйного движения потоков жидкости, реализуемых гидродинамическими устройствами.

Принципы конструирования и эксплуатации узлов гибридных вибростанков, а также управление процессом отделочно-зачистной виброобработки. Микрорезание и упругопластическое деформирование процесса отделочно-зачистной виброобработки, управление которым, а также расширение его технологических возможностей, то есть создание предпочтительных условий для увеличения или уменьшения съема металла и шероховатости поверхности при достижении определенного технологического результата, совершается за счет использования рациональных сочетаний значений амплитудно-частотных и скоростных параметров движения, получаемых при регулировке энергетических источников колебательных и вращательных систем вибростанков.

Исследования показывают, что наилучшие результаты обработки с применением мультиэнергетических технологий достигаются при следующих конструктивных особенностях и условиях аппаратного оформления гибридных вибростанков отделочно-зачистной обработки:

– наименьшее расстояние L между рабочими поверхностями «U» – образного резервуара, то есть его стенками и днищем, и поверхностями обрабатываемых деталей для обеспечения нормальной циркуляции рабочей среды выбирается из условия $L \geq 5d$, где d – размер гранул применяемой абразивной среды;

– высота H «U» – образного резервуара приблизительно равна $3R$ ($H \approx 3R$), где R – радиус днища резервуара;

– наименьшее расстояние L между цилиндрической рабочей поверхностью резервуара и поверхностями обрабатываемых деталей для

обеспечения неразрывного кругового колебательного движения рабочей среды выбирается из условия $L \geq b$, где b – наибольший размер обрабатываемой детали;

– высота H цилиндрического резервуара приблизительно равна $3R$, то есть ($H \approx 3R$), где R – радиус основания резервуара;

– наименьшее расстояние L между рабочей поверхностью цилиндрического резервуара и импеллера, а также поверхностями обрабатываемых деталей для обеспечения неразрывного вращательного и колебательного движения среды выбирается из условия $L \geq b$, где b – наибольший размер обрабатываемой детали;

– высота цилиндрического резервуара из условия обеспечения равномерности давления среды во всех его зонах примерно равна $3R+h$, то есть $H \approx 3R+h$, радиус R цилиндрической части резервуара, принимается равной $R \approx (1,5 \dots 1,6)r$, где r – радиус основания резервуара;

– высота h импеллера с целью регулирования силы взаимодействия рабочей среды и обрабатываемых деталей принимается равной $(0,1 \dots 0,2)H$, то есть $h \approx (0,1 \dots 0,2)H$;

– наименьшее расстояние L в рабочей зоне «U» – образного резервуара, свободное от обрабатываемых деталей, с целью обеспечения равномерности перехода рабочей среды из равновесного состояния в псевдосжиженное выбирается из условия $L \geq b$, где b – наибольший размер обрабатываемой детали;

– высота H «U» – образного резервуара из условия обеспечения равномерности давления псевдосжиженной среды на всех уровнях распространения струйного движения жидкости выбирается не более $(2,0 \dots 2,5)R$, то есть $H \leq (2,0 \dots 2,5)R$, где R – радиус днища резервуара.

Обрабатываемые детали по отдельности или пакетами базируют и закрепляют на установочных пальцах специальных многоместных, расположенных рядами или по концентрическим окружностям, приспособлений, которые погружают в движущийся с рабочей средой резервуар вибростанка.

Режимы колебательного движения инерционных вибровозбудителей: амплитуда – $0,2 \dots 3,0$ мм; частота – $30 \dots 70$ Гц.

Скорость вращательного движения шпинделя: $31,5 \dots 1440$ об/мин.

Скорость вращения импеллера – $50 \dots 1440$ об/мин.

В качестве абразивного наполнителя использовались рабочие среды:

– бой отходов шарошлифовальных кругов АН-2 ТУ2-0306221899-007-97 грануляцией $10 \dots 15$ мм;

- минералокерамические гранулы произвольной формы грануляцией 4...6 мм;
- стеклянные шарики типа «бисер» грануляцией 1,5...1,8 мм;
- шлифзерно зернистостью 200...40;
- шлифпорошки зернистостью 32...16.

В качестве жидкого компонента применялся химически-активный раствор на кислотной и щелочной основе.

Модульные особенности мультиэнергетической технологии и компонентики гибридных вибростанков отделочно-зачистной обработки. Опыт внедрения.

Технология и оборудование на основе вертикального вибрационного энергетического воздействия со стороны резервуара и приспособления с обрабатываемыми деталями.

Технология и оборудование (рис. 1) предпочтительны для отделочно-зачистных операции черного шлифования до $R_z = 10...5$ мкм с одновременным скруглением острых кромок до $r = 2$ мм и удалением заусенцев толщиной у основания около 0,2 мм [5].

Энергетические источники вибрационного воздействия на абразивную среду и обрабатываемые детали – горизонтальные вибровозбудители, жестко связанные в колебательные системы, соответственно, с резервуаром гибридного вибростанка и с приспособлением для базирования и закрепления обрабатываемых деталей.

Рабочую среду помещают в упруго смонтированный на жесткой опоре «U» – образный резервуар, обрабатываемые детали монтируют на расположенных в продольном и поперечном направлении рядах установочных пальцев многоместной, жестко связанной с инерционным вибровозбудителем колебательной системы, упруго установленной на жесткой опоре с возможностью погружения в рабочую зону резервуара и выхода из нее до и после обработки. Вал колебательной системы приспособления с деталями располагают в непосредственной близости к верхней части резервуара в продольной плоскости, которая совпадает с его вертикальной осью и перпендикулярна его поперечному сечению. Колебательную систему приспособления с закрепленными на нем деталями с помощью инерционного вибровозбудителя приводят в колебательное движение и погружают в колеблющуюся рабочую среду, обеспечивая микрорезание и упругопластическое деформирование процесса виброобработки.

Опыт внедрения. Выполнялась операция удаления облоя с заготовок корпусных деталей малогабаритных электродвигателей. Материал заготовок – алюминиевый сплав АЛ-9 ГОСТ 1583-93. Метод получения заготовок – отливка в кокиль. Форма заготовок сложная, разнопрофильная, образованная сопряжениями цилиндрических и

криволинейных поверхностей. Имеются ниши, карманы, размеры заготовок 110×80 мм. Исходная шероховатость поверхности $R_a = 5,0...2,5$ мкм. Отделочно-зачистная обработка производилась на вибростанке, объем резервуара, которого позволял одновременно разместить 16 деталей. В качестве рабочей среды использовался бой отходов шарошлифовальных кругов АН-2 ТУ 2-0360221899-007-97 с размером гранул 15...20 мм. Режимы движения вибровозбудителя колебательной системы резервуара: амплитуда 1,6...1,8 мм; частота 50 Гц. Режимы движения вибровозбудителя колебательной системы приспособления с деталями: амплитуда 1,0...1,2 мм; частота 50 Гц. Машинное время обработки 30 минут. Дефекты поверхности удалены полностью, острые кромки скруглены до $R = 1,5...1,8$ мм, достигнута требуемая шероховатость поверхности при естественном оттенке металла. Сортировочный контроль качества появление брака не установил.

Технология и оборудование на основе горизонтального со стороны резервуара и вертикального вибрационного энергетического воздействия со стороны приспособления с обрабатываемыми деталями.

Технология и оборудование (рис. 2) предпочтительны для отделочно-зачистных операции черного шлифования до $R_z = 10...5$ мкм с одновременным скруглением острых кромок до $r = 2$ мм и удалением заусенцев толщиной у основания около 0,2 мм [6].

Энергетические источники вибрационного воздействия на абразивную среду и обрабатываемые детали, соответственно, вертикальный и горизонтальный вибровозбудители, жестко связанные в колебательные системы, с резервуаром гибридного вибростанка и с приспособлением для базирования и закрепления обрабатываемых деталей.

В результате комплексного использования повышенной энергии вибрационного воздействия колебательных систем резервуара и приспособления с деталями, осуществляемого в горизонтальной и вертикальной плоскостях, проводят обработку, удаляют дефектный слой металла и его окислов, достигают требуемую шероховатость поверхности.

Опыт внедрения. Выполняли операцию удаления заусенцев и скругление острых кромок полученных на заготовках деталей крышек малогабаритных электродвигателей после предшествующей обработки на металлорежущих станках. Материал заготовок – алюминиевый сплав АЛ-7 ГОСТ 1583-93. Метод получения заготовок – отливка в кокиль. Толщина заусенцев у основания 0,15...0,18 мм. Форма заготовок сложная, образованная сопряжениями цилиндрических и криволинейных поверхностей. Имеют место глухие

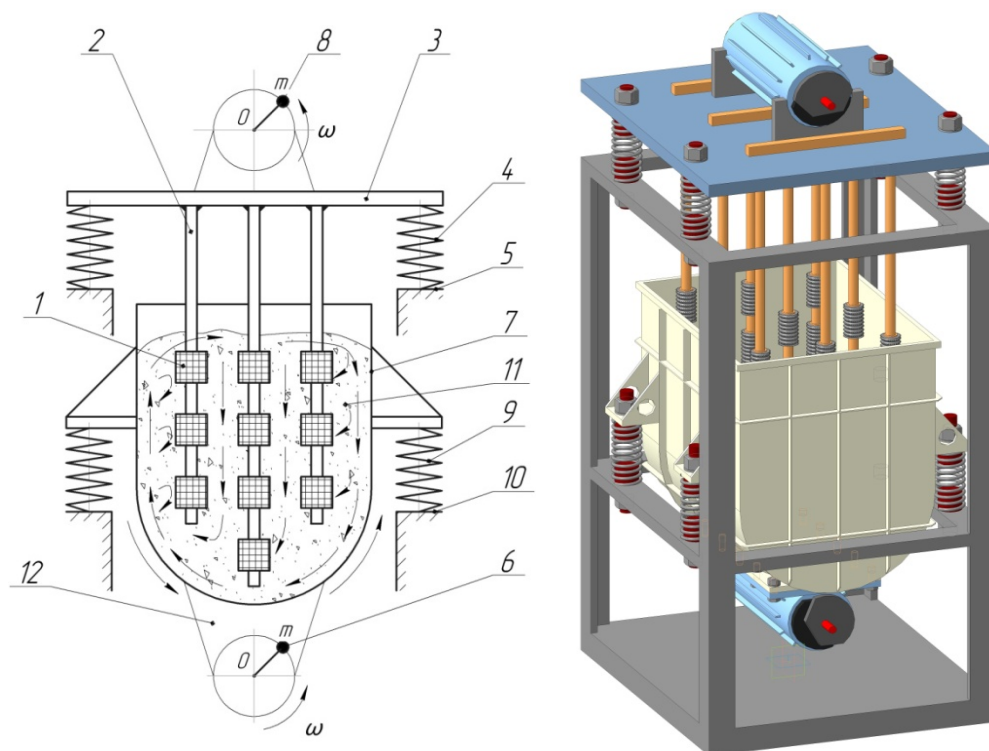


Рис. 1. Принципиальная схема и общий вид компонентки гибридного вибростанка для реализации мультиэнергетических технологий: 1 – детали; 2 – установочные пальцы; 3, 12 – колебательная система; 4, 9 – упругая подвеска; 5 – жесткая опора; 6, 8 – вибровозбудитель; 7 – резервуар; 10 – основание; 11 – рабочая среда

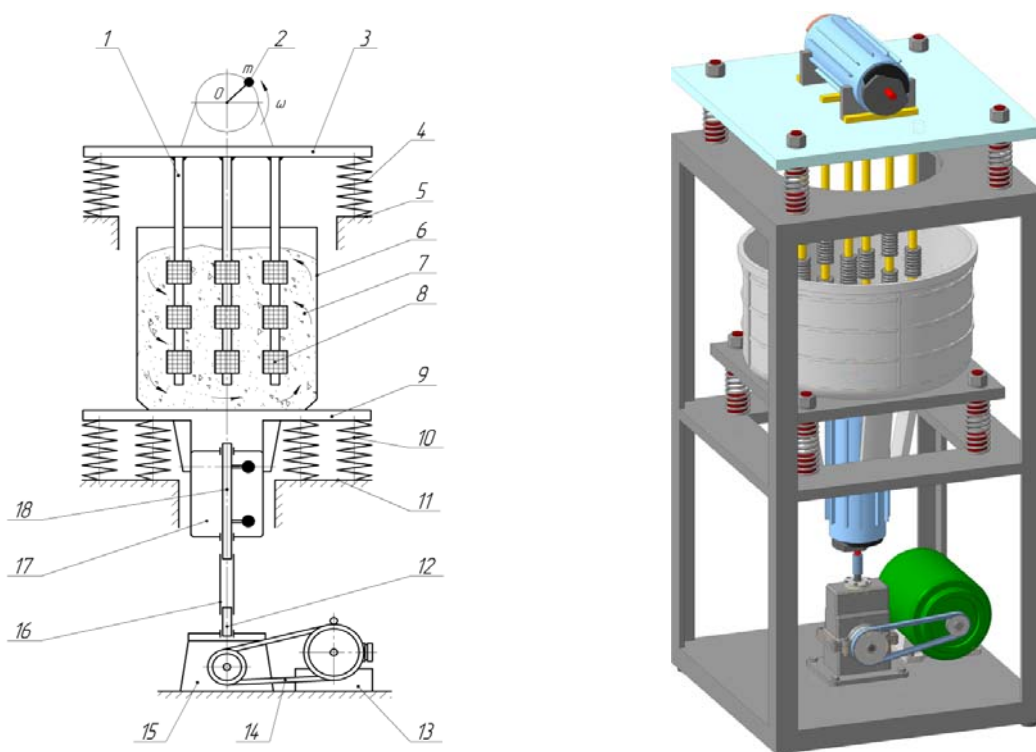


Рис. 2. Принципиальная схема и общий вид компонентки гибридного вибростанка для реализации мультиэнергетических технологий: 1 – установочные пальцы; 2, 17 – вибровозбудитель; 3, 9 – колебательные системы; 4, 10 – пружинная подвеска; 5, 11 – жесткая опора; 6 – резервуар; 7 – рабочая среда; 8 – обрабатываемые детали; 12, 18 – валы; 13 – электродвигатель; 14 – клиноременная передача; 15 – конический редуктор

и сквозные отверстия различного диаметра, в том числе сквозное центральное, а также ниши и ступенчатые переходы элементов поверхности. Размеры заготовок 100×40 мм. Исходная шероховатость поверхности $R_a = 2,5$ мкм. Отделочно-зачистная обработка проводилась на вибростанке с цилиндрическим резервуаром, объем которого позволял разместить на приспособлении с автономным колебательным движением 60 деталей. В качестве рабочей среды использовались стеклянные шары типа «бисер» диаметром $1,8 \dots 2,0$ мм. В качестве жидкого компонента в резервуар добавлялся химически-активный раствор на щелочной основе. Режимы движения колебательной системы резервуара: амплитуда $1,5 \dots 1,7$ мм; частота 50 Гц. Режимы движения колебательной системы приспособления с деталями: амплитуда $1,0 \dots 1,2$ мм; частота 50 Гц. Машинное время обработки 35 минут. Дефекты поверхности удалены полностью, достигнута требуемая шероховатость поверхности при естественном оттенке металла. Сортировочный контроль качества обработки появления брака не установил.

Технологии и оборудование на основе центробежного со стороны резервуара и вертикального вибрационного энергетического воздействия со стороны приспособления с обрабатываемыми деталями.

Технология и оборудование (рис. 3) предпочтительны для отделочно-зачистных операций шлифования до $R_a = 5,0 \dots 2,5$ мкм, одновременно направленных для удаления заусенцев, скругления острых кромок и уменьшения шероховатости поверхности [7].

Источник центробежного энергетического воздействия со стороны резервуара представлен кинематически связанным с ним вращающимся импеллером, источник вибрационного энергетического воздействия со стороны обрабатываемых деталей представлен инерционным вибровозбудителем, жестко связанным с механизмом упруго установленного приспособления для базирования и закрепления обрабатываемых деталей.

При таком техническом решении способа отделочно-зачистной обработки свободной абразивной средой в резервуаре формируют комбинированную схему энергетических воздействий, создающих общий циркуляционный и осциллирующий циклонический характер движения абразивной среды, свободно проникающий ко всем труднодоступным поверхностям обрабатываемых деталей, что приводит к высокой интенсивности обработки.

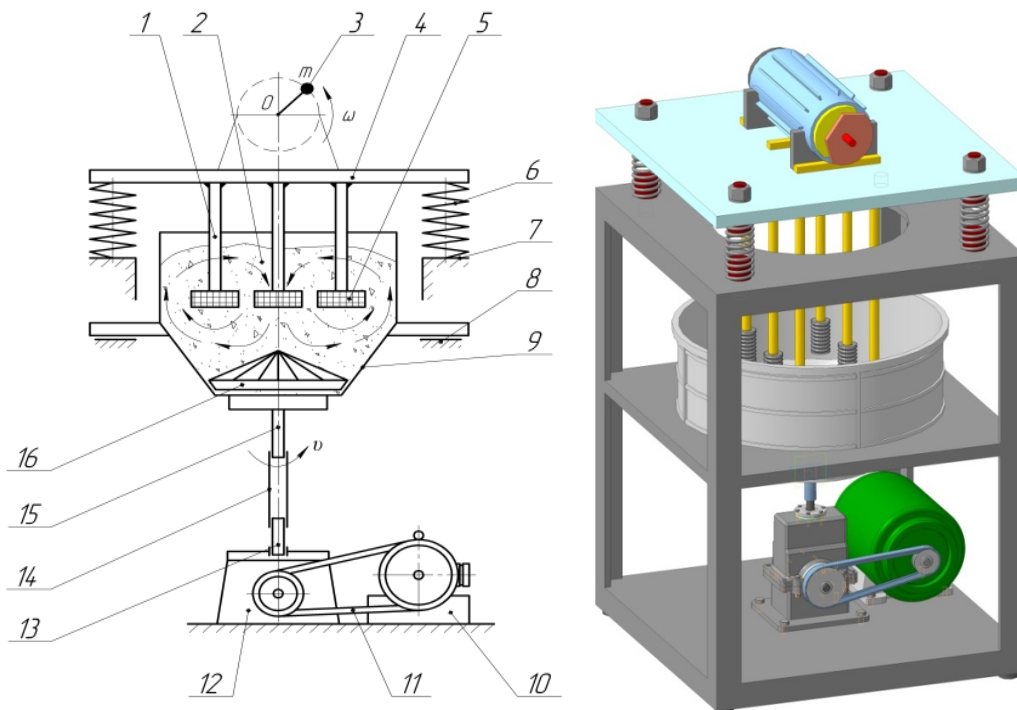


Рис. 3. Принципиальная схема и общий вид компонетики гибридного вибростанка для реализации мультэнергетических технологий: 1 – установочные пальцы; 2, 17 – вибровозбудитель; 3, 9 – колебательные системы; 4, 10 – пружинная подвеска; 5, 11 – жесткая опора; 6 – резервуар; 7 – рабочая среда; 8 – обрабатываемые детали; 12, 18 – валы; 13 – электродвигатель; 14 – клиноременная передача; 15 – конический редуктор

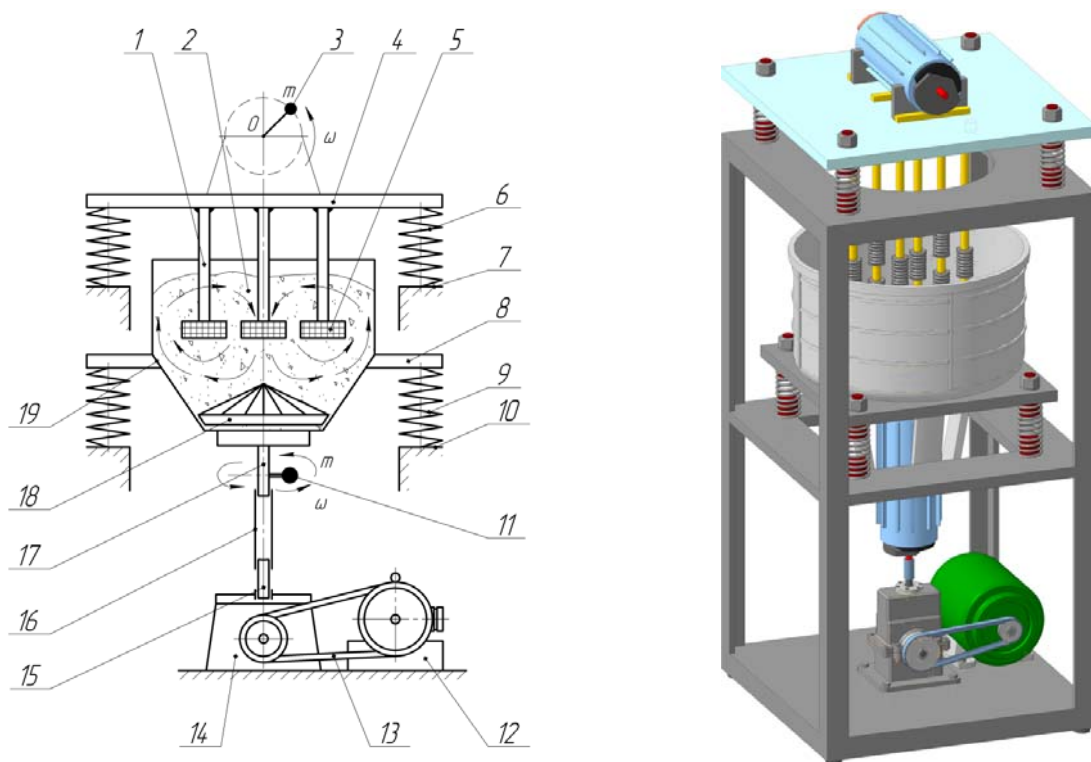


Рис. 4. Принципиальная схема и общий вид компонетки гибридного вибростанка для реализации мультиэнергетических технологий: 1 – установочные пальцы; 2, 17 – вибровозбудитель; 3, 9 – колебательные системы; 4, 10 – пружинная подвеска; 5, 11 – жесткая опора; 6 – резервуар; 7 – рабочая среда; 8 – обрабатываемые детали; 12, 18 – валы; 13 – электродвигатель; 14 – клиноременная передача; 15 – конический редуктор

Опыт внедрения. Выполняли операцию виброшлифования отделочно-зачистной обработки, одновременно направленную на удаление заусенцев, скругление острых кромок, а также уменьшение шероховатости поверхности до $R_a = 0,63$ мкм на заготовках детали «Шкив» электромеханического привода. Материал заготовок – алюминиевый сплав АЛ-9 ГОСТ 1583-93. Заготовки получены методом литья в кокиль. Форма заготовок сложная, образованная сопряжениями криволинейных поверхностей. Партия совместной обработки составляла 16 заготовок. В качестве рабочей среды использовался бой шарошлифовальных кругов АН-2 ТУ 2-036-0221899-007-97 с размером гранул 10...15 мм. Режимы обработки: скорость вращательного движения импеллера 800 об/мин; амплитуда колебаний вибровозбудителя 1,6...1,8 мм, частота 50 Гц. Машинное время операции виброшлифования не превышает 40 минут. Дефекты поверхности удалены полностью, острые кромки скруглены, достигнута требуемая шероховатость поверхности при естественном оттенке металла.

Технологии и оборудование на основе комбинированного горизонтального вибрационного и центробежного со стороны резервуара и вертикального вибрационного энергетического воздействия со стороны приспособления с обрабатываемыми деталями.

Технологии и оборудование (рис. 4) предпочтительны для отделочно-зачистных операций шлифования до $R_a = 5,0...2,5$ мкм, одновременно направленных для удаления заусенцев, скругления острых кромок и уменьшения шероховатости поверхности [8].

Согласно такой технологии обработку проводят при одновременном использовании энергии центробежных и вибрационных сил, воздействующих на рабочую среду, формообразующие свойства которой, обеспечивающие микрорезание и упругопластическое деформирование, проявляются при равномерном и стабильном контакте с обрабатываемой поверхностью любой сложности.

Такой характер комбинированного энергетического воздействия формируется в резервуаре, имеющем форму, совмещенных по условной плоскости оснований, полых фигур цилиндра и усеченного конуса с большей вертикальной осью, при создании в конструкции вибростанка двух, комплексно функционирующих колебательных систем резервуара с импеллером и свободно помещенного в резервуар приспособления для установки обрабатываемых деталей.

Вращающийся импеллер в виде усеченного конуса с гофрированной поверхностью, установленный большим основанием к днищу

резервуара, через вал импеллера, находящегося вне резервуара, жестко связан с инерционным вибровозбудителем, а затем последовательно через гибкую муфту с валом конического редуктора и с помощью клиноременной передачи с электродвигателем. При этом валы инерционных вибровозбудителей колебательных систем конструктивно расположены вблизи к верхней и нижней частям резервуара, а их оси, как и плоскости колебаний перпендикулярны друг другу, причем ось вибровозбудителя колебательной системы резервуара совпадает с вертикальной осью резервуара и перпендикулярна его сечению в плоскости колебаний.

При таком аппаратном оформлении способа виброобработки, который сопровождается одновременным воздействием на рабочую среду и обрабатываемые детали центробежных и вибрационных сил, в резервуаре вибростанка создается комбинированный характер кругового и волнового движения гранул рабочей среды, свободно проникающих ко всем труднодоступным поверхностям обрабатываемых деталей, что приводит к высокой интенсивности обработки.

Колебательной системе приспособления с деталями сообщают движения в вертикальной плоскости. Далее колебательную систему

приспособления с деталями погружают в движущийся с рабочей средой резервуар, где обеспечивают микрорезание и упругопластическое деформирование процесса виброобработки.

Технологии и оборудование на основе гидродинамического со стороны резервуара и вертикального вибрационного энергетического воздействия со стороны приспособления с обрабатываемыми деталями.

Технология и оборудование (рис. 5) предпочтительны для отделочно-зачистных операции чернового шлифования до $R_z = 10...5$ мкм с одновременным скруглением острых кромок до $r = 2$ мм и удалением заусенцев толщиной у основания около 0,2 мм [9].

Энергетические источники гидродинамического воздействия на абразивную среду и вибрационного воздействия на обрабатываемые детали, соответственно, гидродинамические устройства, размещенные в нижней части резервуара и формирующие струйное движение подаваемых потоков жидкости и вибровозбудитель, жестко связанный с колебательной системой приспособления с обрабатываемыми деталями.

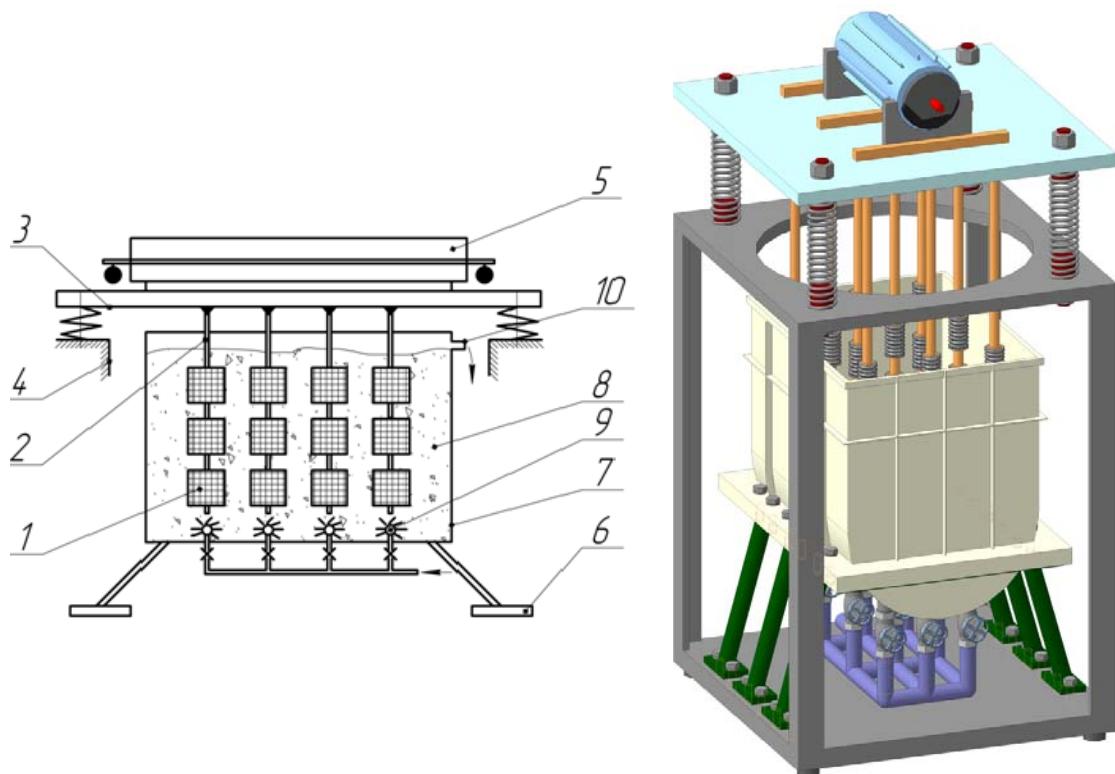


Рис. 5. Принципиальная схема и общий вид компонентки гибридного вибростанка для реализации мультэнергетических технологий: 1 – обрабатываемые детали; 2 – установочные пальцы; 3 – колебательная система; 4 – опора; 5 – вибровозбудитель; 6 – основа; 7 – резервуар; 8 – рабочая среда; 9 – гидродинамическое приспособление; 10 – отвод

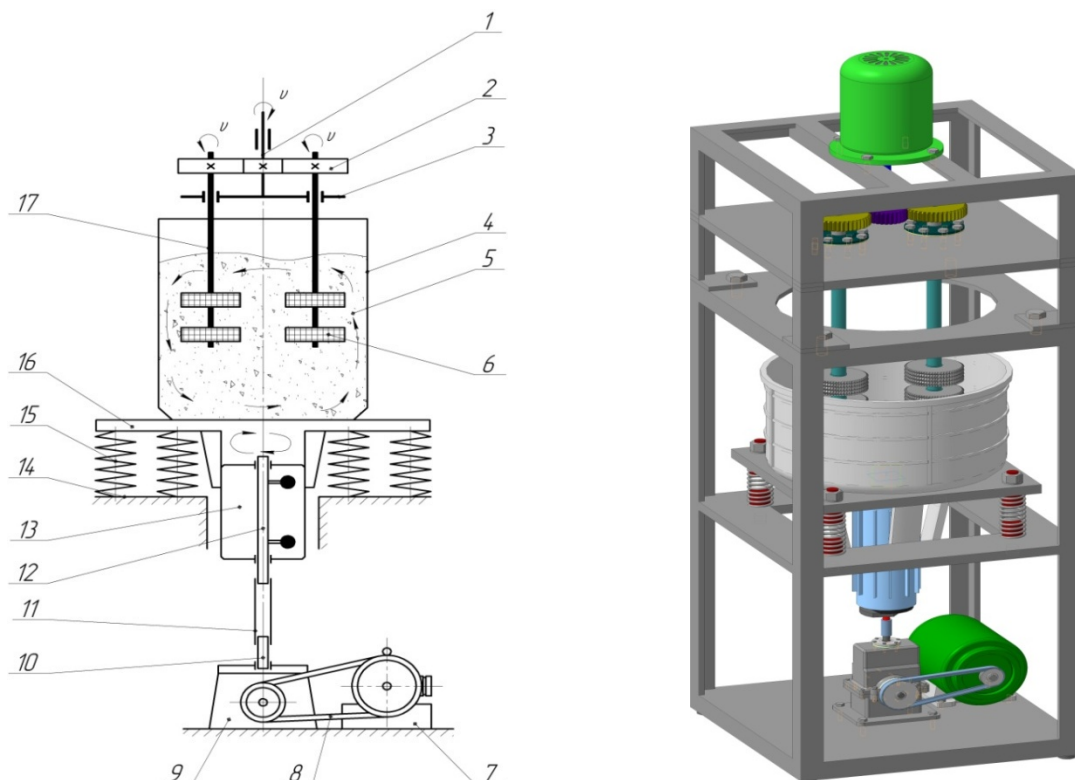


Рис. 6. Принципиальная схема и общий вид компоновки гибридного вибростанка для реализации мультиэнергетических технологий: 1 – установочные пальцы; 2, 17 – вибровозбудитель; 3, 9 – колебательные системы; 4, 10 – пружинная подвеска; 5, 11 – жесткая опора; 6 – резервуар; 7 – рабочая среда; 8 – обрабатываемые детали; 12, 18 – валы; 13 – электродвигатель; 14 – клиноременная передача; 15 – конический редуктор

Давление и расход жидкости выбирают из условий необходимости для придания рабочей среде свойств псевдоразрежения.

Управление процессом и расширение его технологических возможностей происходит за счет того, что обрабатываемые детали помещают в резервуар с мелкозернистой рабочей средой, размер гранул которой не более 2 мм. Далее среде сообщают плоское колебательное движение и одновременно уплотняют ее колебаниями деталей и разуплотняют струйным движением потоков жидкости, периодически подавая ее в резервуар и регулируя давление и расход из условий технологической необходимости изменения состояния среды от равновесного до псевдорасширенного. При этом микрорезанием и упругопластическим деформированием удаляют дефектный слой металла и уменьшают шероховатость поверхности детали.

Опыт внедрения. Выполняли операцию удаления заусенцев с высотой не более 0,15 мм, скругление острых кромок после предшествующей обработки на металлорежущих станках и дальнейшего шлифования поверхностей деталей «корпус механизма гидросистемы» до $R_a = 0,63$ мкм. Материал детали алюминиевый сплав АЛ-9 ГОСТ 1583-93. Форма заготовок сложная, имеют место ниши, карманы глухие и

сквозные отверстия, разнопрофильная поверхность которая образована сочетанием малых радиусов с труднодоступными для обработки участками. Размеры заготовки $90 \times 80 \times 70$ мм. Исходная шероховатость поверхности $R_a = 2,5$ мкм. Обработка проводилась на вибростанке, объем резервуара которого позволял одновременно разместить 12 деталей. В качестве рабочей среды использовался шлифпорошок – корунд кремния черный. Режимы движения вибровозбудителя: амплитуда 1,5...1,6 мм; частота 50 Гц. Время обработки 45 минут. Дефекты поверхности удалены полностью, достигнута требуемая шероховатость поверхности, которая сохранила естественный оттенок металла. Сортировочный контроль качества появления брака не установил

Технология и оборудование на основе горизонтального вибрационного со стороны резервуара и центробежного энергетического воздействия со стороны приспособления с обрабатываемыми деталями.

Технология и оборудование (рис. 6) предпочтительны для отделочно-зачистных операций шлифования до $R_a = 2,5...1,25$ мкм, $R_a = 1,25...0,63$ мкм с одновременным удалением

дефектов поверхности в виде облоя, заусенцев и скруглением острых кромок [10].

Источник горизонтального вибрационного энергетического воздействия со стороны резервуара представлен инерционным вибровозбудителем, источник центробежного воздействия выполнен в виде приспособления для обрабатываемых деталей, связанного со шпинделем вибростанка передачей двухпарного зацепления цилиндрических колес, и имеющего возможность погружения в рабочую зону резервуара и выхода из нее до и после обработки.

Режимы энергетического воздействия резервуара и обрабатываемых деталей обеспечиваются следующим образом: вал инерционного вибровозбудителя располагают вблизи к нижней части резервуара в вертикальной плоскости, перпендикулярной плоскости его колебаний, и через гибкую муфту соединяют с валом конического редуктора, кинематически связанного клиноременной передачей с электродвигателем, с помощью которого сообщают вращательное движение вибровозбудителю, а затем горизонтальное колебательное движение, шпинделю с обрабатываемыми деталями придают вращательное.

Далее шпиндель погружают в рабочую среду, совершающую в резервуаре круговые колебательные движения в горизонтальной плоскости. При этом совершается микрорезание и упругопластическое деформирование процесса виброобработки.

Опыт внедрения. Выполняли операцию виброшлифования отделочно-зачистной обработки, связанную с удалением заусенцев, скруглением острых кромок на заготовках деталей «Крышка» малогабаритного электродвигателя. Дефекты поверхности образованы предшествующей обработкой лезвийным инструментом. Толщина заусенцев у основания и их высота не превышает 0,2 мм. Материал заготовок АЛ-7 ГОСТ 1583-93, отливка в кокиль. Форма заготовок сложная, со ступенчатыми переходами элементов поверхности, полученных лекальными сопряжениями криволинейных поверхностей. Наибольший габаритный размер 100 мм. Исходная шероховатость $R_a = 2,5$ мкм. Обработывалась партия деталей в количестве 20 штук. В качестве рабочей среды использовался бой отходов шарошлифовальных кругов АН-2 ТУ 2-0360221899-007-97 с размером гранул 10...15 мм. Жидкий компонент процесса виброобработки химически-активный раствор на щелочной основе. Режимы обработки: скорость вращения шпинделя 1000 об/мин; амплитуда колебаний резервуара 1,8...2,0 мм, частота 50 Гц. Машинное время обработки 30...35 минут. Дефекты поверхности удалены полностью, достигнута требуемая шероховатость поверхности при естественном оттенке металла. Сортировочный контроль качества обработки появления брака не установил.

Технология и оборудование на основе комбинированного горизонтального вибрационного и центробежного со стороны резервуара и центробежного энергетического воздействия со стороны приспособления с обрабатываемыми деталями.

Технология и оборудование (рис. 7) предпочтительны для операций шлифования отделочно-зачистной обработки до $R_a = 2,5...1,25$ мкм, $R_a = 1,25...0,63$ мкм с одновременным удалением заусенцев, облоя, скруглением острых кромок и уменьшением высоты микронеровности поверхности [2].

Источник вибрационного энергетического воздействия со стороны резервуара представлен инерционным вибровозбудителем, источник центробежного энергетического воздействия со стороны резервуара представлен импеллером.

Источник центробежного энергетического воздействия со стороны приспособления с обрабатываемыми деталями имеет конструкцию шпиндельного устройства, которая приводит во вращательное движение и погружают в рабочую зону подпружиненного резервуара, заполненного рабочей средой, совершающей плоское колебательное движение. В циркуляционных потоках содержимого резервуара микрорезанием и упругопластическим деформированием проводят обработку, удаляют дефектный слой материала, уменьшают шероховатость поверхности.

Обработку проводят при одновременном использовании энергии вибрационных и центробежных сил, воздействующих на среду, формообразующие свойства которой обеспечивающие микрорезание и упругопластическое деформирование, проявляются при равномерном и стабильном контакте с обрабатываемой поверхностью в любой сложности.

Мелкодисперсную рабочую среду в виде шлифзерна и шлифпорошков, а также абразивные и металлические гранулы, увлажненную химически-активным раствором, помещают в упруго смонтированный на жесткой опоре резервуар, имеющий форму совмещенных по условной плоскости оснований полых фигур цилиндра и усеченного конуса с большей вертикальной осью.

Рабочей среде посредством импеллера в виде усеченного конуса с гофрированной поверхностью, установленного большим основанием к днищу резервуара, от электродвигателя через конический редуктор, клиноременную передачу и гибкую муфту сообщают вращательное движение и одновременно от вибровозбудителя, расположенного на валу импеллера, колебательные движения, шпинделю вибростанка, связанного передачей двухпарного зацепления цилиндрических зубчатых колес с многоместным приспособлением.

На установочных пальцах приспособления, расположенных на концентрических окружностях поотдельности или пакетами монтируют

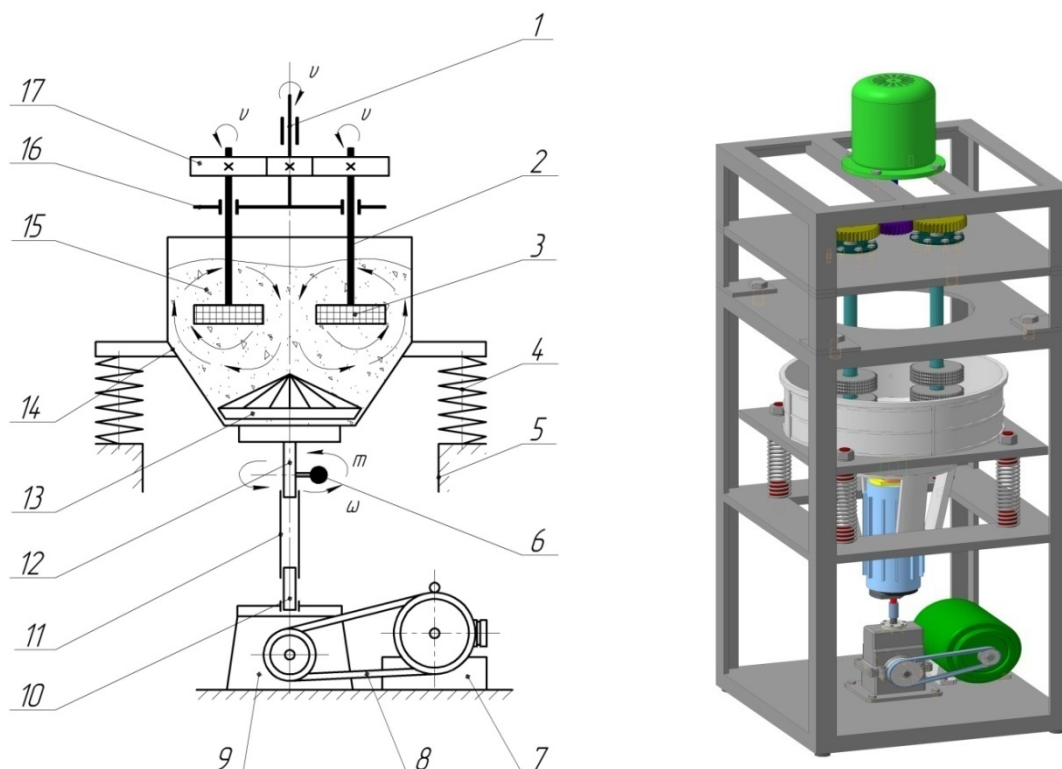


Рис. 7. Принципиальная схема и общий вид компонентики гибридного вибростанка для реализации мультиэнергетических технологий: 1 – установочные пальцы; 2, 17 – вибровозбудитель; 3, 9 – колебательные системы; 4, 10 – пружинная подвеска; 5, 11 – жесткая опора; 6 – резервуар; 7 – рабочая среда; 8 – обрабатываемые детали; 12, 18 – валы; 13 – электродвигатель; 14 – клиноременная передача; 15 – конический редуктор

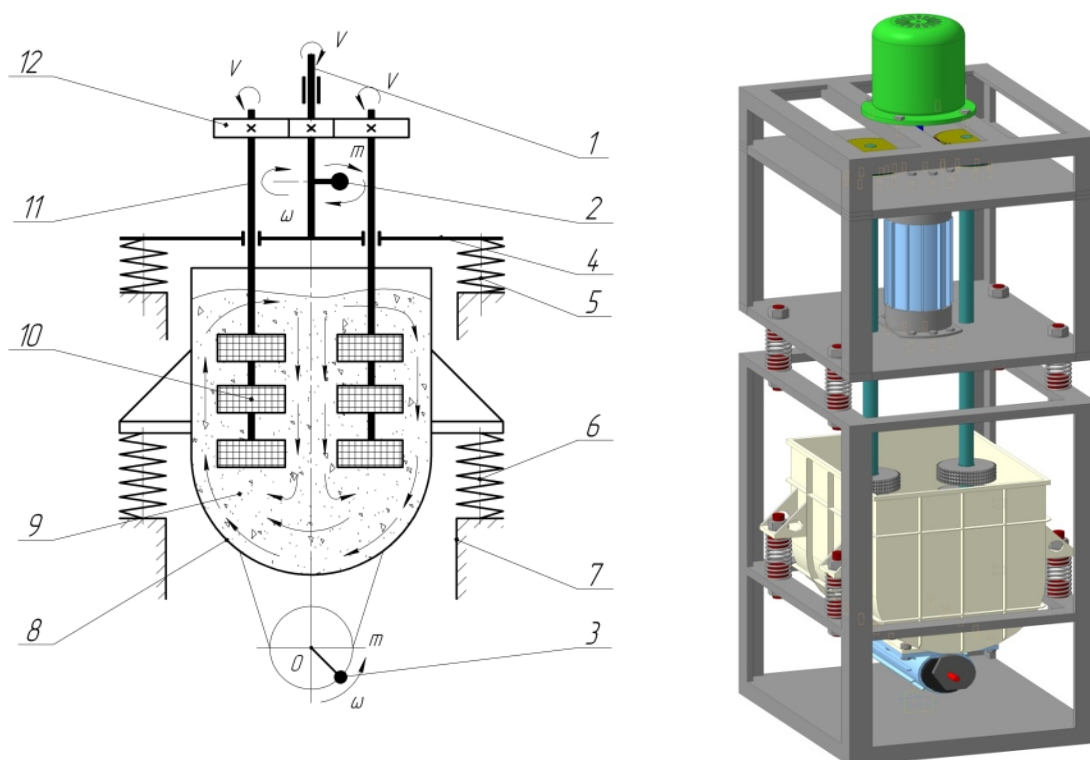


Рис. 8. Принципиальная схема и общий вид компонентики гибридного вибростанка для реализации мультиэнергетических технологий: 1 – установочные пальцы; 2, 17 – вибровозбудитель; 3, 9 – колебательные системы; 4, 10 – пружинная подвеска; 5, 11 – жесткая опора; 6 – резервуар; 7 – рабочая среда; 8 – обрабатываемые детали; 12, 18 – валы; 13 – электродвигатель; 14 – клиноременная передача; 15 – конический редуктор

обрабатываемые детали, сообщают вращательное движение и погружают его в движущийся с рабочей средой резервуар. При этом обеспечивается микрорезание и упругопластическое деформирование процесса виброобработки.

Опыт внедрения. Выполняли операцию отделочно-зачистной обработки по удалению заусенцев, скруглению острых кромок, а также виброшлифованию с целью уменьшения шероховатости поверхности до $R_a = 0,63 \dots 0,32$ мкм на заготовках деталей корпусов гидropневмосистем после предшествующей обработки на металлорежущих станках, связанной с операциями фрезерования сложных по форме поверхностей и сверления сквозных и глухих отверстий различного диаметра.

Материал заготовок алюминиевый сплав АЛ-7 ГОСТ 1583-93. Технологический метод получения заготовок – отливка в кокиль. Толщина заусенцев у основания 0,15...0,22 мм. Исходная шероховатость поверхности соответствует $R_a = 2,5 \dots 1,25$ мкм. Форма заготовок сложная, образованная различными сочетаниями цилиндрических и криволинейных поверхностей, имею место ниши, карманы, а также многоступенчатые переходы элементов поверхности. Наибольший габаритный размер заготовки не превышает 120 мм.

Отделочно-зачистная обработка проводилась на гибридном вибростанке, резервуар которого для интенсификации движения рабочей среды был снабжен импеллером в виде усеченного конуса высотой 100 мм. Объем резервуара позволял установить пакетами в приспособлении шпинделя 16 заготовок.

В качестве рабочей среды использовались минералокерамические гранулы произвольной формы с размером 4,0...6,0 мм. Как жидкий компонент при обработке применялся химически-активный раствор на щелочной основе.

Режимы обработки: скорость вращения шпинделя 1000 об/мин; скорость вращения импеллера 1440 об/мин; частота и амплитуда колебаний резервуара 50 Гц, 1,6...1,8 мм. Машинное время обработки составило 30...35 мин. Дефекты поверхности удалены полностью, достигнута требуемая шероховатость поверхности при естественном оттенке металла. Сортировочный контроль качества отделочно-зачистной обработки появления брака не установил.

Технология и оборудование на основе вертикального вибрационного со стороны резервуара и комбинированного горизонтального вибрационного и центробежного энергетического воздействия со стороны приспособления с обрабатываемыми деталями.

Технология и оборудование (рис. 8) предпочтительны для отделочно-зачистных операций чистового шлифования до $R_a = 0,63 \dots 0,32$ мкм [11].

Источник вертикального вибрационного со стороны резервуара энергетического воздействия представлен в виде горизонтального инерционного вибровозбудителя, источник комбинированного горизонтального вибрационного и центробежного энергетического воздействия со стороны приспособления с обрабатываемыми деталями выполнен в виде устройства, связанного со шпинделем вибростанка зубчатой передачей двухпарного зацепления цилиндрических колес, имеющего возможность погружения в рабочую зону резервуара и выхода из нее до и после обработки.

Такое техническое решение сопровождается одновременным действием на рабочую среду и обрабатываемые детали энергий вибрационных и центробежных сил, которые влияют на рабочую среду, формообразующие свойства которой, обеспечивающие микрорезание и упругопластическое деформирование, проявляются при равномерном и стабильном контакте с обрабатываемой поверхностью любой сложности.

В таких условиях процесса в резервуаре создается комбинированная схема энергетических воздействий, которые образуют общий циркуляционный и осциллирующий циклонический характер движения гранул рабочей среды, свободно проникающих ко всем труднодоступным поверхностям обрабатываемых деталей, что приводит к высокой интенсивности обработки.

Мелкодисперсную рабочую среду в виде шлифзерна и шлифпорошков, а также абразивных и металлических гранул, увлажненную химически-активным раствором, помещают в упруго смонтированный на жесткой опоре резервуар, имеющий «U» – образную форму поперечного сечения в плоскости колебаний.

Резервуару от жестко соединенного с ним инерционного вибровозбудителя сообщают колебательное движение.

Соединенное со шпинделем приспособление с помощью инерционного вибровозбудителя установленного на валу шпинделя, приводят в колебательное движение. Одновременно шпинделю придают вращательное движение и погружают его в рабочую зону резервуара с циркулирующей рабочей средой. При этом обеспечивается микрорезание и упругопластическое деформирование процесса виброобработки, осуществляется его управление и расширение технологических возможностей.

Опыт внедрения. Выполняли операцию виброобработки деталей, целью которой было удаление заусенцев, скругление острых кромок с одновременным шлифованием поверхности до $R_a = 0,63$ мкм на заготовках деталей общемашиностроительного производства «Шкив», «Катушка», «Втулка специальная». Наибольший ленточный размер заготовок – 100 мм, наибольший диаметральный размер 60 мм. Материал заготовок – сталь 20 ГОСТ 1050-84. Дефекты поверхностей образованы предшествующими операциями на

металлорежущих станках. Наружная поверхность заготовок деталей сложная, цилиндрической, конической, криволинейной и комбинированной формы с закрытыми уступами и сопряжениями радиусом до 5 мм. Партия совместной обработки – 16 единиц. В качестве рабочей среды использовались абразивные гранулы ПТ 10 ТУ 2-036-925-83 для смачивания которых применялся химически-активный раствор на кислотной основе. Режимы обработки: скорость вращения вертикального шпинделя 900 об/мин; амплитуда его колебаний 1,0...1,2 мм; частота 50 Гц. Амплитуда колебаний резервуара 1,8...2,0 мм, частота 50 Гц. Машинное время операции виброшлифования не превышает 40 минут. Дефекты поверхности удалены полностью, достигнута требуемая шероховатость поверхности при естественном оттенке металла.

Технология и оборудование на основе горизонтального вибрационного со стороны резервуара и комбинированного горизонтального вибрационного и центробежного энергетического воздействия со стороны приспособления с обрабатываемыми деталями.

Технология и оборудование (рис. 9) предпочтительны для отделочно-зачистных операций чистового шлифования до $R_a = 0,63...0,32$ мкм [12].

Источник горизонтального вибрационного со стороны резервуара энергетического воздействия

представлен в виде вертикального инерционного вибровозбудителя, источник комбинированного горизонтального вибрационного и центробежного энергетического воздействия со стороны приспособления с обрабатываемыми деталями выполнен в виде устройства, связанного со шпинделем вибростанка зубчатой передачей двухпарного зацепления цилиндрических колес, имеющего возможность погружения в рабочую зону резервуара и выхода из нее до и после обработки.

Как и в предыдущем варианте технологии, такое техническое решение сопровождается одновременным действием на рабочую среду и обрабатываемые детали энергий вибрационных и центробежных сил, что приводит к высокой интенсивности обработки поверхностей любой сложности процессами микрорезания и упругопластического деформирования.

Обрабатываемые детали по отдельности или пакетами устанавливают в приспособление на вертикальном шпинделе, который приводят во вращательное движение и помещают в рабочую зону колеблющегося резервуара, установленного с помощью упругой подвески на жесткой опоре и заполненного рабочей средой, в циркуляционных потоках которой удаляют дефектный слой металла и уменьшают шероховатость поверхности.

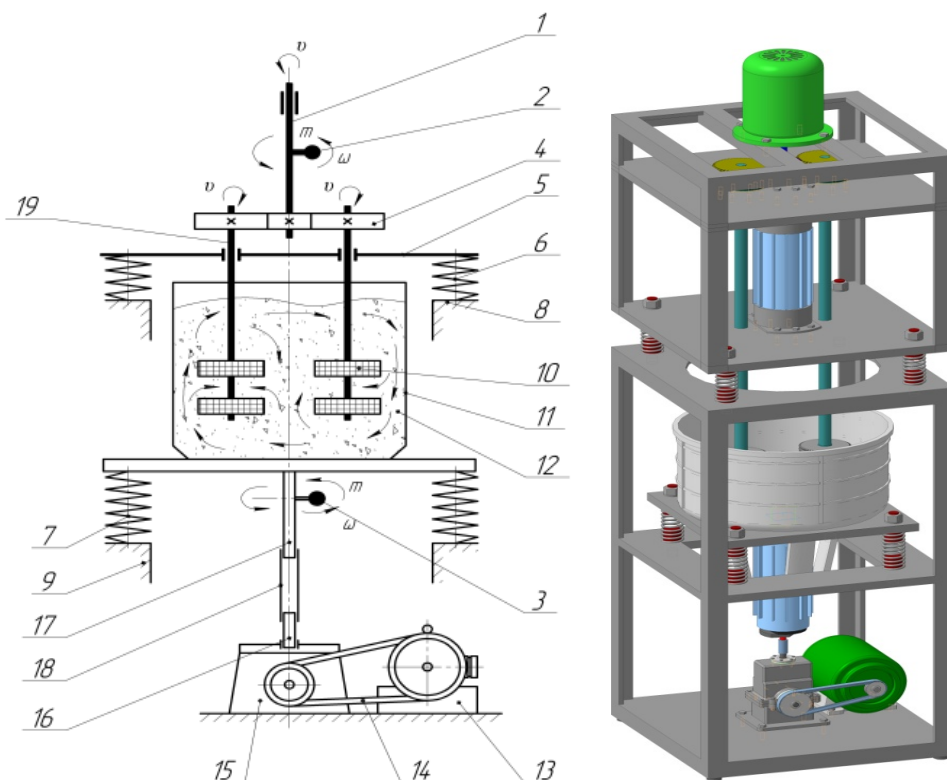


Рис. 9. Принципиальная схема и общий вид компонетики гибридного вибростанка для реализации мультиэнергетических технологий: 1 – установочные пальцы; 2, 17 – вибровозбудитель; 3, 9 – колебательные системы; 4, 10 – пружинная подвеска; 5, 11 – жесткая опора; 6 – резервуар; 7 – рабочая среда; 8 – обрабатываемые детали; 12, 18 – валы; 13 – электродвигатель; 14 – клиноременная передача; 15 – конический редуктор

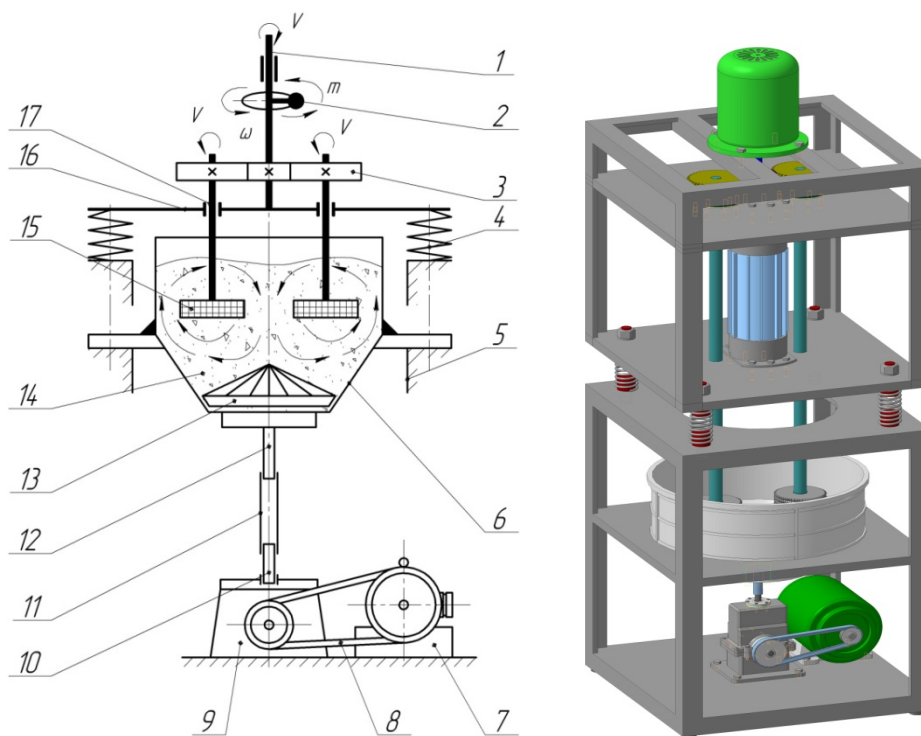


Рис. 10. Принципиальная схема и общий вид компонентики гибридного вибростанка для реализации мультиэнергетических технологий: 1 – установочные пальцы; 2, 17 – вибровозбудитель; 3, 9 – колебательные системы; 4, 10 – пружинная подвеска; 5, 11 – жесткая опора; 6 – резервуар; 7 – рабочая среда; 8 – обрабатываемые детали; 12, 18 – валы; 13 – электродвигатель; 14 – клиноременная передача; 15 – конический редуктор

В качестве мелкодисперсной рабочей среды используют шлифзерно и шлифпорошок, в качестве крупнодисперсной абразивные и металлические гранулы, которые помещают в установленный на жесткой опоре с помощью упругой подвески резервуар цилиндрической формы с большей вертикальной осью, вдоль которой смонтирован инерционный вибровозбудитель. Вал вибровозбудителя располагают вблизи к нижней части резервуара в вертикальной плоскости, перпендикулярной плоскости его колебаний и через гибкую муфту соединяют с валом конического редуктора, кинематически связанного клиноременной передачей с электродвигателем.

Опыт внедрения. Выполняли операцию виброобработки деталей, целью которой было удаление заусенцев, скругление острых кромок с одновременным шлифованием поверхности до $R_a = 0,63 \dots 0,32$ мкм на заготовках деталей общемашиностроительного производства «Шкив», «Катушка» «Втулка специальная». Наибольший линейный размер заготовок 100 мм, наибольший диаметральный размер – 60 мм. Материал заготовок – сталь 20 ГОСТ 1050-84. Дефекты поверхностей образованы предшествующими операциями на металлорежущих станках. Наружная поверхность заготовок деталей сложная, цилиндрической, конической, криволинейной и комбинированной формы с закрытыми уступами и сопряжениями радиусом до 5 мм. Партия совместной обработки – 16 единиц. В качестве рабочей среды

использовались абразивные гранулы ПТ 10 ТУ2-036-925-83 для смачивания которых применялся химически-активный раствор на кислотной основе. Режимы обработки: скорость вращения вертикального шпинделя 900 об/мин, амплитуда его колебаний 1,0...1,2 мм, частота 50 Гц. Амплитуда колебаний резервуара – 1,8...2,0 мм, частота – 50 Гц. Машинное время операций виброшлифования не превышает 40 минут. Дефекты поверхности удалены полностью, острые кромки скруглены, достигнута требуемая шероховатость поверхности при естественном оттенке металла.

Технология и оборудование на основе центробежного со стороны резервуара и комбинированного горизонтального вибрационного и центробежного со стороны обрабатываемых деталей энергетического воздействия.

Технология и оборудование (рис. 10) предпочтительны для отделочно-зачистных операций тонкого шлифования до $R_a = 0,32 \dots 0,16$ мкм [13].

При реализации технологии рабочую среду с размером гранул не более 25 мм помещают в жестко установленный резервуар, имеющий форму совмещенных по условной плоскости оснований, полых фигур цилиндра и усеченного конуса с большей вертикальной осью. Рабочей среде по средством импеллера в виде усеченного конуса с гофрированной поверхностью, установленного большим основанием к днищу резервуара, от электродвигателя через конический редуктор,

клиноременную передачу и гибкую муфту сообщают вращательное движение. Шпинделю вибростанка и жестко связанному с ним многоместному приспособлению с обрабатываемыми деталями одновременно передают вращательное движение, а также плоское колебательное движение и погружают его в резервуар с циркулирующей рабочей средой, в которой обеспечивают микрорезание и упругопластическое деформирование процесса виброобработки.

Опыт внедрения. Выполняли операцию отделочно-зачистной обработки связанную с удалением заусенцев, скруглением острых кромок, а также виброшлифованием с целью уменьшения шероховатости поверхности до $R_a = 0,32$ мкм на заготовках детали «Втулка специальная» сложной формы комбинированной сопряжениями цилиндрических, конических и криволинейных поверхностей, с наличием перепадов диаметральных размеров, а также сквозным центральным отверстием, которое использовалось для установки в многоместном приспособлении вибростанка. Дефекты поверхности образованы предшествующими операциями точения и сверления. Материал заготовок сталь 20 ГОСТ1050-84. Толщина заусенцев у основания 0,15...0,18 мм. Исходная шероховатость поверхности $R_a = 2,5$ мкм. Размеры заготовок: длина 120 мм; наибольший диаметр 80 мм. Партия совместной обработки составляла 16 заготовок. В качестве рабочей среды использовались шары из технического фарфора ГОСТ 20419-83. Рабочая среда и заготовки смачивались химически-активным раствором на щелочной основе. Режимы обработки: скорость вращения шпинделя 800 об/мин; скорость вращения импеллера 1000 об/мин; амплитуда колебаний 1,4...1,6 мм; частота 50 Гц. Машинное время обработки 35 минут. Дефекты поверхности удалены полностью, достигнута требуемая шероховатость при естественном оттенке металла.

Технология и оборудование на основе комбинированного горизонтального вибрационного и центробежного со стороны резервуара и комбинированного центробежного и горизонтального вибрационного воздействия со стороны обрабатываемых деталей.

Технология и оборудование (рис. 11) предпочтительны для отделочно-зачистных операций чистового и тонкого шлифования до шероховатости $R_a = 0,32$ мкм [14].

Технология реализуется свободной абразивной средой в виде шлифзерна и шлифпорошков, а также абразивных и металлических гранул, увлажненных химически-активным раствором. Обработку проводят в упруго смонтированном резервуаре, имеющем форму совмещенных по условной плоскости оснований полых фигур цилиндра и усеченного конуса с большей вертикальной осью. Вращающийся импеллер в виде усеченного конуса с

гофрированной поверхностью устанавливают большим основанием к днищу резервуара. Вал импеллера находящийся вне резервуара жестко связывают с инерционным вибровозбудителем, а затем последовательно через гибкую муфту с валом конического редуктора и с помощью клиноременной передачи с электродвигателем. При этом ось вала вибровозбудителя, конструктивно расположенного вблизи к нижней наружной части резервуара совпадает с вертикальной осью резервуара и перпендикулярна его сечению в плоскости колебаний.

Обрабатываемые детали базируют и закрепляют на установочных пальцах приспособления, связанного со шпинделем вибростанка зубчатой передачей двухпарного зацепления цилиндрических колес и имеющего при погружении в рабочую зону резервуара возможность вращательного и одновременно колебательного движения, возбуждаемого в горизонтальной плоскости инерционным вибровозбудителем, расположенным на шпинделе вибростанка.

Рабочей среде сообщают вращательное движение со скоростью 50...1440 об/мин, а также колебательные движения с амплитудой 0,2...3,0 мм и частотой 30...70 Гц. Шпинделю вибростанка и жестко связанному с ним приспособлению обрабатываемыми деталями передают вращательное движение со скоростью 31,5...1400 об/мин и колебательное движение с амплитудой 0,2...3,0 мм и частотой 30...70 Гц. Шпиндель и приспособление с обрабатываемыми деталями погружают в резервуар с циркулирующей средой, обеспечивают микрорезание и упругопластическое деформирование процесса виброобработки при удалении дефектного слоя металла и уменьшении чистоты шероховатости поверхности.

Опыт внедрения. Выполняли операцию отделочно-зачистной обработки по удалению заусенцев, скруглению острых кромок, а также шлифованию свободной абразивной средой с целью уменьшения шероховатости поверхности до $R_a = 0,32$ мкм и менее на заготовках деталей корпусов гидропневмосистем после предшествующих операций фрезерования сложнопровольных поверхностей и сверления сквозных и глухих поверхностей различного диаметра. Материал заготовок алюминиевый сплав АЛ-9 ГОСТ 1583-93. Заготовки получены методом литья, толщина заусенцев 0,15...0,22 мкм. Форма заготовок сложная, образованная сопряжениями криволинейных поверхностей. Наибольший габаритный размер заготовки не превышает 130 мм. Резервуар лабораторного вибростанка был снабжен импеллером в виде усеченного конуса с высотой 100 мм. Объем резервуар позволял установить

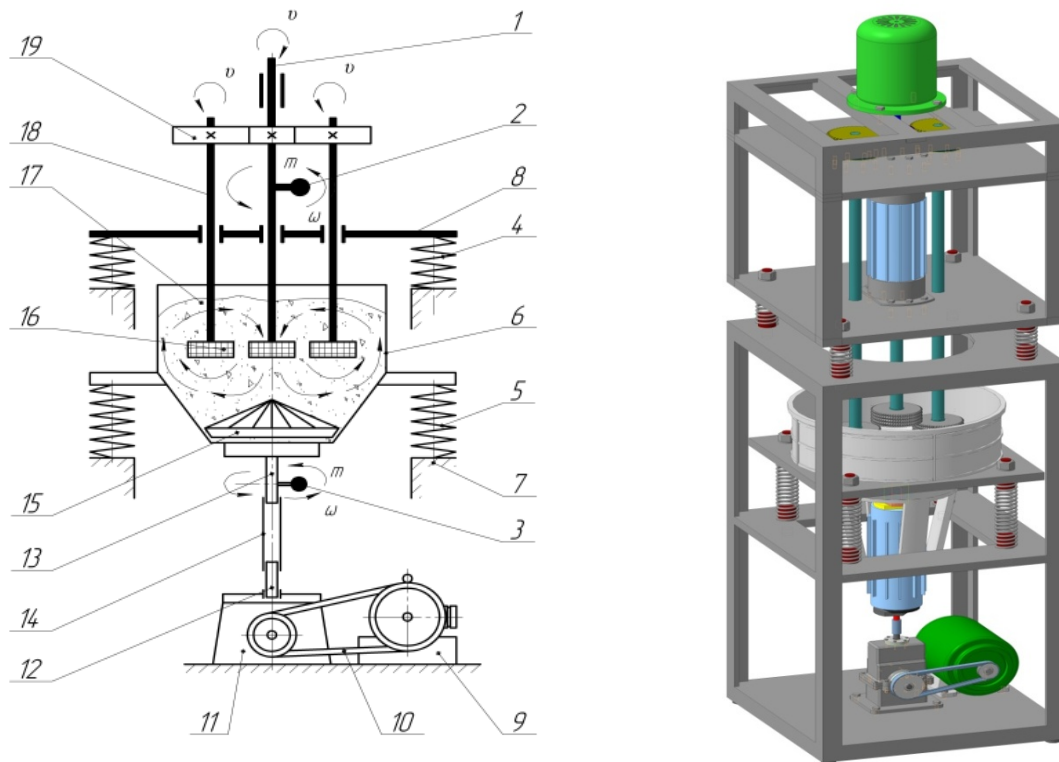


Рис. 11. Принципиальная схема и общий вид компонентики гибридного вибростанка для реализации мультиэнергетических технологий: 1 – установочные пальцы; 2, 17 – вибровозбудитель; 3, 9 – колебательные системы; 4, 10 – пружинная подвеска; 5, 11 – жесткая опора; 6 – резервуар; 7 – рабочая среда; 8 – обрабатываемые детали; 12, 18 – валы; 13 – электродвигатель; 14 – клиноременная передача; 15 – конический редуктор

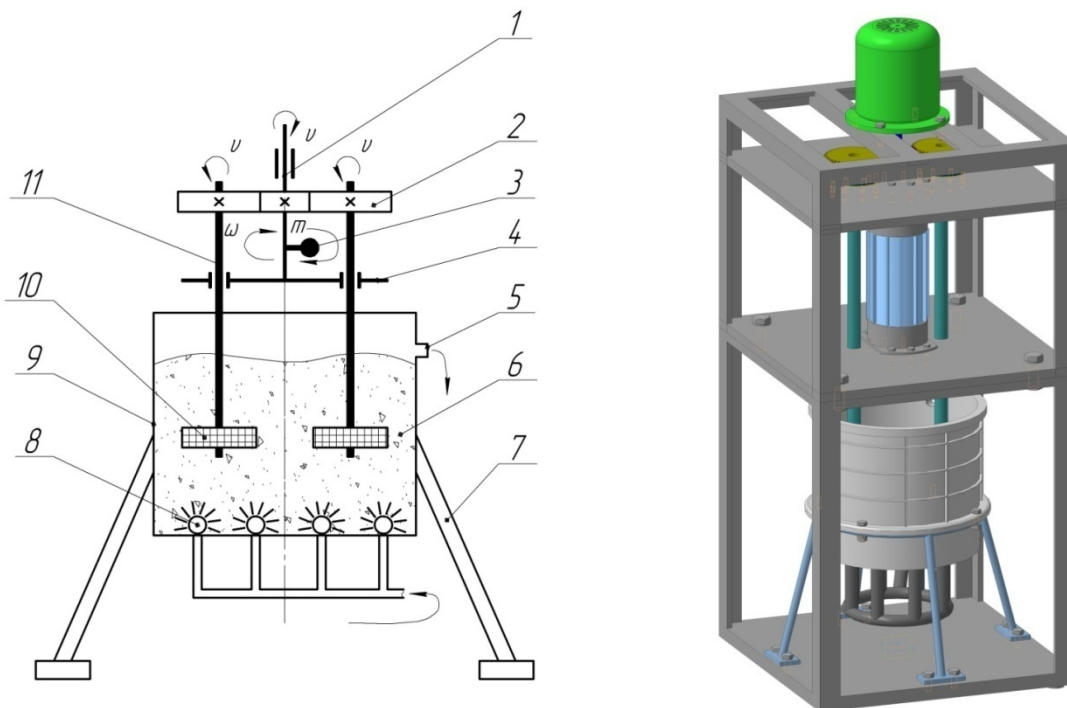


Рис. 12. Принципиальная схема и общий вид компонентики гибридного вибростанка для реализации мультиэнергетических технологий: 1 – установочные пальцы; 2, 17 – вибровозбудитель; 3, 9 – колебательные системы; 4, 10 – пружинная подвеска; 5, 11 – жесткая опора; 6 – резервуар; 7 – рабочая среда; 8 – обрабатываемые детали; 12, 18 – валы; 13 – электродвигатель; 14 – клиноременная передача; 15 – конический редуктор

пакетами в приспособлении шпинделя 8 заготовок. В качестве рабочей среды использовалась минералокерамическая крошка с размером гранул 3...5 мм, смоченная химически-активным раствором на щелочной основе.

Режимы обработки: скорость вращательного движения импеллера 800 об/мин; шпинделя 950 об/мин; амплитуда колебаний вибровозбудителей 1,2...1,4 мм, частота 50 Гц. Машинное время операции виброшлифования не превышает 40 минут. Дефекты поверхности удалены полностью, острые кромки скруглены, достигнута требуемая шероховатость поверхности при естественном оттенке металла.

Технология и оборудование на основе гидродинамического со стороны резервуара и комбинированного горизонтального вибрационного и центробежного энергетического воздействия со стороны обрабатываемых деталей.

Технология и оборудование (рис. 12) предпочтительны для отделочно-зачистных операций тонкого шлифования до шероховатости $R_a = 0,32$ мкм, а также могут быть использованы на операциях полирования до шероховатости $R_a = 0,16$ мкм [15].

При реализации технологии обрабатываемые детали по отдельности или пакетами устанавливают в приспособлении на вертикальном шпинделе, который приводят во вращательное движение и погружают в рабочую зону подпружиненного резервуара заполненного рабочей средой, совершающей плоские колебательные движения. В циркуляционных потоках содержимого резервуара микрорезанием и упругопластическим деформированием проводят обработку, удаляют дефектный слой металла, уменьшают шероховатость поверхности.

Операции проводят при одновременном использовании вибрационных и центробежных сил, а также сил струйного воздействия движущихся потоков жидкости на мелкодисперсную рабочую среду, формообразующие свойства которой проявляются при равномерном и стабильном контакте с обрабатываемой поверхностью любой сложности.

Мелкодисперсную рабочую среду в виде шлифзерна и шлифпорошков, технического стекла, фарфора и др., с размером гранул не более 2 мм помещают в смонтированный на жесткой опоре цилиндрический резервуар, по площади основания которого симметрично установлены гидродинамические устройства, с помощью которых формируют струйные движения потоков подаваемой под давлением жидкости.

Обрабатываемые детали по отдельности или пакетами устанавливают на расположенных по концентрическим окружностям пальцах многоместного приспособления, связанного со шпинделем с расположенным на его оси

инерционным вибровозбудителем передачей двухпарного зацепления цилиндрических колес.

Шпинделю вибростанка сообщают одновременные вращательные движения и колебательные движения, погружая его в резервуар с рабочей средой, находящийся в псевдосжиженном состоянии, при этом обеспечивается процесс виброобработки.

Опыт внедрения. Выполняли операцию отделочно-зачистной обработки по удалению заусенцев, скруглению острых кромок, а также виброшлифованию с целью достижения шероховатости поверхности $R_a = 0,32$ мкм на заготовках корпусных деталей. Материал заготовок АЛ-9 ГОСТ 1583-93. Форма сложная, имеют место ниши, карманы, глухие и сквозные отверстия, разнопрофильные поверхности, образованные сопряжением малых радиусов с труднодоступными для обработки участками. Размеры заготовок 90×80×70 мм. Исходная шероховатость поверхности $R_a = 2,5$ мкм. Резервуар вибростанка позволял одновременно разместить 12 деталей. В качестве рабочей среды использовался шлифпорошок корунда кремния черного зернистостью 32. Режимы обработки: скорость вращения шпинделя 800 об/мин; амплитуда и частота колебаний вибровозбудителя 1,2...1,4 мм, 30 Гц; давление и расход жидкости, подаваемой в резервуар обеспечивал псевдосжиженное состояние рабочей среды.

Выводы. Анализируя общие положения механизма виброобработки, можно констатировать и подтвердить тот факт, что физическая сущность классической технологии отделочно-зачистной виброобработки состоит в том, что помещенная «внавал» в колеблющийся резервуар вибростанка гранулы абразивной среды и обрабатываемые детали с различными скоростями совершают циркуляционное движение по конструктивно заданной траектории. В результате за счет относительного перемещения и взаимного давления гранул и деталей происходят процессы микрорезания и упругопластического деформирования, вызывающие удаление дефектного слоя металла с обрабатываемой поверхности деталей и одновременное уменьшение высоты ее микронеровностей.

Также необходимо дополнить, что в основе механики традиционного процесса виброобработки лежит динамическое взаимодействие рабочих поверхностей резервуара, то есть его стенок и днища с абразивной средой различной характеристики и состава. Характеристика среды по своим физическим, механическим и физико-химическим свойствам может, изменяться в широком диапазоне. Режимы колебаний при обработке деталей могут подвергаться варьированию, как и другие основные параметры технологии.

Далее, если говорить о мультиэнергетических процессах и гибридных вибростанках, то необходимо уточнить, что при этом обрабатываемым деталям сообщаются дополнительные виды колебательного или другого движения путем их установки на соответствующие устройства и манипуляторы. Комбинируя различные сочетания конструктивных и технологических параметров, возможно, значительно расширить область эффективного использования отделочно-зачистной обработки на основе создания и внедрения новых разновидностей и технологий, а также современного производительного оборудования для их реализации.

Таким образом, на основе научной и практической информации, изложенной в данной статье, сделаны попытки создания мультиэнергетических технологий отделочно-зачистной виброобработки и гибридных вибростанков, относящихся к инновационной технике XXI века.

Л и т е р а т у р а

1. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2008. – 694 с.
2. Мицык А.В. Пути интенсификации вибрационной отделочно-зачистной обработки комбинированием схем энергетических воздействий на рабочую среду и детали / А.В. Мицык, В.А. Федорович // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2011. – № 6 (83). – С. 26 – 34.
3. 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 и др.; под ред. А.П. Бабичева. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2010. – 289 с.
4. Мицык А.В. Компонетика агрегатированных технологических систем отделочно-зачистной обработки / А.В. Мицык, В.А. Федорович // *матеріали XXIV Міжнар. наук.-практ. конф. «MicroCAD-2016»* 18 – 20 трав. 2016 р., Харків, Україна / НТУ «ХПІ». – Харків, 2016. – С. 131.
5. Пат. 69421 Україна, МПК B24B31/06. Спосіб віброобробки деталей / А.В. Міцик; власник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № u 201112717; заявл. 31.10.2011; опублік. 25.04.2012, Бюл. № 8.
6. Пат. 69420 Україна, МПК B24B31/06. Спосіб віброобробки деталей / А.В. Міцик; власник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № u 201112715; заявл. 31.10.2011; опублік. 25.04.2012, Бюл. № 8.
7. Пат. 73789 Україна, МПК B24B31/06. Спосіб оздоблювально-зачищувальної обробки вільним абразивним середовищем / А.В. Міцик; власник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № u 201203028; заявл. 15.03.2012; опублік. 10.10.2012, Бюл. № 19.
8. Пат. 70348 Україна, МПК B24B31/06. Спосіб віброобробки деталей / А.В. Міцик; власник Східноукраїнський національний університет імені

- Володимира Даля. – № u 201113050; заявл. 07.11.2011; опублік. 11.06.2012, Бюл. № 11.
9. Пат. 66646 Україна, МПК B24B31/06. Спосіб віброобробки деталей / А.В. Міцик; власник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № u 201107936; заявл. 23.06.2011; опублік. 10.01.2012, Бюл. № 1.
10. Пат. 70392 Україна, МПК B24B31/06. Спосіб віброобробки деталей / А.В. Міцик; власник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № u 201113597; заявл. 18.11.2011; опублік. 11.06.2012, Бюл. № 11.
11. Пат. 72100 Україна, МПК B24B31/06. Спосіб віброобробки деталей / А.В. Міцик; власник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № u 201200041; заявл. 03.01.2012; опублік. 10.08.2012, Бюл. № 15.
12. Пат. 73788 Україна, МПК B24B31/06. Спосіб віброобробки деталей / А.В. Міцик; власник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № u 201203027; заявл. 15.03.2012; опублік. 10.10.2012, Бюл. № 19.
13. Пат. 70824 Україна, МПК B24B31/06. Спосіб оздоблювально-зачищувальної обробки вільним абразивним середовищем / А.В. Міцик; власник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № u 201114737; заявл. 12.12.2011; опублік. 25.06.2012, Бюл. № 12.
14. Пат. 73755 Україна, МПК B24B31/06. Спосіб оздоблювально-зачищувальної обробки вільним абразивним середовищем / А.В. Міцик; власник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № u 201202604; заявл. 05.03.2012; опублік. 10.10.2012, Бюл. № 19.
15. Пат. 70391 Україна, МПК B24B31/06. Спосіб віброобробки деталей / А.В. Міцик; власник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № u 201113595; заявл. 18.11.2011; опублік. 11.06.2012, Бюл. № 11.

References

1. Babichev A.P. Osnovy vibracionnoj tehnologii / A.P. Babichev, I.A. Babichev. – Rostov n/D: Izdatel'skij centr DGTU, 2008. – 694 s.
2. Micyk A.V. Puti intensifikacii vibracionnoj otdelochno-zachistnoj obrabotki kombinirovaniem shem jenergeticheskikh vozdejstvij na rabochuju sredu i detali / A.V. Micyk, V.A. Fedorovich // *Aviatsiino-kosmichna tekhnika i tekhnolohiia*. – 2011. – № 6 (83). – S. 26 – 34.
3. Primenenie vibracionnyh tehnologij na operacijah otdelochno-zachistnoj obrabotki detalej (ochistka, mojka, udalenie obloja i zausencev, obrabotka kromok) / A.P. Babichev, P.D. Motrenko, L.K. Gillespi i dr.; pod red. A.P. Babicheva. – Rostov n/D: Izdatel'skij centr DGTU, 2010. – 289 s.
4. Micyk A.V. Komponentika agregatirovanyh tehnologicheskikh sistem otdelochno-zachistnoj obrabotki / A.V. Micyk, V.A. Fedorovich // *materialy XXIV Mizhnar. nauk.-prakt. konf. «MicroCAD-2016»* 18 – 20 trav. 2016 r., Kharkiv, Ukraina / NTU «KhPI». – Kharkiv, 2016. – S. 131.
5. Pat. 69421 Ukraina, MPK V24V 31/06. Sposib vibroobrobky detalei / A.V. Mitsyk; vlasnyk Skhidnoukrainskyi natsionalnyi universytet imeni Volodymyra Dalia. – № u 201112717; zaiaavl. 31.10.2011; opublik. 25.04.2012, Biul. № 8.

6. Pat. 69420 Ukraina, MPK V24V 31/06. Sposib vibroobrobky detalei / A.V. Mitsyk; vlasnyk Skhidnoukrainskyi natsionalnyi universytet imeni Volodymyra Dalia. – № u 201112715; zaiavl. 31.10.2011; opublik. 25.04.2012, Biul. № 8.
7. Pat. 73789 Ukraina, MPK V24V 31/06. Sposib ozdoblivalno-zachyshchuvalnoi obrobky vilnym abrazyvnyym sere dovyschem / A.V. Mitsyk; vlasnyk Skhidnoukrainskyi natsionalnyi universytet imeni Volodymyra Dalia. – № u 201203028; zaiavl. 15.03.2012; opublik. 10.10.2012, Biul. № 19.
8. Pat. 70348 Ukraina, MPK V24V 31/06. Sposib vibroobrobky detalei / A.V. Mitsyk; vlasnyk Skhidnoukrainskyi natsionalnyi universytet imeni Volodymyra Dalia. – № u 201113050; zaiavl. 07.11.2011; opublik. 11.06.2012, Biul. № 11.
9. Pat. 66646 Ukraina, MPK V24V 31/06. Sposib vibroobrobky detalei / A.V. Mitsyk; vlasnyk Skhidnoukrainskyi natsionalnyi universytet imeni Volodymyra Dalia. – № u 201107936; zaiavl. 23.06.2011; opublik. 10.01.2012, Biul. № 1.
10. Pat. 70392 Ukraina, MPK V24V 31/06. Sposib vibroobrobky detalei / A.V. Mitsyk; vlasnyk Skhidnoukrainskyi natsionalnyi universytet imeni Volodymyra Dalia. – № u 201113597; zaiavl. 18.11.2011; opublik. 11.06.2012, Biul. № 11.
11. Pat. 72100 Ukraina, MPK V24V 31/06. Sposib vibroobrobky detalei / A.V. Mitsyk; vlasnyk Skhidnoukrainskyi natsionalnyi universytet imeni Volodymyra Dalia. – № u 201200041; zaiavl. 03.01.2012; opublik. 10.08.2012, Biul. № 15.
12. Pat. 73788 Ukraina, MPK V24V 31/06. Sposib vibroobrobky detalei / A.V. Mitsyk; vlasnyk Skhidnoukrainskyi natsionalnyi universytet imeni Volodymyra Dalia. – № u 201203027; zaiavl. 15.03.2012; opublik. 10.10.2012, Biul. № 19.
13. Pat. 70824 Ukraina, MPK V24V 31/06. Sposib ozdoblivalno-zachyshchuvalnoi obrobky vilnym abrazyvnyym sere dovyschem / A.V. Mitsyk; vlasnyk Skhidnoukrainskyi natsionalnyi universytet imeni Volodymyra Dalia. – № u 201114737; zaiavl. 12.12.2011; opublik. 25.06.2012, Biul. № 12.
14. Pat. 73755 Ukraina, MPK V24V 31/06. Sposib ozdoblivalno-zachyshchuvalnoi obrobky vilnym abrazyvnyym sere dovyschem / A.V. Mitsyk; vlasnyk Skhidnoukrainskyi natsionalnyi universytet imeni Volodymyra Dalia. – № u 201202604; zaiavl. 05.03.2012; opublik. 10.10.2012, Biul. № 19.
15. Pat. 70391 Ukraina, MPK V24V 31/06. Sposib vibroobrobky detalei / A.V. Mitsyk; vlasnyk Skhidnoukrainskyi natsionalnyi universytet imeni Volodymyra Dalia. – № u 201113595; zaiavl. 18.11.2011; opublik. 11.06.2012, Biul. № 11.

Мічик А.В. Технологічний та конструкторський моніторинг, компонентіка та 3D візуалізація гібридних віброверстатів, регламент і досвід впровадження мультіенергетичних технологій оздоблювально-зачишувальної віброоброби.

Викладено загальні відомості і актуальність питання технологічного та конструкторського моніторингу процесу віброоброби. Наведено принципи конструювання та експлуатації вузлів гібридних вибростатів, а також управління процесом віброоброби. Визначено модульні особливості мультіенергетичної технології та компонентіки гібридних вибростатів оздоблювально-зачишувальної обробки з використанням принципів схем і 3D візуалізації. Представлено досвід впровадження мультіенергетичних технологій з регламентом проведення операцій оздоблювально-зачишувальної обробки деталей промислових виробництв.

Ключові слова: віброобробка, мультіенергетичні технології, гібридні виброверстати, компонентіка, 3D візуалізація, конструювання та експлуатація вузлів, управління процесами.

Mitsyk A.V. Technological and design monitoring, composition and 3D visualization of hybrid vibration machines, regulation and implementation experience of multienergy technologies of finishing-grinding vibration treatment.

General information and relevance of the issue of technological and design monitoring of vibration treatment process have been outlined. Principles of design and node exploitation of hybrid vibration machines, as well as management of the vibration treatment process have been presented. Modular features of multienergy technology and the composition of hybrid vibration machines of finishing-grinding treatment with using of schematic diagrams and 3D visualization have been determined. Implementation experience of multienergy technologies with the procedure of finishing-grinding treatment of details of industrial production has been presented.

Key words: vibration treatment, multi-energy technologies, hybrid vibration machines, composition, 3D visualization, design and node exploitation, process management, implementation experience.

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

Рецензент: д.т.н., проф. **Чернецька-Білецька Н.Б.**

Стаття подана 29.09.2017

УДК 621.9.048

ПРИМЕНЕНИЕ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПОД ПОКРЫТИЯ

Николаенко А.П., Шумакова Т.А. Романченко А.В., Таванюк Т.Я.

APPLICATION OF VIBRATION TREATMENT FOR PREPARING SURFACES OF DETAILS FOR COVERING

Nikolaenko A.P., Shumakova T.A., Romanchenko A.V., Tavanyuk T.Y.

В работе проведен анализ возможности применения вибрационной обработки в технологическом процессе нанесения покрытий деталей на операциях подготовки поверхностей. Проведены экспериментальные исследования влияния вибрационной обработки на качество покрытия, при которых оценивалось прочностью сцепления покрытия с поверхностями образцов, обработанных шлифованием и виброшлифованием.

Ключевые слова: *вибрационная обработка, подготовка поверхностей под покрытия, технологический процесс, качество поверхностного слоя*

Введение. Большую роль в повышении качества, надежности, долговечности изделий принадлежит покрытиям, назначение которых в первую очередь защита металлов и сплавов от коррозии. Важной группой предварительных операций, влияющих на качество покрытия, является подготовка поверхностей под покрытия. Целью подготовки является очистка поверхности путем удаления с нее загрязнений, жировых, масляных и окисных пленок, частичное снятие заусенцев. На рис. 1 (а) представлен стандартный технологический процесс нанесения покрытия.

Постановка проблемы. Для подготовки поверхностей деталей под покрытия применяют в основном химический и электрохимический методы. Сущность химического метода заключается в химическом травлении при погружении детали в химически активные жидкостные среды. При электрохимическом методе происходит травление при погружении деталей в электролит и прохождении через него постоянного электролитического тока.

В качестве переходов между основными операциями необходимо также производить мойку, обезжиривание, в некоторых случаях осветление и пассивирование поверхностей. В качестве обезжиривающих средств используются химико-

механические (венская известь, жженный доломит и др.), органические растворители (бензин, керосин, дихлорэтан, трихлорэтан, четыреххлористый углерод и др.) и химически активные среды (щелочные растворы, гидролизующиеся солевые растворы и др.) [1, 2]. Для травления поверхностей деталей используют азотную, уксусную, серную кислоты концентрации 500...750 г/л. Для осветления деталей используют соляную кислоту, формалин, аммиак. Недостатками химических методов подготовки поверхностей под покрытия являются:

- низкая точность обработки, из-за значительной толщины снимаемого с поверхности детали металла (до 20 мкм);
- неравномерность стравливания материала с поверхности;
- растравление поверхностного слоя заготовок;
- потеря контроля над процессом получения заданной шероховатости;
- загрязнение окружающей среды;
- быстрый выход из строя оборудования.

В то же время одним из способов подготовки поверхностей под любые покрытия: лакокрасочное, гальваническое, химическое, вакуумное напыление, химико-термическое осаждение и прочие, как уже неоднократно указывалось ранее, является вибрационная обработка, при которой существует возможность как совмещения механической и химической обработки, так и предварительной механической обработки поверхности.

Механическая виброобработка предусматривает создание развитого микрорельефа с множеством закрытых не связанных между собой резервуаров, что обеспечивает лучшее сцепление покрытий, а следовательно исключает традиционные дефекты покрытия, возникающие вследствие некачественной подготовки, такие как отслаивание, шелушение, низкая адгезия, что подтверждается проведенными экспериментальными исследованиями [3, 4, 5, 6-8].

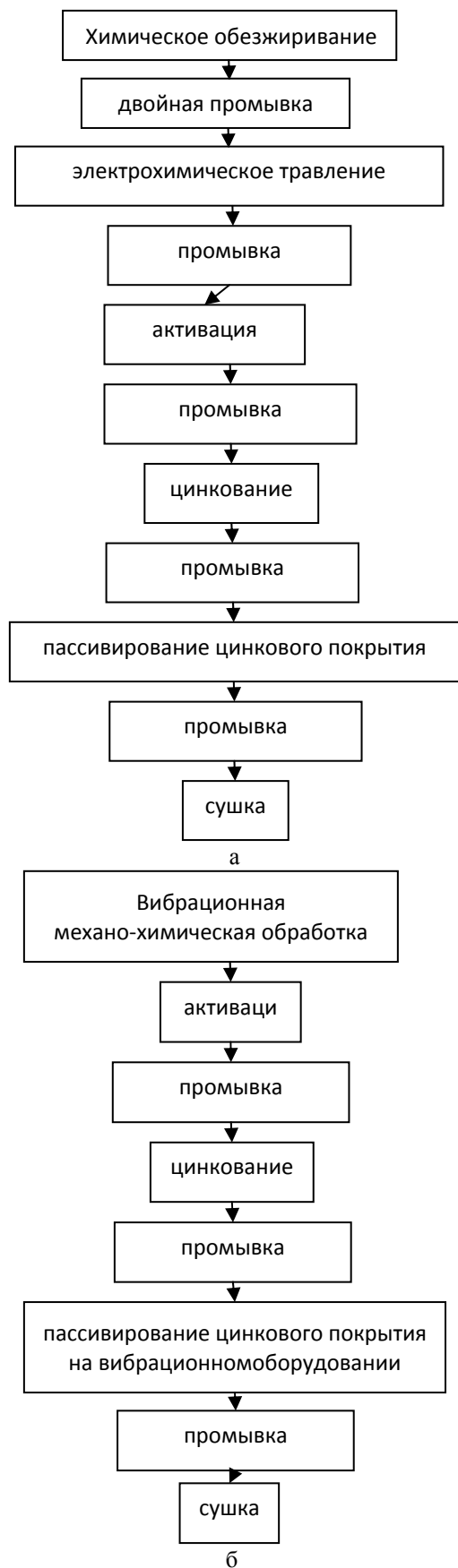


Рис. 1. Технологический процесс нанесения цинкового покрытия:

а – типовой; б – с применением вибрационной обработки

Механическое воздействие гранул рабочей среды приводит к разрушению окисных и сольватных пленок и повышает потенциальную энергию металла до уровня порога охватывания. Взаимная активация механического и химического процесса позволяет сократить число подготовительных операций до 1-2, объединяя отделочно-зачистную обработку (удаление заусенцев, скругление острых кромок, шлифование и др.) с химическими процессами (травление, обезжиривание, активация и др.) в одну стадию. количества подготовительных операций, путем внедрения вибрационной механохимической обработки (рис.1, б).

Анализ исследований и публикаций. Применение вибрационной обработки позволит осуществлять операции химического обезжиривания, травления и промывки за одну технологическую операцию, на одном вибрационном станке только с использованием различных рабочих растворов и последовательной их заменой (в три перехода). При данной схеме полностью сохраняется положительное влияние ВиО на поверхностный слой деталей, а именно происходит устранение направленных следов инструмента после лезвийной обработки, стабилизация остаточных напряжений и последующее повышение сцепляемости поверхности с наносимым покрытием в результате созданного микрорельефа, а также происходит сокращение вспомогательного времени при передаче изделия с одной операции на другую и требуемой площади для размещения оборудования.

В качестве обезжиривающих средств, при вибрационной обработке также используют раствор кальцинированной соды, а в качестве травильных растворов – например, азотную и серную кислоты, в меньшей концентрации (30 г/л). Вибрационные станки, применяемые в НИЛ «ОСА»ВНУ им. В. Даля, снабжены постоянной подачей проточной воды, для осуществления промывки, дозаторами для точной подачи необходимых технологических растворов и средствами для быстрого их удаления – слива отработанного раствора в отстойник, находящийся под контейнером. В связи с использованием химически-активных растворов облицовка контейнера вибрационного станка выполняется из резины ТМКЩ и в этом случае влияние агрессивной среды не сказывается на металлических составляющих контейнера.

При ВиО с применением химически активных рабочих сред обрабатываемые детали находятся под комплексным химическим и механическим воздействием абразивных гранул и раствора. Химическое растворение материала деталей в процессе вибрационной обработки происходит следующим образом. Сначала, происходит растворение жировых пленок, пыли, загрязнений и др. Затем, на кромках, вершинах, заусенцах и других

местах соударения детали и гранул рабочей среды жидкость проникает по трещинам, расслоениям в глубь дефектного слоя и происходит растравливание металла, облегчающее механический съем ликвидов и окисных пленок. Затем производится промывка деталей и последующее нанесение покрытия. Благодаря взаимодействию химически активных компонентов рабочего раствора с поверхностью деталей возможно на вибрационном станке производить пассивирование, фосфатирование деталей, то есть образование на их поверхности защитной пленки.

Соединение химического и механического воздействия способствует усиленному влиянию химических растворов на качество поверхности, что позволяет использовать более экологически безопасные средства обработки, либо снизить их концентрацию благодаря чему исчезает необходимость в дорогостоящей утилизации и снижается вредное воздействия на окружающую среду.

Внедрение вибрационной обработки в процесс подготовки деталей под покрытия позволяет добиться следующих целей:

- очистка поверхности от ликвидов, окалины, ржавчины, заусенцев;
- получение заданной шероховатости и геометрических характеристик обрабатываемой поверхности;
- создание маслосъемного микрорельефа с лучшей сцепляемостью поверхности деталей с покрытием;
- обеспечение положительных экологических показателей;
- создание защитного слоя путем пассивирования или фосфатирования поверхностей изделий.

Цель исследования.

Анализ возможности введения операций вибрационной обработки в технологический процесс подготовки поверхности под гальванические покрытия.

Задачи исследования. Исследование влияния вибрационной обработки, в виде подготовительной операции, на качество покрытия, прочность сцепления покрытия с поверхностью детали.

Результаты исследования. Влияние вибрационной обработки на качество покрытия оценивалось прочностью сцепления покрытия с поверхностями образцов, обработанных шлифованием и виброшлифованием. Для этого группа образцов из сталей 20, 40Х и У8 в количестве 10 образцов для каждой марки стали обрабатывалась шлифованием, а 10 образцов подвергалась виброшлифованию на станке УВИ-25 с расположением вибровозбудителя под углом 45° в среде боя шарошлифовальных кругов АН-2 в течение 60 минут и затем вибрационному полированию на станке ВМИ-1003 в среде стальных шариков в течение 30 минут.

На поверхность образцов наносилось гальваническое цинковое покрытие с последующим пассивированием (рис. 2). Толщина покрытия составляла 6 мкм. В состав пассивирующего покрытия входят серная и азотная кислоты, оксид хрома. Толщину покрытия измеряли толщиномером. Для оценки прочности сцепления цинкового покрытия использовались методы контроля по ГОСТ 9.302-88, в соответствии с которым применяли методы нанесения сетки царапин и нагрева.



Рис. 2. Общий вид образцов, покрытых цинком

Суть метода нанесения сетки царапин заключается в следующем. На поверхность контролируемого покрытия острием индентора с углом при вершине 30° из сплава ВК6, твердость которого выше твердости покрытия, наносили три параллельных риски с расстоянием между ними от 2 до 3 мм, а также перпендикулярно к ним также три параллельных риски. Риски наносили в одном направлении, глубиной до основного металла. При качественной подготовке поверхности под покрытие отслаивания между линиями и в сетке квадратов должно отсутствовать.

После нанесения сетки царапин на поверхности образца, подготовленной шлифованием, наблюдалось шелушение и отслаивание покрытия по краям царапин (рис. 3, а). На поверхности образцов после вибрационной обработки отслаивания не наблюдалось (рис. 3, б).

При проведении контроля методом нагрева образец с покрытием нагревают в соответствии с ГОСТ 9.302-88, до температуры 190°C , выдерживают при данной температуре в течение 1 ч и затем охлаждают на воздухе. После охлаждения на поверхности не должно быть вздутий или отслаиваний покрытия (рис. 4).

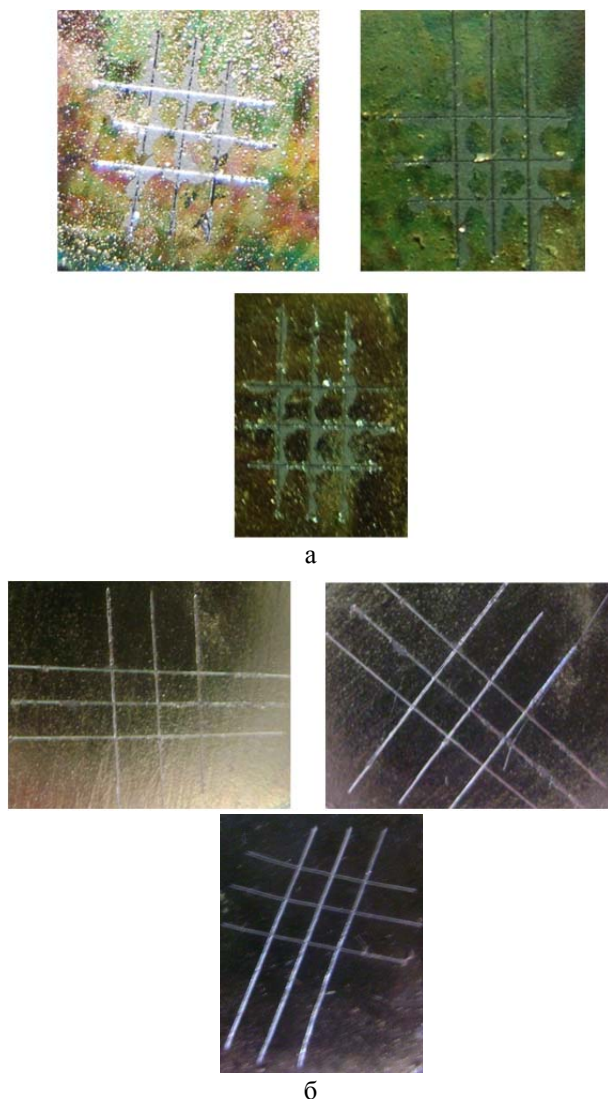


Рис. 3. Вид поверхности образцов, с нанесенной сеткой царапин, подготовленных к нанесению покрытия шлифованием (а) и виброобработкой (б)

Как показали исследования, подготовка поверхности к нанесению покрытия вибрационной обработкой обеспечивает более высокую прочность сцепления покрытия с основным материалом по сравнению с подготовкой поверхности шлифованием. Это объясняется тем, что микрорельеф после виброобработки характеризуется множеством изолированных впадин, что позволяет материалу покрытия проникать в структуру основного металла детали (образца), обеспечивая тем самым лучшую прочность сцепления покрытия, которая является одним из основных показателей качества покрытий.

Введение в технологический процесс вибрационной обработки является перспективным и способствует повышению не только технологических характеристик изделий, но и экономических – снижение себестоимости и повышение конкурентоспособности изделий.

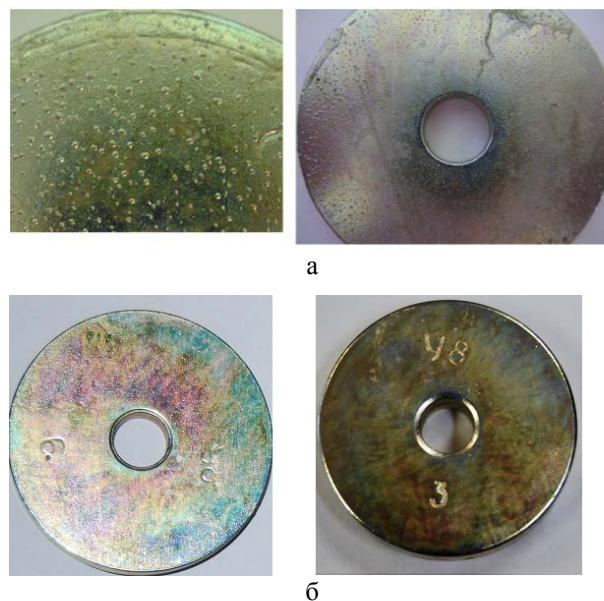


Рис. 4. Вид поверхности образцов после нагрева, подготовленных к нанесению покрытия шлифованием (а) и вибрационной обработкой (б)

Л и т е р а т у р а

1. Кулаков Ю. М. Отделочно-зачистная обработка деталей / Ю.М. Кулаков, В.А. Хрульков. – М: Машиностроение, 1979. – 216 с.
2. Отделочно-абразивные методы обработки: справ. пособие / Л.М. Кожуро, А.А. Панов, Э.Б. Пономарева, П.С. Чистосердов / Под общ. ред. П.С. Чистосердова. – Минск.: Высшая школа, 1983. – 287 с.
3. 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 и др.; под ред. А.П. Бабичева. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2010. – 289 с.
4. Бабичев А.П. Физико-технологические основы методов обработки. / А.П. Бабичев. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2006. – 410 с.
5. Николаенко А.П. Формирование поверхности изделия при вибрационной обработке / А.П. Николаенко // Вібрації в техніці та технологіях Вид-во ВНАУ, м. Вінниця. – 2010. – №2 (58). – С. 167 – 184.
6. Соколов В.І., Кроль О.С., Єпіфанова О.В. Гідравліка. – Северодонецк: СХУ ім. В. Даля. – 2017. – 160 с.
7. Кроль О.С., Шумакова Т.О., Соколов В.І. Проектування зуборізних інструментів за допомогою системи КОМПАС. – Луганськ: СХУ ім. В. Даля. – 2013. – 142 с.
8. Кроль О.С., Шевченко С.В., Соколов В.І. Проектування металорізальних верстатів у середовищі АРМ WinMachine. – Луганськ: СХУ ім. В. Даля. – 2011. – 388 с.

References

1. Kulakov, Yu.M., Khrulkov, V.A. (1979), Otdelochno-zachistnaia obrabotka detalei [Finishing and cleaning of parts], Mashinostroenie, Moskva, Russia.
2. Kozhuro L. M., Panov, A. A., Ponomareva, Je. B., Chistoserdov, P. S. (1983), Otdelochno-abrazivnyemetodyobrabotki: sprav. posobie [Finishing-

- abrasive processing methods], Vysshajashkola, Minsk, Belarus.
3. Babichev, A. P. (2010), *Primenenie vibracionnyh tehnologij na operacii hotdelochno-zachistnoj obrabotki detalей (ochistka, mojka, udalenie obloja i zausencev, obrabotka kromok)* [Use of vibration technology on finishing and stripping operations (cleaning, deflashing and deburring, edge processing)], DGTU, Rostov-on-Don, Russia.
 4. Babichev, A. P. (2006), *Fiziko-tehnologicheskie osnovy metodov obrabotki* [Physical and technological basis of processing methods], Feniks, Rostov-on-Don, Russia.
 5. Nikolaenko A.P. (2010) *Formirovanie poverhnosti izdelij pri vibracionnoj obrabotke* [Formation of the surface of the product during vibration processing], *Vibracii i tehnici tehnologijah*, VNAU, Vinnitsa.
 6. Sokolov V., Krol O., Yepifanova O. *Hydraulics*. V. Dahl EUNU, Severodonetsk, 2017.
 7. Krol O., Shumakova T., Sokolov V. *Design metal cutting instruments by dint of system of KOMPAS*. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2013.
 8. Krol O., Shevchenko S.V., Sokolov V. *Design machine tools in environment APM WinMachine*. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2011.

Ніколаєнко А.П., Шумакова Т.О., Романченко О.В., Таванюк Т.Я. Використання вібраційної обробки при підготовці поверхні деталей під покриття.

В роботі проведено аналіз можливостей використання вібраційної обробки в технологічному процесі нанесення покриттів деталей на операціях підготовки поверхневого шару. Проведені експериментальні дослідження впливу вібраційної обробки на якість покриття, при яких оцінювалась міцність зчеплення покриття з поверхнями зразків, що були оброблені шліфуванням та віброшліфуванням.

Ключові слова: вібраційна обробка, підготовка поверхні під покриття, технологічний процес, якість поверхневого шару.

Nikolaenko A.P., Shumakova T.A., Romanchenko A.V., Tavanyuk T.Y. Application of vibrating treatment for preparing surfaces of details for covering.

The analysis of the possibility of application of vibration treatment in the technological process of coating the surface of parts on preparation operations has been done in the article. Experimental studies of the influence of vibration treatment on the quality of the coating, under which it was evaluated by the adhesion strength of the coating to the surfaces of samples treated with grinding and vibro-grinding, were held.

Key words: vibration treatment, preparation of surfaces for coatings, technological process, quality of the surface layer.

Ніколаєнко Ганна Павлівна – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк). apnikolaenko@gmail.com

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

Таванюк Тетяна Яківна – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк). ttavanyuk@gmail.com

Рецензент: д.т.н., проф. **Соколов В.І.**

Стаття подана 10.10.2017

УДК 621.9.048

ПРИМЕНЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ, ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ПРОЦЕССЕ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ

Романченко А.В., Николаенко А.П., Таванюк Т.Я., Шумакова Т.А.

APPLICATION OF CHEMICAL, ELECTROCHEMICAL AND ELECTROPHYSICAL METHODS IN PROCESS OF VIBRATION TREATMENT OF DETAILS.

Romanchenko A.V., Nikolaenko A.P., Tavanyuk T.Y., Shumakova T.A.

В работе проведен анализ химических, электрохимических и электрофизических методов интенсификации процесса вибрационной обработки деталей. Рассмотрены функциональные и конструктивные особенности станков с применением данных методов. Указаны достоинства и недостатки представленных станков. На основе проведенных исследований установлены основные факторы, оказывающие влияние на создание новых и модернизацию известных вибрационных станков при применении химических, электрохимических и электрофизических методов.

Ключевые слова: вибрационная обработка, химический метод, электрохимический метод, электрофизический метод, технологический комплекс.

Ведение. Современные тенденции развития машиностроения требуют постоянного повышения качественных показателей выпускаемых деталей и изделий. Одновременно, при постановке задачи по улучшению качества производитель также требует сохранить, а в ряде случаев, увеличить количество выпускаемой продукции, не изменяя временных показателей. В таких условиях необходимо усовершенствование процесса изготовления детали или изделия на всех этапах производства. Особые требования предъявляются к качеству поверхности деталей, а следовательно, и к финишным операциям.

Постановка проблемы. Среди методов, осуществляющих отделочные операции, вибрационный метод обработки является одним из самых высокопроизводительных [1-4]. Сущность процесса вибрационной обработки состоит в том, что в «U»-образный резервуар (контейнер) помещают рабочую среду, обрабатываемые детали и другие интенсифицирующие добавки. Далее резервуару с помощью внешнего источника энергии сообщают колебательные движения. В результате относительного перемещения и в заимного давления гранул среды и обрабатываемых деталей происходят

процессы микрорезания и упругопластического деформирования, что обеспечивает удаление дефектного слоя металла, а также уменьшение шероховатости поверхности деталей [5, 6].

Процесс вибрационной обработки является безразмерным, не изменяющим форму и размеры обрабатываемых деталей. Отсутствие жесткой связи деталей и рабочей среды, и равномерная обработка всей поверхности, скоторой контактирует рабочая среда, обеспечивают обработку различных деталей простой и сложной формы [6].

Неотъемлемой частью процесса вибрационной обработки является применение химических растворов. Воздействие химически-активных растворов способствует интенсификации указанных операций и приданию виброобработке дополнительных возможностей [7].

Кроме химических методов повышения эффективности вибрационной обработки применяются электрохимические и электрофизические методы обработки. Очевидно, что современные вибрационные станки должны обладать возможностью применения таких методов, следовательно, необходимо сформулировать требования, которые должны учитываться на этапе создания нового оборудования, а также позволять производить модернизацию имеющихся станков.

Анализ исследований и публикаций. Вибрационная обработка является сложным многофакторным процессом. Существует множество работ по определению факторов, оказывающих наибольшее влияние на процесс вибрационной обработки.

По мнению [8] производительность ВиО увеличивается с ростом амплитуды, поэтому следует выбирать наибольшие амплитуды колебаний для повышения интенсивности съема металла.

Авторами работы [9] выделены следующие факторы: амплитуда, частота, форма траектории, характеристика абразивного материала, объем загрузки, характер движения загрузки, характеристики наполнителя, образование отходов.

В работах [10, 11] были определены семь обобщающих факторов, которые влияют на получение технологического эффекта вибрационной обработки:

1) исходное состояние заготовки и конечная цель обработки (метод получения, материал, физико-механические свойства заготовки, состояние поверхностного слоя, форма и размеры детали);

2) режимы движения (характер колебаний контейнера, траектории его движения, амплитуда и частота колебаний);

3) конструктивные особенности контейнера (форма, объем контейнера, наличие приспособлений);

4) рабочие среды (абразивные гранулы с определенными характеристиками, наличие жидких растворов);

5) химическая, электрохимическая, электрофизическая интенсификация процесса вибрационной обработки;

6) конструктивные особенности вибрационного станка;

7) механизация и автоматизация вспомогательных операций, таких как загрузка, выгрузка, отделение обрабатываемых деталей и абразивных гранул.

На данный момент, указанная выше классификация, по мнению авторов работы, учитывает все факторы оказывающие влияние на производительность вибрационной обработки.

Из анализа литературных источников, становится очевидным, что вопросы повышения производительности вибрационной обработки путем применения химических, электрохимических, электрофизических методов требуют более глубокого исследования.

Цель исследования.

Анализ применения химических, электрохимических, электрофизических методов с целью увеличения производительности процесса вибрационной обработки.

Задачи исследования. Исследование функциональных и конструктивных особенностей вибрационных станков при применении химических электрохимических и электрофизических методов. Определение оптимальных параметров и формулировка требований к синтезу таких станков.

Результаты исследования. Как указывалось ранее, применение химически активных растворов является неотъемлемой частью процесса вибрационной обработки деталей. Учитывая высокую эффективность самой вибрационной обработки, некоторые авторы предлагали повысить производительность процесса, усиливая эффект от химически активных растворов, с этой целью было

создано виброэлектрохимическое оборудование. Примером такого оборудования может служить станок, предложенный в работе [8] показанный на рисунке 1.

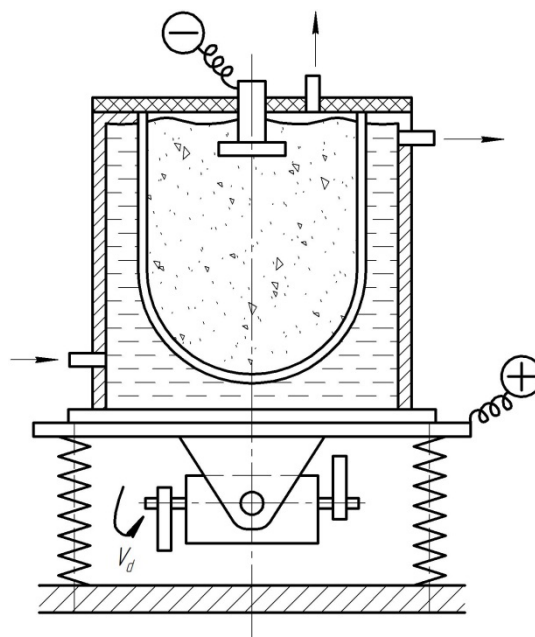


Рис. 1. Станок для виброэлектрохимической обработки

Оборудование работало следующим образом:

в контейнер вибрационного станка заливался электролит, загружались детали и рабочая среда. Контейнер закрывался крышкой из электроизоляционного материала, в центре которого закреплялся электрод. Он изготавливался из токопроводящих, стойких против щелочей и кислот материалов – он являлся вторым электродом. Электроды подключались к источнику постоянного тока. Одновременно с химико-механической вибрационной обработкой протекало и анодное растворение металла детали, причем интенсивнее растворялись гребешки (выступы).

Теми же авторами [8] предложен еще один способ интенсификации процесса виброэлектрохимической обработки. Схема станка для виброэлектрохимической обработки с жестким креплением детали представлена на рисунке 2. При такой схеме обработки деталь жестко закреплялась и занимала строго определенное положение. А катализатором химической реакции также выступал электрический ток.

Как известно, усилить воздействие химически активных растворов и повысить эффективность и производительность процесса в целом позволяет повышение температуры.

Для достижения такого эффекта исследователями в работе [12] предлагался способ вибротермической обработки, который применялся не только на этапе упрочняющих операции, но и для снятия остаточных напряжений, а также нанесения некоторых видов пленок.

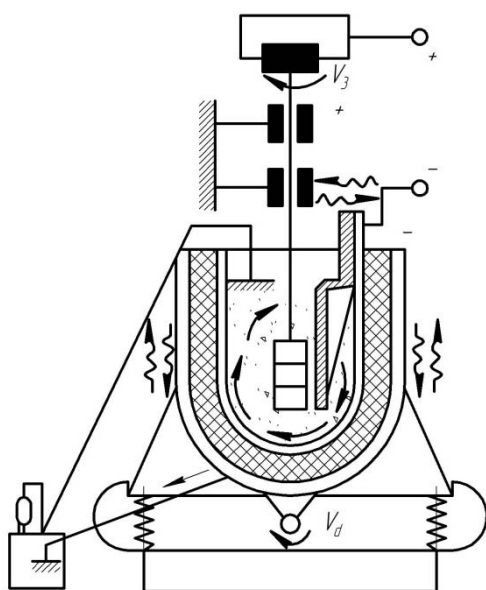


Рис. 2. Станок для виброэлектрохимической обработки с жестким закреплением детали

Суть данного способа заключается в нагреве рабочей среды в процессе обработки. На рисунке 3 представлена конструкция предложенного вибротермического станка.

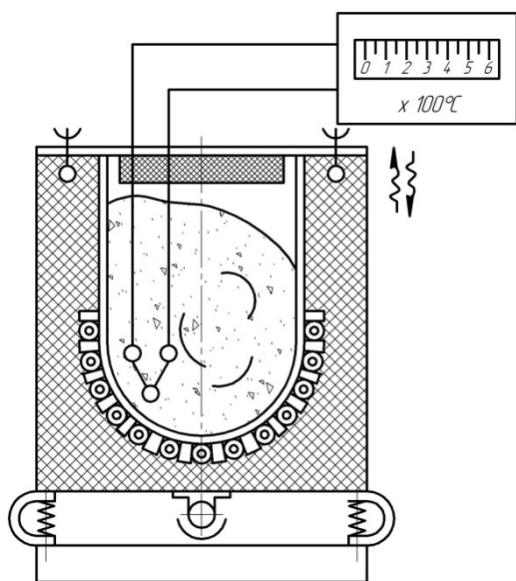


Рис. 3. Вибротермический станок

Расположенные на нижней части контейнера трубчатые электронагреватели разделяются теплоотводящими ребрами. Между кожухом и контейнером, а также во вставной части крышки находится теплоизолятор (жаростойкая ткань или гранулированная минеральная вата, облицованная снаружи металлическим листом). Крышка закрепляется с помощью откидных болтов. Для регулирования теплового режима используется термопара с потенциометром.

Другая конструкция станка предложена авторами в работе [13] и представленная на рисунке 4 разрабатывалась для отделочно-упрочняющей обработки, снятия остаточных напряжений и подготовки поверхности детали под покрытие.

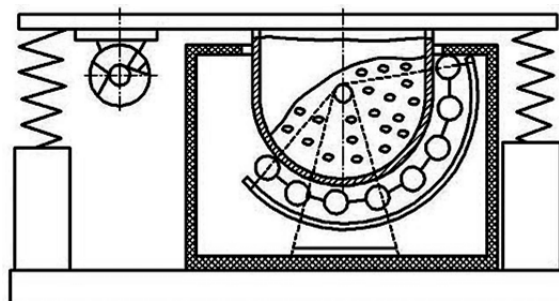


Рис. 4. Вибротермический станок

В этом станке с целью экономии энергозатрат нагревательные элементы жестко связаны в единый блок, который шарнирно соединен с дополнительно введенным в устройство и жестко закрепленным на основании кронштейном, который позволяет производить поворот нагревательного блока относительно вертикальной оси контейнера на 5-30°C.

Однако, как и виброэлектрохимические станки, вибротермические также не получили широкого распространения, что объясняется сложностью их конструкции и повышенными энергозатратами, которые необходимы для обеспечения их работы.

Вибрационная обработка происходит на относительно низких частотах, именно поэтому исследователи производят попытку дополнить процесс колебаниями более высокой частоты. В частности, некоторые ученые в работе [14] предлагают интенсификацию процесса вибрационной обработки путем создания в рабочей среде ультразвуковых волн. Разработанная технологическая схема комбинированной виброультразвуковой обработки представлена на рисунке 5. Предлагаемая схема интенсификации процесса вибрационной обработки с использованием комплексного акустического поля представлена в виде компоновки вибрационного станка и ультразвукового преобразователя. Рабочей камере прямоугольной формы, установленной на упругих пружинах и имеющей возможность колебаться в различных направлениях, сообщается вибрация от инерционного вибратора в виде вращающегося вала с несбалансированными грузами с частотой до 50 Гц и амплитудой от 0,5 до 6-8 мм. Работа преобразователя обеспечивается сообщением электрических импульсов, передаваемых при помощи системы ультразвуковым генератором.

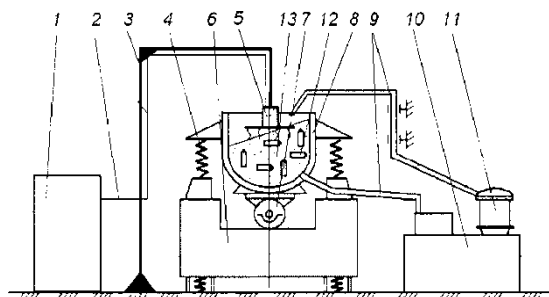


Рис. 5. Технологическая схема комбинированной виброультразвуковой обработки:

- 1 – ультразвуковой генератор; 2 – система подвода питания; 3 – стойка; 4 – пружина;
5 – ультразвуковой преобразователь; 6 – основание;
7 – вибровозбудитель; 8 – рабочий контейнер;
9 – система подачи и слива технологической жидкости;
10 – бак отстойник; 11 – помпа;
12 – обрабатываемые детали; 13 – рабочая среда

Разработчики также предлагают несколько вариантов установки ультразвукового преобразователя относительно рабочей камеры вибрационного станка. На рисунке 6 представлены варианты конструкций рабочих контейнеров с различными схемами расположения ультразвукового преобразователя.

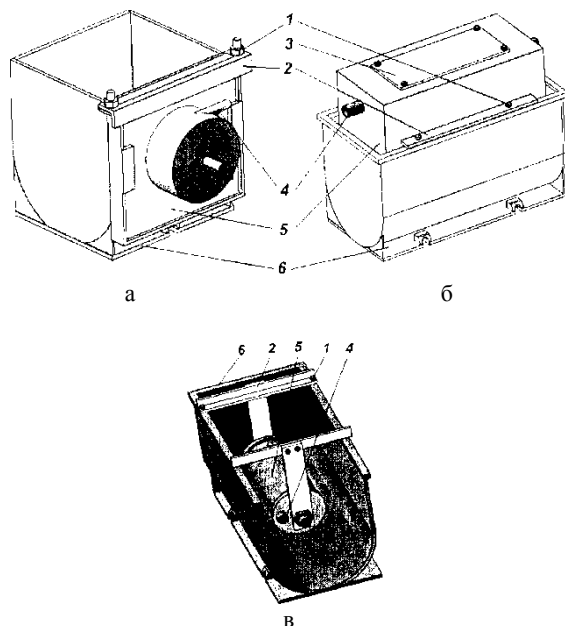


Рис. 6. Конструкций рабочих контейнеров с различными схемами расположения ультразвукового преобразователя:

- а – в стенке рабочего контейнера; б – над рабочим контейнером; в – у дна рабочего контейнера:
1 – резьбовые соединения; 2 – крепление;
3 – смотровой люк;
4 – штуцер для подачи охлаждающей жидкости;
5 – ультразвуковой преобразователь;
6 – рабочий контейнер

Исследователями установлено, что каждая из представленных схем позволяет реализовать дополнительные возможности комбинированного метода. Так, при «встраивании» источника

ультразвуковых колебаний в стенке рабочего контейнера, как показано на рисунке 6 а, под различными углами создается возможность суммирования механических и ультразвуковых волн, оказывающие воздействие на массу загрузки, в результате чего значительно увеличивается циркуляция рабочей среды и создается возможность производить обработку по более «мягким» режимам.

При фиксации преобразователя над контейнером на уровне циркуляции рабочей среды, как показано на рисунке 6 б, обеспечивается ее поджатие на определенную величину, что приводит к увеличению сил соударения частиц между собой и обрабатываемыми деталями в зоне низкого давления и как следствие повышению интенсивности обработки. Преимуществом рассматриваемой схемы является ее высокая универсальность, так как сохраняется неизменность конструкции и геометрии рабочего контейнера, что позволяет использовать приспособления с целью установки преобразователя по торцу рабочего контейнера либо обособлено для обработки партии деталей, после чего его демонтировать.

Расположение преобразователя на расстоянии 5-6 слоев от дна рабочего контейнера, как показано на рисунке 6 в, обеспечивает возрастание колебаний в его центре, которые при базовой схеме вибрационной обработки весьма малы за счет потери энергии при прохождении многослойной рабочей среды. Повышение интенсивности обработки обеспечивается за счет создаваемого пространства, в котором находится определенный объем рабочей среды, частицы которой получают колебания с одной стороны от стенки рабочего контейнера, а с другой от ультразвукового преобразователя. При движении обрабатываемых деталей под действием циркуляции в данном пространстве силы соударения и количество ударов с частицами рабочей среды значительно возрастают [14, 16-18].

Следует отметить, что исследователи стремятся интенсифицировать процесс вибрационной обработки без повышения нагрузок на основные узлы вибрационного станка (подшипниковые узлы, контейнер и т.д.) и именно применение дополнительных ультразвуковых колебаний позволяет осуществить поставленную задачу.

Отдельного внимания заслуживает метод, основанный на применение магнитных колебаний с целью интенсификации процесса вибрационной обработки. Целью применения данного метода, как правило, является противодействие слипанию деталей в процессе обработки, однако применение магнитных колебаний у различных авторов имело своё назначение.

Например, в оборудовании, представленном на рисунке 7, магнитные колебания направлены именно на детали, которые обладают ферромагнитными свойствами. Сущность такой обработки состоит в том, что на обрабатываемую среду и заготовки, помещенные в рабочий контейнер вибрационного станка, воздействует постоянное магнитное поле,

направленное перпендикулярно плоскости циркуляционного движения рабочей среды. Рабочая среда перемещается под действием вибрации, а обрабатываемые ферромагнитные детали ориентируются вдоль магнитных силовых линий. Магнитные силовые линии проходят через рабочий контейнер в направлении от одного полюса к другому. Заготовки не соударяются при обработке благодаря их взаимному отталкиванию.

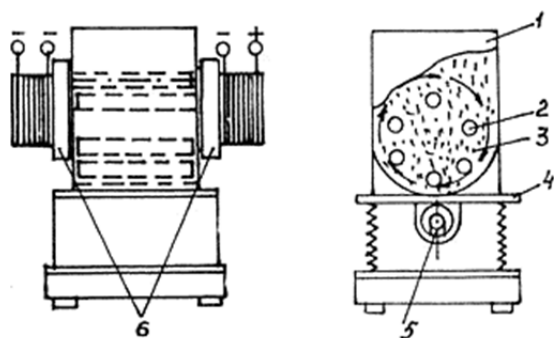


Рис. 7. Вибромагнитный станок:

1 – рабочий контейнер; 2 – заготовка; 3 – рабочая среда; 4 – платформа; 5 – вибровозбудитель; 6 – электромагниты

Заготовки, помещенные в межполюсное пространство электромагнита, занимают устойчивое положение. При числе заготовок не более шести, силы взаимного отталкивания вынуждают их располагаться по кругу. При большем числе заготовки равномерно заполняют объем межполюсного пространства, стремясь расположиться на одинаковом расстоянии друг от друга. Кроме того, подъем электромагнита вызывает перемещение вместе с ним заготовок, что облегчает их отделение от рабочей среды [2].

Следует отметить, что описанная выше конструкция достаточно оригинальна, однако ее основным недостатком является требование к деталям – они должны обладать ферромагнитными свойствами, а это означает малую номенклатуру деталей, подлежащих обработке данным методом.

В работе [15] был предложен способ вибрационной обработки деталей из немагнитных материалов с повышением относительной скорости детали и абразивных рабочих тел и соответственно увеличением силового импульса в зоне контакта гранул и деталей. Для достижения поставленной задачи был разработан станок, представленный на рисунке 8. В отмеченном станке, реализован способ вибрационной обработки, при котором детали обрабатываются в вибрирующем контейнере, в котором создаётся магнитное поле, направляемое по очереди в противоположные направления. Магнитное поле существенно влияет на рабочую среду, которая состоит из абразивных рабочих тел двух типов, которые имеют и не имеют ферромагнитные свойства. Благодаря влиянию магнитного поля на ферромагнитные гранулы,

обеспечиваются дополнительные импульсы, которые способствуют интенсификации процесса обработки.

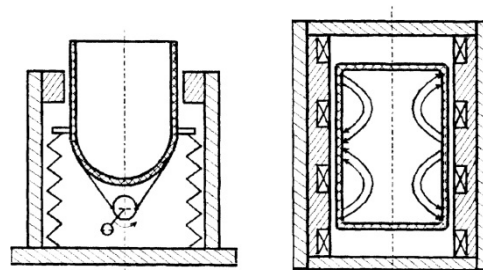


Рис. 8. Вибрационный станок для обработки немагнитных материалов

Известно, что дополнительные колебания, сообщаемые как детали, так и рабочей среде, носят позитивный характер, однако на наш взгляд, более рационально сообщать колебания, создаваемые электромагнитами, рабочей среде, при такой схеме обработки меньше ограничений в первую очередь по направлению таких колебаний.

К общим достоинствам метода следует отнести легкость регулировки как частоты, так и колебаний, создаваемых электромагнитами. К недостаткам метода, как и к большинству комбинированных методов вибрационной обработки, можно отнести усложнение конструкции.

Подводя итоги проведенного исследования необходимо отметить, что применение классических технологий вибрационной обработки практически не встречается в реальном производстве. Для достижения максимальных показателей качества применяются комбинированные методы обработки.

Выводы. Проведенные исследования позволили сформулировать требования к синтезу новых технологических комплексов вибрационной обработки деталей. На этапе создания технологических комплексов вибрационной обработки необходимо учитывать возможность применения химических, электрохимических и электрофизических методов. Технологические комплексы должны обладать характеристиками, удовлетворяющими всем нормам безопасности при использовании данных методов, меры электрической безопасности должны быть усилены. Необходимо обеспечить износостойкость рабочего органа – контейнера, как основного узла подверженного воздействию агрессивной химической среды и электрических импульсов. Применение химических, электрохимических и электрофизических методов позволяет значительно повысить производительность процесса вибрационной обработки деталей, не зависимо от их геометрических параметров, однако следует учитывать характеристики материала обрабатываемых деталей, его реакцию на применение данных методов.

Л и т е р а т у р а

- Объемная вибрационная обработка / И.Е. Бурштейн, В.В. Балицкий, А.Ф. Духовский, М.Я. Дубова, Л.Ш. Гительман, А.М. Стессель, А.Н. Тощий / Под ред. И.Е. Бурштейна. – М.: ЭНИМС, 1977. – 108 с.
- Бабичев А.П. Физико-технологические основы методов обработки. / А.П. Бабичев. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2006. – 410 с.
- Гончаревич И.Ф. Теория вибрационной техники и технологии / И.Ф. Гончаревич, К.В. Фролов. – М.: Наука, 1981. – 320 с.
- Шаинский М.Е. Исследование декоративного шлифования и полирования стальных деталей в вибрирующих резервуарах: дис. канд. техн. наук: 05.02.08 / Шаинский Михаил Ефимович. – Львов, 1967. – 171 с.
- Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2008. – 694 с.
- Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах: моногр. / И.Н. Карташов, М.Е. Шаинский, В.А. Власов и др. – К.: Вища школа, 1975. – 188 с.
- 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 и др.; под ред. А.П. Бабичева. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2010. – 289 с.
- Бабичев А.П. Вибрационная обработка деталей. – М.: Машиностроение, 1974. – 136 с.
- Санков Н.Н., Зибенберг А.Н. Механизация и автоматизация абразивной обработки отливок. – М.: Машиностроение, 1972. – 208 с.
- Венцкевич Г.Ж. Влияние некоторых параметров абразивного наполнителя на эффективность процесса шлифования в вибрирующих резервуарах: дис. канд. техн. наук. – Одесса, 1986. – 175 с.
- Мицык В.Я. Интенсификация обработки деталей в вибрирующих резервуарах встречно движущимися потоками рабочей среды: дис. канд. техн. наук. – Ворошиловград, 1986. – 246 с.
- А.с. 484973 СССР, МКИ В 24 В 31/06. Способ обработки деталей / П.Д. Денисов, В.И. Кармалюк, Н.Ф. Брайлян, В.М. Кунин – № 2028309/25-8; заявл 28.05.74; опубл. 25.09.75, Бюл. № 35. – 2 с.
- А.с. 1085783 СССР, МКИ В 24 В 31/06. Устройство для вибрационной обработки деталей / В.С. Сердюк, Е.В. Матюхин, Ю.П. Анкудимов – № 3515683/25-08; заявл 26.11.82; опубл. 15.04.84, Бюл. № 14. – 3 с.
- Тамаркин М.А. Интенсификация ударно-волновых явлений вибрационной обработки в результате наложения ультра-звукового воздействия [Текст] / М.А. Тамаркин, И.Л. Вяликов, В.С. Минаков // Механика ударно-волновых процессов в технологических системах. Сборник научных трудов международной технической конференции. – 2012. – С. 16-21.
- Ясуник С.Н. Повышение эффективности процесса обработки деталей в вибрирующих контейнерах: дис. канд. тех. наук: 05.03.01 / Ясуник Светлана Николаевна. – Луганск, 2003. – 215 с.
- Кроль О.С., Шумакова Т.О., Соколов В.И. Проекування зуборізних інструментів за допомогою системи КОПІАС. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля. – 2013. – 142 с.
- Кроль О.С., Шевченко С.В., Соколов В.И. Проекування металорізальних верстатів у середовищі АРМ WinMachine. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля. – 2011. – 388 с.
- Соколов В.И., Кроль О.С., Єпіфанова О.В. Гідравліка. – Северодонецк: СНУ ім. В. Даля. – 2017. – 160 с.

R e f e r e n c e s

- Burshtejn, I. E., Balickij, V. V., Duhovskij, A. F., Dubova, M. Ja., Gitel'man, L. Sh., Stessel', A. M., Tockij, A. N. (1977), Objennajavibracionnajaobrabotka [Volume vibration treatment], JeNIMS, Moscow, Russia.
- Babichev, A. P. (2006), Fiziko-tehnologicheskiesosnovymetodovobrabotki [Physical and technological basis of processing methods], Feniks, Rostov-on-Don, Russia.
- Goncharevich, I. F., Frolov, K. V. (1981), Teorijavibracionnojtehnikiitehnologii [Theory of Vibration technic and technologies], Nauka, Moscow, Russia.
- Shainskij, M. E. (1967), Issledovaniedekorativnogoshlifovanijaiopolirovanijastal'nyh detalejvvibrirujushhihrezervuarah: dis. ...kand. tehn. nauk: 05.02.08 [Research of decorative grinding and polishing of steel parts in vibrating containers], Lviv, Ukraine.
- Babichev, A.P. and Babichev, I.A. (1999), Osnovyvibracionnojtehnologii [Fundamentals of vibration technology], Rostov-on-Don, Russia.
- Kartashov, I. N., Shainskij, M. E. and Vlasov, V. A. (1975), Obrabotkadetalejsvobodnymiabrazivamivvibrirujushhih rezervuarah [Freeabrasivestreatmentofdetailsinvibratingcontainers], Vysshaja shkola, Kiev, Ukraine.
- Babichev, A. P. (2010), Primenenievibracionnyhtehnologijinaoperacijahotdelochno-zachistnoj obrabotki detalej (ochistka, мойка, udalenieoblojaizausencev, obrabotkakromok) [Use of vibration technology on finishing and stripping operations (cleaning, deflashing and deburring, edge treatment)], DGTU, Rostov-on-Don, Russia.
- Babichev, A. P. (1974), Vibracionnaja obrabotkadetalej [Vibration treatment of details], Mashinostroenie, Moscow, Russia.
- Sankov, N. N., Zibenberg, A. N. (1972), Mehanizacijaiavtomatizacijaabrazivnoj obrabotki otlivok [Mechanization and automation of abrasive treatment of castings], Mashinostroenie, Moscow, Russia.
- Venckevich, G. Zh. (1986), Vlijanienekotoryh parametrovabrazivnogonapolniteljanafektivnost' processashlifovanijavvibrirujushhihrezervuarah: dis... kand. tehn. nauk [Influence of some parameters of abrasive filler on the efficiency of grinding process in vibrating tanks], Odessa, Ukraine.
- Micyk, V. Ja. (1986), Intensifikacijao brabotki detalejvvibrirujushhihrezervuarahvstrechnodvizhushhimisjapotokami rabochejsredy: Dis.... kand. tehn. nauk [Intensification of detail treatment processing in vibrating tanks by counter-moving flows of working medium], Vorosilovgrad, Ukraine.
- Denisov, P. D., Karmaljuk, V. I., Brajljan N. F., Kunin, V.M. "Method of details treatment", A.s. 484973 SSSR, zajavl. 28.05.74; opubl. 25.09.75, Bjul. № 35.

13. Serdjuk, V. S., Matjuhin, E. V., Ankudimov, Ju. P. "Device for vibration treatment of details.", A.s. 1085783 SSSR, zjavl. 26.11.82; opubl. 15.04.84, Bjul. № 14.
14. Tamarkin, M. A., Vjalikov, I. L., Minakov, V. S. (2012), "Intensification of shock-wave phenomena of vibration treatment as a result of superposition of ultra-sound effect", *Mehanika durno-volnovykh processov v tehnologicheskikh sistemah*. Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoy tekhnicheskoy konferencii [Mechanics of shock-wave processes in technological systems. Collection of scientific papers of the international technical conference], pp. 16-21.
15. Jasunik, S. N. (2003), *Povyshenie effektivnosti processa obrabotki detalей v vibriruyushhih konteynerah: dis. ... kand. teh. nauk: 05.03.01* [Increasing of the treatment efficiency of details in vibrating containers], Lugansk, Ukraine.
16. Krol O., Shumakova T., Sokolov V. Design metal cutting instruments by dint of system of KOMPAS. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2013.
17. Krol O., Shevchenko S.V., Sokolov V. Design machine tools in environment APM WinMachine. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2011.
18. Sokolov V., Krol O., Yepifanova O. Hydraulics. V. Dahl EUNU, Severodonetsk, 2017.

Романченко О.В., Ніколаєнко А.П., Таванюк Т.Я., Шумакова Т.О. Огляд пристроїв для допоміжних операцій вібраційної обробки.

В роботі проведено аналіз хімічних, електрохімічних та електрофізичних методів інтенсифікації процесу вібраційної обробки деталей. Розглянуто функціональні і конструктивні особливості верстатів з застосуванням даних методів. Вказані переваги і недоліки представлених верстатів. На основі проведених досліджень встановлено основні фактори, що впливають на створення нових і модернізацію відомих вібраційних верстатів при застосуванні хімічних, електрохімічних та електрофізичних методів.

Ключові слова: вібраційна обробка, хімічний метод, електрохімічний метод, електрофізичний метод, технологічний комплекс.

Romanchenko A.V., Nikolaenko A.P., Tavanyuk T.Y., Shumakova T.A. Application of chemical, electrochemical and electrophysical methods in process of vibration treatment of details.

The analysis of chemical, electrochemical and electrophysical methods as intensification of process of vibration treatment of details has been done in the article. Functional and structural features of machine tools with application of these methods have been considered. The advantages and disadvantages of presented machines are indicated. Based on researches, the main factors influencing on the creation of new and modernization of known vibrating machine tools with application of chemical, electrochemical and electrophysical methods have been established.

Key words: vibration treatment, chemical method, electrochemical method, electrophysical method, technological complex.

Романченко Олексій Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк). alexvromanchenko@gmail.ru

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

Таванюк Тетяна Яківна – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк). ttavanyuk@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

Рецензент: д.т.н., проф. **Соколов В.І.**

Стаття подана 15.10.2017

УДК 621.646: 62-83

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИМ ОБЛАДНАННЯМ З ГІДРОПРИВОДОМ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ****Соколов В.І., Степанова О.Г., Степчук Я.І., Кавун Д.Ю., Ткаченко М.К.****DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF
TECHNOLOGICAL EQUIPMENT WITH ROTARY MOTION HYDRAULIC DRIVE****Sokolov V.I., Stepanova O.G., Stepchuk Ya.I., Kavun D.Yu., Tkachenko M.K.**

Розглянуті питання автоматизації процесів керування технологічним обладнанням з гідروприводом обертального руху. Метою роботи є розробка та дослідження системи автоматичного керування (САК) обладнанням, що враховує стохастичне збурення та шум спостереження.

Запропоновано математичну модель технологічного обладнання з гідроприводом обертального руху як об'єкту автоматичного керування. Математичний опис представляє собою сукупність лінійних динамічних ланок, що мають характерні параметри, а саме: постійна часу процесу регулювання робочого об'єму насоса; постійна часу силової частини приводу; коефіцієнт передачі для кута нахилу шайби (блоку циліндрів) по керуючий напрузі; коефіцієнт передачі силової частини приводу; коефіцієнт передачі для кутової швидкості по навантажуючому моменту.

Розроблено САК обладнанням, що враховує шум спостереження та стохастичне збурення об'єкту керування. Рішення задачі стохастичної лінійної оптимальної системи при неповній інформації про стан відповідно до методу розподілу розбито на дві: задачу синтезу оптимального наглядача та детерміновану задачу синтезу оптимальної системи. Для синтезу оптимального лінійного регулятора використаний метод динамічного програмування.

Проведені дослідження динамічних характеристик САК. Показано, що в діапазоні можливих параметрів збурювання наглядач Калмана-Бьюси виконує функцію оптимальної фільтрації, зменшує тривалість перехідного процесу та забезпечує необхідну якість керування обладнанням. Виконані розрахунки перехідних процесів для кутового переміщення та кутової швидкості при різних значеннях коефіцієнту передачі блоку регулювання робочого об'єму насоса та коефіцієнту передачі регулятора, надані рекомендації щодо вибору оптимальних значень коефіцієнтів передач з урахуванням особливостей технологічного призначення обладнання.

Результати досліджень можуть бути використані для удосконалення технологічного обладнання, зокрема, для розширення його функціональних можливостей та поліпшення динамічних характеристик.

Ключові слова: технологічне обладнання, гідропривід, математична модель, передавальна функція, стохастичне збурення, система автоматичного керування.

Постановка проблеми.

Сучасні технології машинобудування та матеріалообробки пред'являють всезростаючі вимоги до технічних та функціональних характеристик технологічного обладнання для механічної обробки матеріалів (металорізальні верстати та системи, обладнання інструментального виробництва, машини для обробки тиском тощо). Важлива увага приділяється показникам енергетичної ефективності, зокрема, коефіцієнту корисної дії та показникам якості динамічних характеристик. Слід відзначити, що підвищення енергетичної ефективності зменшує собівартість продукції, а поліпшення динамічних характеристик підвищує надійність та довговічність обладнання, а також рівень охорони праці на виробництві.

Якість виробів при матеріалообробці багато в чому залежить від можливості реалізації оптимальних законів руху інструменту та деталей, що оброблюються, точності регулювання їх переміщень, підтримки заданих швидкостей в умовах змінного та стохастичного навантаження. Виконання функціональних вимог до обладнання, досягнення довірливої кінематики робочих органів, можливість програмної реалізації оптимальних законів руху забезпечується застосуванням автоматичних гідроприводів, зокрема, гідроприводів з обертальним рухом [1-3].

Розширення функціональних можливостей та поліпшення динамічних характеристик технологічного обладнання з гідроприводом обертального руху може бути досягнуто розробкою та застосуванням систем автоматичного керування (САК). Аналіз рівня автоматизації сучасного технологічного обладнання для механічної обробки показав, що існуючі системи використовують спрощені математичні моделі робочих процесів, не враховують стохастичне збурення та шум спостереження, в наслідок чого відсутні можливості подальшого його удосконалення [3-6]. Тому, для

розробки та дослідження САК потребують розвитку математичні моделі робочих процесів, які протікають в приводах та враховують особливості технологічного призначення обладнання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

При математичному моделюванні динамічних характеристик технологічного обладнання з гідравлічним приводом виникають певні труднощі з описом робочих процесів [4, 5, 7-9], що протікають в них. Крім дослідження процесів, обумовлених функціональним призначенням обладнання, слід прийняти до уваги, що в гідроприводі мають місце коливання тисків, витрат, окремих деталей внаслідок стисливості рідини, впливу робочого середовища на регулюючі пристрої, втечі по зазорам та інших причин. Поєднання цих явищ приводить до складних гідромеханічних процесів, які необхідно враховувати при проектуванні технологічного обладнання з об'ємним гідроприводом [1, 10-12].

Разом з тим, розширення функціональних можливостей та поліпшення динамічних характеристик технологічного обладнання з гідроприводом обертального руху за рахунок розробки та використання САК потребує нескладних достовірних математичних моделей робочих процесів, що протікають в приводах та достатньо повно враховують особливості технологічного призначення обладнання.

У більшості літературних джерел для моделювання динамічних характеристик технологічного обладнання розглядаються детерміновані системи [13-16]. Але робота технологічного обладнання, зокрема обладнання для механічної обробки, здійснюється в умовах впливів на систему, закон зміни яких, в загальному випадку, носить стохастичний характер [17, 18]. При випадкових впливах даних про стан системи в попередній час t_0 недостатньо для того, щоб скільки можливо повно було би судити про її стан в наступний момент часу $t > t_0$, тобто система є стохастичною.

Стохастичні збурення можуть прикладатися к системі зовні (зовнішні впливи) або виникати всередині деяких її елементів. Випадкові виміри властивостей системи зазвичай можна звести до еквівалентного впливу деяких випадкових перешкод, що впливають на неї, тому в подальшому будемо вважати, що на систему діє тільки зовнішні стохастичні збурення.

Розрахунок САК при випадкових впливах проводять за допомогою спеціальних статистичних методів, до розгляду вводять певні кількісні оцінки стохастичних збурень – статистичні характеристики випадкових впливів, які характеризують стохастичні збурення та при цьому не являються випадковими залежностями. САК, яка спроектована на основі таких методів, буде задовольняти вимогам, що пред'являються до неї, не для одного детермінованого впливу, а для цілої сукупності

впливів, які задані за допомогою статистичних характеристик [19, 20].

Разом з тим, в літературі не достатньо повно викладені питання синтезу САК технологічним обладнанням з гідроприводом обертального руху, що враховує стохастичне збурення та шум спостереження. Крім того, для подальшого дослідження будемо розглядати гідропривід обертального руху з об'ємним регулюванням швидкості вихідної ланки. Перевага даному способу регулювання швидкості надана як такому, що має більшу енергетичну ефективність [2, 3].

Мета і завдання дослідження.

Метою даної роботи є синтез та дослідження САК технологічним обладнанням з гідроприводом обертального руху, що враховує стохастичне збурення та шум спостереження.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- побудувати математичну модель робочих процесів в технологічному обладнанні з гідроприводом обертального руху;
- вирішити задачу стохастичної лінійної оптимальної системи при неповній інформації про стан;
- провести дослідження САК.

Методологічну основу проведених авторами досліджень складає системний підхід до моделювання характеристик робочих процесів в технологічному обладнанні з об'ємним гідравлічним приводом. В основі математичних моделей лежать класичні рівняння механіки, у ряді випадків застосовано наближені формули, що являється цілком припустимим при моделюванні таких складних об'єктів, якими є технологічне обладнання для механічної обробки. Для розробки та дослідження САК використано апарат математичного моделювання за допомогою диференціальних рівнянь і чисельних методів їх розв'язання, теорії автоматичного керування, а також методи теорії ймовірності і математичної статистики, методи експериментальних досліджень (при перевірці адекватності розроблених математичних моделей на лабораторних установках).

Матеріали та результати дослідження.

Силову частину гідроприводу обертального руху технологічного обладнання приведено на рис. 1. Відзначимо, що в загальному випадку гідравлічна схема може бути з розімкнутою та замкнутою циркуляцією робочої рідини. Враховуючи, що схема з розімкнутою циркуляцією є окремим випадком замкнутої, яка з точці зору математичного опису є більш складніша, тому розглянута остання. В схемі позначені: Ω_n – кутова швидкість вала насоса; γ – кут нахилу шайби (блока циліндрів) аксіально-поршневого насоса; t – час; Ω – кутова швидкість валу гідромотора; α – кут повороту валу гідромотора; Q_n , Q_m – ідеальні витрати насоса та гідромотора; Q_{nn} , Q_{nm} – витрати перетоків в насосі та

гідромоторі; Q_{yn1} , Q_{yn2} , Q_{ym1} , Q_{ym2} – витрати виток в лініях насоса та гідромотора; Q_{nn1} , Q_{nn2} – витрати підживлення скрізь підживлючі клапани; p_1 , p_2 – тиски в трубопроводах високого та низького тисків; p_{nn} – тиск в магістралі перед підживлючими клапанами.

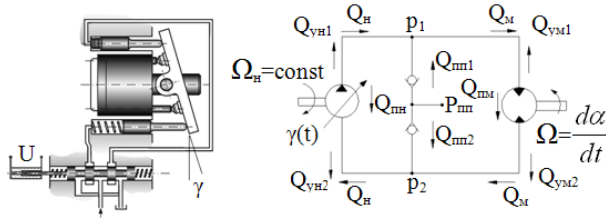


Рис. 1. Розрахункова схемадо побудови математичної моделі

Прийmemo наступні допущення:

1. Електродвигун обертає вал насоса з кутовою швидкістю Ω_n , величина якої не залежить від потужності, що розвиває насос.

2. При роботі гідроприводу тиски в трубопроводах не досягають значень, при яких відкриваються запобіжні клапани.

3. Тиск в магістралі p_{nn} перед підживлючими клапанами підтримується постійним.

4. Зусилля, що долаються гідромотором при керуванні об'єктом, можуть бути представлені сумою навантажуючого моменту та моментів від дії робочого інерційного навантаження, яке приведено до валу гідромотора, позиційного навантаження та гідравлічного тертя.

5. Трубопроводи прийняті достатньо короткими, щоб можна було зневажити в них інерцію рідини та втрати тиску через опір тертя [21].

Математична модель силової частини гідроприводу обертального руху обладнання для механічної обробки матеріалів включає наступні рівняння та залежності:

$$Q_m = \frac{q_m}{2\pi} \Omega;$$

$$Q_n = \frac{q_n}{2\pi} \Omega_n;$$

$$q_n = F_n z_n D_n \operatorname{tg} \gamma;$$

$$Q_m + Q_{nn} + Q_{nm} + Q_{ym1} + Q_{ym2} + Q_{сж1} - Q_{nn1} - Q_n = 0;$$

$$Q_m + Q_{nn} + Q_{nm} - Q_{yn2} - Q_{ym2} - Q_{сж2} + Q_{nn2} - Q_n = 0;$$

$$Q_{nn} = Q_{nm} = Q_{пер}; Q_{yn1} = Q_{ym1} = Q_{ym1}; Q_{yn2} = Q_{ym2} = Q_{ym2};$$

$$Q_{пер} = k_{пер} (p_1 - p_2); Q_{ym1} = k_{ym1} p_1; Q_{ym2} = k_{ym2} p_2;$$

$$M_m = \frac{q_m}{2\pi} (p_1 - p_2);$$

$$M_{ноз} = k_{ноз} \alpha;$$

$$M_{mp} = k_{mp} \frac{d\alpha}{dt};$$

$$Q_{сж1} = \frac{W_0}{E_{сж}} \frac{dp_1}{dt}; Q_{сж2} = \frac{W_0}{E_{сж}} \frac{dp_2}{dt};$$

$$M_m - M_{mp} - M_{ноз} - M = J \frac{d\Omega}{dt};$$

$$\Omega = \frac{d\alpha}{dt};$$

де $Q_{сж1}$, $Q_{сж2}$ – складові витрати, які пов'язані з компенсацією стисливості рідини (витрати стискування); $k_{кл}$ – провідність підживлюючого клапана; q_m – робочий об'єм гідромотора; q_n – робочий об'єм насоса; F_n – робоча площа одного поршня (плунжера) насоса; z_n – кількість поршнів; D_n – діаметр кола, на якому розташовані вісі поршнів насоса; $k_{пер}$ – провідність щілин, по яким в насосі та гідромоторі здійснюються перетоки рідини з порожнин з високим тиском в порожнини з низьким тиском; k_{ym} – провідність щілин, по яким здійснюється виток рідини з насоса та гідромотора; J – момент інерції частин, що обертаються з валом гідромотора (приведений момент інерції навантаження та ротора мотора); W_0 – внутрішній об'єм трубопроводів з підключеними до нього об'ємами порожнин насоса та гідромотора; M_{mp} – момент від сил тертя; $M_{ноз}$ – момент від дії позиційного навантаження; M_m – крутний момент; $k_{ноз}$ – коефіцієнт жорсткості позиційного навантаження; $k_{mp} = k_{mp1} + k_{mp2}$; k_{mp1} – коефіцієнт моменту від сил тертя в гідромоторі; k_{mp2} – коефіцієнт моменту від сил тертя в виконавчому механізмі.

На основі дослідження робочих характеристик технологічного обладнання для механічної обробки матеріалів з гідроприводом обертального руху, аналізу параметрів математичної моделі та прийнятих на підставі цього допущень побудовано математичну модель обладнання як об'єкту автоматичного керування, що покладена в основу САК. Структурна схема моделі приведена на рис. 2, де позначені наступні параметри: T_{np} – постійна часу процесу регулювання робочого об'єму насоса; $T_{сн}$ – постійна часу силової частини приводу; $k_{\gamma U}$ – коефіцієнт передачі для кута нахилу шайби (блоку циліндрів) по керуючий напрузі; $k_{\Omega \gamma}$ – коефіцієнт передачі силової частини приводу; $k_{\Omega M}$ – коефіцієнт передачі для кутової швидкості по навантажуючому моменту.

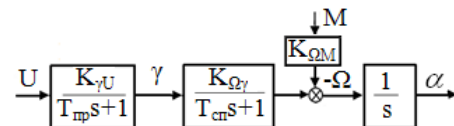


Рис. 2. Структурна схема математичної моделі як об'єкту автоматичного керування

Перевірка адекватності математичних моделей виконувалася на експериментальному стенді за критерієм Фішера. Теоретична залежність покладалась адекватної дослідній, якщо отримане експериментальне значення критерію Фішера менш табличного. В роботі адекватність визначалась порівнянням дослідних та розрахункових характеристик гідроприводу, осцилограм

перехідного процесу для блока регулювання насоса та привода в цілому. Моделі не корегувалися по експериментальним даним, число точок порівняння було не менш 20. Для цих умов табличне значення критерію Фішера рівно $\approx 1,8$ при довірчій імовірності $\alpha=0,95$. Експериментальні значення критерію Фішера (не більш 1,3) не перевершували табличних значень. Тому розроблені моделі характеристик привода було прийнято вважати адекватними.

Блок-схема САК технологічним обладнанням, що запропонована, приведена на рис. 3.

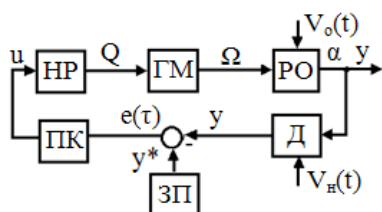


Рис. 3. Блок-схема САК технологічним обладнанням:

РО – робочий орган; Д – датчик вихідного сигналу; y – вихідна змінна; ЗП – задаючий пристрій; y^* – задана вихідна змінна; ГМ – гідромотор; Ω – кутова швидкість валу гідромотора; α – кут повороту робочого органу; Q – витрата, що надходить до гідромотору; НР – насос з робочим об'ємом, що регулюється; ПК – пристрій керування; $e(\tau)$ – сигнал розузгодження;

$V_o(t)$ – стохастична збурююча дія; $V_n(t)$ – шум спостереження; u – керуючий сигнал

Слід відзначити, що в загальному випадку у якості вихідної змінної y розглядається кут повороту α робочого органу (РО), що зв'язаний з гідромотором (ГМ). На практиці дуже часто керується кутова швидкість Ω валу ГМ, але це окремий випадок керування кутом повороту α , що є більш складнішою задачею, яка і вирішується в роботі.

У відповідності до заданого закону керування кутом повороту y^* РО технологічного обладнання, який формується ЗП, на вхід ГМ надходить витрата робочої рідини Q . При цьому здійснюється обертальний рух валу ГМ з кутовою швидкістю Ω та РО, що жорстко з ним зв'язаний. Відбувається поворот РО, який вимірюється датчиком кута повороту Д. Формується сигнал розузгодження $e(\tau)$ як різниця між заданим кутом повороту РО y^* та дійсним y . По сигналу розузгодження $e(\tau)$ ПК створює керуючий сигнал u у вигляді напруги, який надходить до НР, де регулює кут нахилу шайби (блока циліндрів) та відповідно робочий об'єм аксіально-поршневого насоса, який змінює витрату Q , що надходить до ГМ. Так як на технологічний процес робить вплив стохастична збурююча дія $V_o(t)$, а вимір кута повороту РО супроводжується перешкодами – шумом спостереження $V_n(t)$, то розглянута задача оптимального керування при неповній інформації про стан системи.

У просторі станів рівняння об'єкту керування були приставлені в матричній формі

$$\dot{x} = Ax + Bu + V_o(t); y = Cx + V_n(t);$$

де x – фазовий вектор змінних стану об'єкту автоматичного керування, u – керуючий вплив, y – вихідна змінна, A – матриця параметрів об'єкту керування, B – матриця вхідних параметрів, C – матриця вихідних параметрів, $V_o(t)$ – кольоровий шум об'єкту, $V_n(t)$ – білий шум спостереження;

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1/T_{np}T_{cn} & -(T_{np} + T_{cn})/T_{np}T_{cn} \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_{\gamma U} k_{\Omega I} / T_{np} T_{cn} \end{bmatrix};$$

$$C = [1 \ 0 \ 0].$$

Для формування кольорового шуму об'єкту розглянутий формуючий фільтр з передавальною функцією

$$W_{\phi}(s) = \frac{b_0^* s + b_1^*}{a_0^* s^2 + a_1^* s + a_2^*},$$

на вхід якого подавався стаціонарний стохастичний сигнал $V(t)$ типу білий шум зі спектральною щільністю $S_V(\omega) = L_V$.

Критерій оптимальності управління розглядався у виді

$$J = \int_0^{t_f} (\bar{Q}x^2(t) + \bar{R}u^2(t))dt \rightarrow \min,$$

де $\bar{Q}$ – позитивно-визначена матриця, що характеризує якість керування; $\bar{R}$ – величина обмеження керуючої дії.

У зв'язку з тим, що стохастична збурююча дія, що прикладена до об'єкту керування, проявляє себе незалежно від керуючого сигналу, то синтез САК технологічним обладнанням з гідроприводом обертального руху виконано з урахуванням адитивної перешкоди. Таким чином, рішення задачі стохастичної лінійної оптимальної системи при неповній інформації про стан відповідно до методу розподілу розбито на дві: задачу синтезу оптимального наглядача та детерміновану задачу синтезу оптимальної системи.

Відповідно до поставленої задачі необхідно було з використанням вимірюного значення вихідної змінної на інтервалі $[t_0, t]$ знайти незміщену оцінку $\hat{x}(t)$, що забезпечує мінімум середнього квадрату похибки,

$$J = M[(x(t) - \hat{x}(t))^T \cdot (x(t) - \hat{x}(t))] \rightarrow \min.$$

Оптимальні значення незміщеної лінійної оцінки фазового вектору $\hat{x}(t)$ та коефіцієнтів K' підсилення фільтра Калмана-Бьюси знаходились відповідно до рівнянь

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x} + Bu + K'(y - C\hat{x}), \quad \hat{x}(t_0) = \bar{x}^0;$$

$$K' = PC^T R_0^{-1};$$

$$\dot{P} = AP + PA^T - PC^T R_0^{-1} CP + Q_0, \quad P(t_0) = P_0;$$

де R_0 – матриця інтенсивності шуму спостереження; Q_0 – матриця інтенсивності шуму об'єкту; P – дисперсійна матриця похибки.

Синтез наглядча Калмана-Бьюси виконано з використанням пакету прикладних програм *Matlab*. Для синтезу оптимального лінійного регулятора відповідно поставленій задачі використаний метод динамічного програмування. Функціональне рівняння Беллмана розглядалося у вигляді

$$\tilde{Q}x^2(t) + \tilde{R}u^2(t) + \frac{\partial S(x,t)}{\partial x} (Ax(t) + Bu(t)) + \frac{\partial S(x,t)}{\partial t} = 0,$$

$$2\tilde{R}u(t) + \frac{\partial S(x,t)}{\partial x} B = 0.$$

Звідси прийнято вираз для оптимального керування

$$u = -\frac{1}{2} \tilde{R}^{-1} B^T \left(\frac{\partial S}{\partial x} \right)^T.$$

З врахуванням позитивної визначеності функції Беллмана $S(x,t)$ для оптимального керування

$$u = -(K_1^* x_1 + K_2^* x_2 + K_3^* x_3),$$

де x_1, x_2, x_3 – фазові змінні; K_1^*, K_2^*, K_3^* – коефіцієнти підсилення зворотного зв'язку лінійного оптимального регулятора.

Структурна схема моделі оптимальної системи автоматичного керування наведена на рис. 4.

Перехідні процеси в стохастичній замкнутій САК технологічним обладнанням без використання та з використанням фільтра Калмана-Бьюси представлені на рис. 5. Збурюючий вплив на об'єкт керування розглядався у вигляді білого шуму з спектральною щільністю $S_v(\omega)=1$ та $W_\phi(s)=0,02$. Дослідження показали, що в діапазоні можливих параметрів збурювання фільтр виконує функцію оптимальної фільтрації, забезпечує необхідну якість управління обладнанням та істотно зменшує тривалість перехідного процесу.

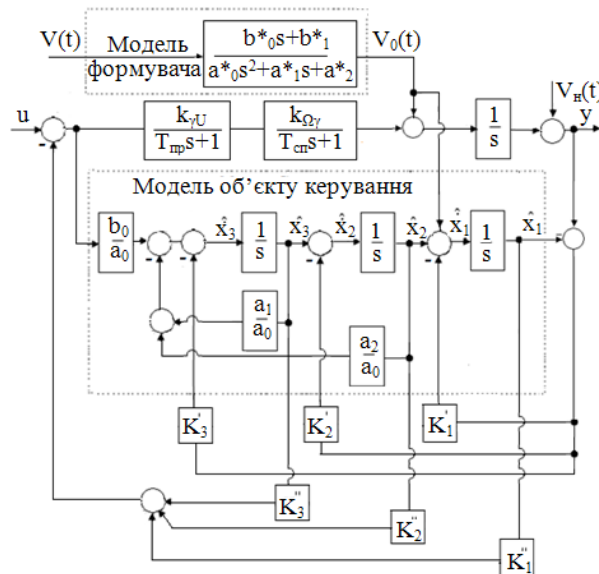


Рис. 4. Структурна схема САУ

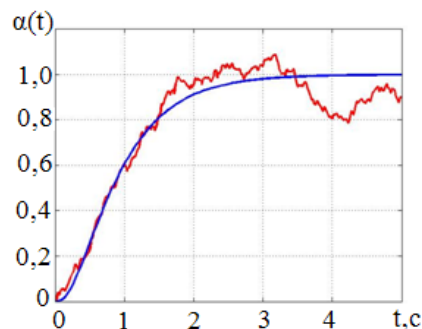


Рис. 5. Перехідні процеси в стохастичній замкнутій системі без використання та з використанням фільтра Калмана-Бьюси

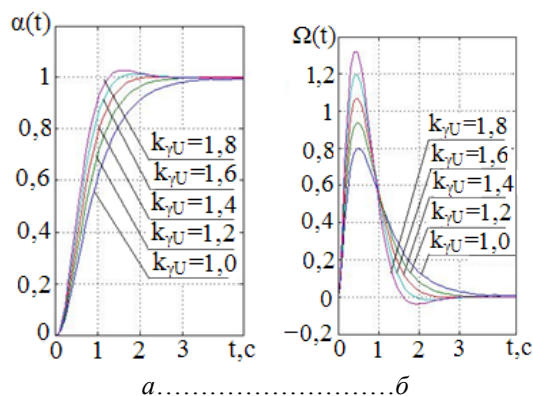


Рис. 6. Вплив на перехідний процес коефіцієнту передачі $k_{\gamma U}$ блоку регулювання робочого об'єму насоса: а – кутове переміщення; б – кутова швидкість

Виконано дослідження САК, зокрема, вплив параметрів об'єкту керування та оптимального регулятора на якість перехідного процесу. Перехідні процеси при різних значеннях коефіцієнту передачі $k_{\gamma U}$ блоку регулювання робочого об'єму насоса приведені на рис. 6, а при різних значеннях коефіцієнту передачі K_2^* регулятора на рис. 7.

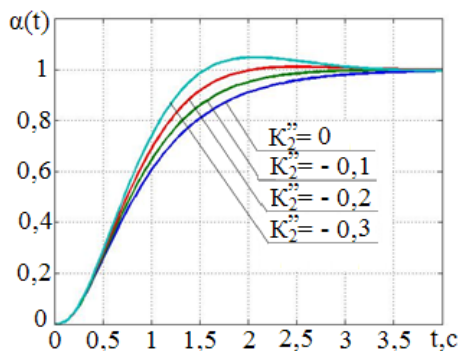


Рис. 7. Вплив на перехідний процес коефіцієнту передачі K_2^* регулятора

Слід зауважити, що при виборі оптимальних значень коефіцієнтів передач необхідно враховувати, що у ряді випадків особливості технологічного призначення обладнання виключають перерегулювання кутового переміщення (або зміни знаку кутової швидкості) робочого органу. Так, для результатів досліджень, що приведені на рис. 6, 7, рекомендовані значення коефіцієнтів передач не будуть відповідати оптимальної швидкодії, а повинні бути обмеженими нерівностями $k_{\gamma U} < 1,4$ та $K_2^* > -1,14$.

Висновки.

1. Запропоновано математичну модель технологічного обладнання з гідроприводом обертального руху як об'єкту автоматичного керування. Математичний опис представляє собою сукупність лінійних динамічних ланок, що мають характерні параметри, а саме: постійна часу процесу регулювання робочого об'єму насоса; постійна часу силової частини приводу; коефіцієнт передачі для кута нахилу шайби (блоку циліндрів) по керуючий напрузі; коефіцієнт передачі силової частини приводу; коефіцієнт передачі для кутової швидкості по навантажуючому моменту. Такий підхід дозволяє врахувати основні динамічні властивості обладнання та вирішити задачу оптимального керування.

2. Розроблено САК обладнанням, що враховує шум спостереження та стохастичне збурення об'єкту керування. Рішення задачі стохастичної лінійної оптимальної системи при неповній інформації про стан відповідно до методу розподілу розбито на дві: задачу синтезу оптимального наглядача та детерміновану задачу синтезу оптимальної системи. Для синтезу оптимального лінійного регулятора використаний метод динамічного програмування. САК дозволяє розширити функціональні можливості та поліпшити динамічні характеристики обладнання.

3. Проведені дослідження динамічних характеристик САК. Показано, що в діапазоні можливих параметрів збурювання наглядач Калмана-Бьюси виконує функцію оптимальної фільтрації, зменшує тривалість перехідного процесу та забезпечує необхідну якість керування обладнанням. Виконані розрахунки перехідних

процесів для кутового переміщення та кутової швидкості при різних значеннях коефіцієнту передачі блоку регулювання робочого об'єму насоса та коефіцієнту передачі регулятора. Результати досліджень дозволили надати рекомендації щодо вибору оптимальних значень коефіцієнтів передач з урахуванням особливостей технологічного призначення обладнання.

Литература

1. Навроцкий К.Л. Теория и проектирование гидро- и пневмоприводов. – М.: Машиностроение, 1991. – 384 с.
2. Гидроприводы и гидропневмоавтоматика станков/ В.А. Федорец, М.Н. Педченко, А.Ф. Пичко, Ю.В. Пересадыко, В.С. Лысенко; Под ред. В.А. Федорца. – К.: Вища шк., 1987. – 375 с.
3. Свешников В.К. Станочные гидроприводы: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. / В.К. Свешников, А.А. Усов. – М.: Машиностроение, 1988. – 512 с.
4. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. – М.: Машиностроение, 1987. – 464 с.
5. Попов Д.Н. Нестационарные гидромеханические процессы. – М.: Машиностроение, 1982. – 240 с.
6. Попов Д. Н. Механика гидро- и пневмоприводов: Учеб. для вузов. 2-е изд. / Д.Н. Попов. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 320 с.
7. Соколов В.И., Таванюк Т.Я., Соколова Я.В. Нестационарное трение в гидросистемах станков // Вісн. СевНТУ. Серія «Машиноприладобудування та транспорт». – Севастополь: СевНТУ, 2010. - № 107. – С. 214 - 219.
8. Соколов В.И., Рассказова Ю.Б. Исследование течения жидкости в микрозазорах с граничным изменением вязкости // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. - 2016. - № 2 (226). – С. 20 - 25.
9. Sokolova Ya., Rasskazova Yu., Krol O., Sokolov V. Modeling of fluid flow in microgap considering the boundary change of dynamic viscosity // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 16. – N 2. – 2016. – Lublin - Rzeszow, Poland. - pp. 55 - 59.
10. Соколов В.И., Соколова Я.В., Таванюк Т.Я. Разработка методики расчёта и выбор основных параметров электрогидравлического следящего привода специального технологического оборудования // Вісн. СевНТУ. Серія «Машиноприладобудування та транспорт». – Севастополь: СевНТУ, 2012. - № 129. – С. 223-228.
11. Соколова Я. В., Таванюк Т.Я., Соколов В.И. Нелинейная математическая модель электрогидравлического следящего привода с дроссельным регулированием // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. - 2010. - № 10 (152). – С. 168 – 175.
12. Коваленко А. А., Соколов В.И., Уваров П.Е., Пазин В.В. Основы объемного гидравлического привода строительных и дорожных машин. - Луганск: ДонГАСА. – 1999. – 137 с.
13. 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.

14. Sokolova Ya., Krol O., Rasskazova Yu., Sokolov V. Mathematical modeling automatic electrohydraulic drive of machine building equipment // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 15. – N 2. – 2015. – Lublin - Rzeszow, Poland. – pp. 9-14.
15. Соколов В. И., Таванюк Т. Я. Определение передаточных функций электрогидравлического следящего привода оборудования для обработки давлением // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. – 2011. – № 1(155). – С. 208 - 216.
16. Sokolova Ya., Krol O., Tavanuk T., Sokolov V. Transfer function of the automatic electrohydraulic drive // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 15. – N 2. – 2015. – Lublin - Rzeszow, Poland. – pp. 3-8.
17. Sokolov V., Rasskazova Y. Automation of control processes of technological equipment with rotary hydraulic drive // Eastern-EuropeJournal of Enterprise Technologies. Volume 2, Issue 2, 2015, Pages 44-50.
18. Соколова Я.В., Азаренко Н.Г., Соколов В.И. Синтез системы автоматического управления оборудованием для механической обработки материалов с гидравлическим приводом // Восточно-европейский журнал передовых технологий. - Харьков. – 2014. – № 2/2 (68). – С. 56-60.
19. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: учебное пособие. – М.: Физматлит, 2004. – 464 с.
20. Соколов В.И., Рассказова Ю.Б. Автоматизація процесів керування технологічним обладнанням з гідроприводом обертального руху // Східно-европейський журнал передових технологій. - 2016. – № 2/2 (80). – С.44 - 50.
21. Соколов В.И., Кроль О.С., Єфіфанова О.В. Гідравліка. – Севе́родо́нецьк: СНУ ім. В. Даля. – 2017. – 160 с.
9. Sokolova Ya., Rasskazova Yu., Krol O., Sokolov V. Modeling of fluid flow in microgap considering the boundary change of dynamic viscosity // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 16. – N 2. – 2016. – Lublin - Rzeszow, Poland. – pp. 55 - 59.
10. Sokolov V.I., Sokolova Ya.V., Tavanyuk T.Ya. Razrabotkametodikiraschyotai vyborosnovnyih parametrov elektrogidravlicheskosledyaschegoprivodaspetsialnogot ehnologicheskogooborudovaniya // Visn. SevNTU. Seriya «Mashy`nopy`ladobuduvannya ta transport». – Sevastopol` : SevNTU, 2012. – № 129. – S. 223-228.
11. Sokolova Ya. V., Tavanyuk T.Ya., Sokolov V.I. Nelineynaya matematicheskaya model elektrogidravlicheskosgo sledyaschego privoda s drosselnym regulirovaniem // Visn. Shidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dallya. - 2010. - № 10 (152). – S. 168 – 175.
12. Kovalenko A. A., Sokolov V.I., Uvarov P.E., Pazin V.V. Osnovy ob`emnogo gidravlicheskosgo privoda stroitelnyih i dorozhnyih mashin. - Lugansk: DonGASA. – 1999. – 137 s.
13. 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.
14. Sokolova Ya., Krol O., Rasskazova Yu., Sokolov V. Mathematical modeling automatic electrohydraulic drive of machine building equipment // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 15. – N 2. – 2015. – Lublin - Rzeszow, Poland. – pp. 9-14.
15. Sokolov V. I., Tavanyuk T. Ya. Opredelenie peredatochnyih funktsiy elektrogidravlicheskosgo sledyaschego privoda oborudovaniya dlya obrabotki davleniem // Visn. Shidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dallya. – 2011. – № 1(155). – S. 208 - 216.
16. Sokolova Ya., Krol O., Tavanuk T., Sokolov V. Transfer function of the automatic electrohydraulic drive // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 15. – N 2. – 2015. – Lublin - Rzeszow, Poland. – pp. 3-8.
17. Sokolov V., Rasskazova Y. Automation of control processes of technological equipment with rotary hydraulic drive // Eastern-EuropeJournal of Enterprise Technologies. Volume 2, Issue 2, 2015, Pages 44-50.
18. Sokolova Ya.V., Azarenko N.G., Sokolov V.I. Sintez sistemyi avtomaticheskogo upravleniya oborudovaniem dlya mehanicheskoy obrabotki materialov s gidravlicheskim privodom // Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovyih tehnologiy. - Harkov. – 2014. – № 2/2 (68). – S. 56-60.
19. Kim D.P. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. T.2. Mnogomernyye, nelineynyye, optimalnyie i adaptivnyie sistemyi: uchebnoe posobie. – M.: Fizmatlit, 2004. – 464 s.
20. Sokolov V.I., Rasskazova Yu.B. Avtomaty`zaciya procesiv keruvannya tex-nologichny`m obladnannnyam z gidropri`vodom obertal`nogo ruxu // Sxidno-evropejs`ky`j zhurnal peredovy`x tehnologij. - 2016. – № 2/2 (80). – S.44 - 50.
21. Sokolov V.I., Krol` O.S., Yepifanova O.V. Gidravlika. – Syeverodonecz`k: SNU im. V. Dallya. – 2017. – 160 s.

References

1. Navrotsky K.L. Teoriya i proektirovanie gidro- i pnevmoprivodov. – M.: Mashinostroyeniye, 1991. – 384 s.
2. Hidroprivody i gidropnevmavtomatika stankov / V.A. Fedorets, M.N. Pedchenko, A.F. Pichko, Yu.V. Peresadko, V.S. Lyisenko; Pod red. V.A. Fedorts. – K.: Vischa shk., 1987. – 375 s.
3. Svishnikov V.K. Stanochnyie gidroprivody: Spravochnik. – 2-e izd., pererab. i dop. / V.K. Svishnikov, A.A. Usov. – M.: Mashinostroyeniye, 1988. – 512 s.
4. Popov D.N. Dinamika i regulirovanie gidro- i pnevmosistem. – M.: Mashinostroyeniye, 1987. – 464 s.
5. Popov D.N. Nestatsionarnyye gidromekhanicheskie protsessy. – M.: Mashinostroyeniye, 1982. – 240 s.
6. Popov D. N. Mekhanika gidro- i pnevmoprivodov: Ucheb. dlya vuzov. 2-e izd. / D.N. Popov. – M.: MGTU im. N. E. Bauman, 2005. – 320 s.
7. Sokolov V.I., Tavanyuk T.Ya., Sokolova Ya.V. Nestatsionarnoe trenie v gidrosistemah stankov // Visn. SevNTU. Seriya «Mashy`nopy`ladobuduvannya ta transport». – Sevastopol` : SevNTU, 2010. – № 107. – S. 214 - 219.
8. Sokolov V.I., Rasskazova Yu.B. Issledovanie techeniya zhidkosti v mikroazorah s granichnyim izmeneniyem vyazkosti // Visn. Shidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dallya. – 2016. – № 2 (226). – S. 20 - 25.

Соколов В.И., Степанова О.Г., Степчук Я.И., Кавун Д.Ю., Ткаченко М.К. Разработка и исследование системы автоматического управления технологическим оборудованием с гидроприводом вращательного движения.

Рассмотрены вопросы автоматизации процессов управления технологическим оборудованием с гидроприводом вращательного движения. Целью работы является разработка и исследование системы автоматического управления (САУ) оборудованием, учитывающей стохастическое возмущение и шум наблюдения.

Предложена математическая модель технологического оборудования как объекта автоматического управления. Математическое описание представляет собой совокупность линейных динамических звеньев, имеющих характерные параметры, а именно: постоянная времени процесса регулирования рабочего объема насоса; постоянная времени силовой части привода; коэффициент передачи для угла наклона шайбы (блока цилиндров) по управляющему напряжению; коэффициент передачи силовой части привода; коэффициент передачи для угловой скорости по нагружающему моменту.

Разработана САУ оборудованием, учитывающая шум наблюдения и стохастическое возмущение объекта управления. Решение задачи стохастической линейной оптимальной системы согласно метода разделения разбито на две: задачу синтеза оптимального наблюдателя и детерминированную задачу синтеза оптимальной системы. Для синтеза оптимального линейного регулятора использован метод динамического программирования.

Проведены исследования динамических характеристик САУ. Показано, что в диапазоне возможных параметров возмущения наблюдатель Калмана-Бьюси выполняет функцию оптимальной фильтрации, уменьшает длительность переходного процесса и обеспечивает необходимое качество регулирования оборудованием. Выполнены расчеты переходных процессов для углового перемещения и угловой скорости при различных значениях коэффициента передачи блока регулирования рабочего объема насоса и коэффициента передачи регулятора, даны рекомендации по выбору оптимальных значений коэффициентов передач с учетом особенностей технологического назначения оборудования.

Результаты исследований могут быть использованы для совершенствования технологического оборудования, в частности, для расширения его функциональных возможностей и улучшения динамических характеристик.

Ключевые слова: технологическое оборудование, гидропривод, математическая модель, передаточная функция, стохастическое возмущение, система автоматического управления.

Sokolov V.I., Stepanova O.G., Stepchuk Ya.I., Kavun D.Yu., Tkachenko M.K. Development and research of the automatic control system of technological equipment with rotary motion hydraulic drive.

The problems of automation of control processes of technological equipment with the rotary motion hydraulic drive are considered. The purpose of the paper is development and research of the automatic control system (ACS) for

equipment that allows for the stochastic disturbance and observation noise.

The mathematical model of technological equipment with the rotary motion hydraulic drive as an object of automated control is proposed. The mathematical description is a set of linear dynamic links with characteristic parameters, namely the time constant of the pump displacement control process; the time constant of the drive power section; transmission coefficient for the tilt angle of the washer (cylinder block) by the control voltage; transmission coefficient of the drive power section; transmission coefficient for the angular velocity by the loading point.

The ACS of equipment that allows for the observation noise and stochastic disturbance of the control object is developed. The solution of the problem of the stochastic optimum linear system with incomplete information about the state according to the method of distribution is divided into two: the problem of synthesis of the optimum supervisor and the deterministic problem of synthesis of the optimum system. To synthesis the optimum linear controller, the dynamic programming method is used.

The study of dynamic characteristics of the ACS is made. It is shown that in the range of possible disturbance options, the Kalman-Bucy supervisor performs the function of optimum filtering, reduces the transient duration and provides necessary equipment control quality. The calculations of transients for angular displacement and angular velocity at different values of the transmission coefficient of the pump displacement control unit and the transmission coefficient of the controller are carried out. Recommendations for selecting the optimum values of transmission coefficients allowing for the features of the technological purpose of equipment are given.

The research results can be used to improve the technological equipment, particularly to expand functionality and enhance dynamic characteristics.

Keywords: technological equipment, hydraulic drive, mathematical model, transfer function, stochastic disturbance, automated control system.

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 – студентка групи ІВ – 16дм, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк)
ogstepanova@gmail.com

Степчук Яна Ігорівна – студентка групи МВС – 16дм, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк)
zimogorevrka@mail.ru

Кавун Дмитро Юрійович – студент групи МВС – 16дм, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк)
kavun.dmitriy@mail.ru

Ткаченко Михайло Костянтинович – студент групи МВС – 16дм, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк)
misha-sport@mail.ru

Рецензент: д.т.н., проф. **Чернецька-Білецька Н.Б.**

Стаття подана 07.09.2017

УДК 621.646: 62-83

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ
ОБЛАДНАННЯМ З ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНИМ ПРИВОДОМ****Соколов В.І., Соколова Я.В.****AUTOMATION OF CONTROL PROCESSES OF TECHNOLOGICAL
EQUIPMENT WITH ELECTRO-HYDRAULIC DRIVE****Sokolov V.I., Sokolova Ya.V.**

Розглянуті питання автоматизації процесів керування технологічним обладнанням з електрогідравлічним приводом. Метою роботи є синтез та дослідження системи автоматичного керування (САК) обладнанням, що враховує стохастичне збурення та шум спостереження.

Розроблено типову математичну модель технологічного обладнання з електрогідравлічним приводом як об'єкту автоматичного керування. Математичний опис представляє собою сукупність лінійних динамічних ланок, що мають характерні параметри, а саме: коефіцієнт передачі і постійна часу блоку регулювання приводу, коефіцієнт передачі і постійні часу об'єкту та ін.

Синтезовано САК технологічним обладнанням, що враховує шум спостереження та стохастичне збурення об'єкту керування. Рішення задачі стохастичної лінійної оптимальної системи при неповній інформації про стан відповідно до методу розподілу розбито на дві: задачу синтезу оптимального наглядача та детерміновану задачу синтезу оптимальної системи. Для розробки оптимального лінійного регулятора використаний метод динамічного програмування.

Виконано дослідження динамічних характеристик САК. Показано, що в діапазоні можливих параметрів збурювання наглядач Калмана-Бьюси виконує функцію оптимальної фільтрації, зменшує тривалість перехідного процесу та забезпечує необхідну якість керування обладнанням. Проведені розрахунки перехідних процесів для переміщень та швидкостей при різних значеннях параметрів. Надані рекомендації щодо вибору оптимальних значень коефіцієнтів передач з урахуванням особливостей технологічного призначення обладнання.

Результати досліджень можуть бути використані для удосконалення технологічного обладнання, зокрема, для розширення його функціональних можливостей та поліпшення динамічних характеристик

Ключові слова: технологічне обладнання, електрогідравлічний привід, математична модель, динамічні характеристики, передавальна функція, стохастичне збурення, фільтр Калмана-Бьюси, система автоматичного керування

Постановка проблеми.

Розвиток технологій обробки матеріалів в машинобудуванні пред'являє суттєві вимоги до

технічних та функціональних характеристик технологічного обладнання. Якість виробів при механічній обробці багато в чому залежить від можливості реалізації оптимальних законів руху робочих органів, точності регулювання їх переміщень та стабільності заданих швидкостей в умовах змінного навантаження. У цьому зв'язку важливим є розширення функціональних можливостей та поліпшення техніко-економічних показників ефективності приводів обладнання.

Досягнення довірливої кінематики робочих органів, можливість програмної реалізації оптимальних законів руху забезпечується застосуванням автоматичних електрогідравлічних приводів (ЕГП). Широке поширення гідравлічних приводів в технологічному обладнанні визначається такими важливими перевагами [1–4], до яких, насамперед, відносять можливість отримувати значні сили та моменти при порівняно малих розмірах гідродвигунів, плавність переміщення та безступінчасте регулювання швидкості у великому діапазоні, мала інерційність, можливість керувати режимами обробки під час руху робочих органів, простота здійснення прямолінійних зворотно-поступальних рухів та автоматичного керування робочими органами, легкість запобігання перевантажень та висока експлуатаційна надійність.

Подальше удосконалення технологічного обладнання багато в чому зв'язано з розробкою систем автоматичного керування (САК). Дослідження характеристик приводів та синтез САК потребують достовірних математичних моделей робочих процесів, що протікають в приводах. Існуючи системи автоматизації не враховують стохастичне збурення та шум спостереження, використовують спрощені математичні моделі робочих процесів, в наслідок чого відсутні можливості подальшого удосконалення обладнання.

У цьому зв'язку актуальним є питання розробки типової математичної моделі ЕГП технологічного обладнання як об'єкту

автоматичного керування та САК обладнанням, що враховує стохастичне збурення та шум спостереження.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Математичне моделювання характеристик робочих процесів в обладнанні пов'язане з певними труднощами при описі динамічних характеристик [5–9]. В гідроприводі мають місце коливання тисків, витрат, окремих деталей в наслідок стисливості рідини, впливу робочого середовища на регулюючі пристрої, витрати по зазорах та інших причин. Сукупність та поєднання цих явищ приводить до складних гідромеханічних процесів, які повинні бути враховані при проектуванні технологічного обладнання з ЕГП [10–15].

Проблематика розрахунку та проектування автоматичних ЕГП технологічного обладнання, синтезу та дослідження САК обладнанням представлена в роботах Навроцького К.Л., Петракова Ю.В., Попова Д.М., Струтинського В.Б., Федорця В.А. та ін. [1–6].

Слід відзначити, що відомі підходи до опису робочих процесів використовують спрощені математичні моделі характеристик, не враховують стохастичне збурення та шум спостереження [16–21]. Робота технологічного обладнання, зокрема обладнання для механічної обробки, здійснюється в умовах впливів на систему, закон зміни яких, в загальному випадку, носить стохастичний характер [22–25]. Розрахунок САК при випадкових впливах проводять за допомогою спеціальних статистичних методів, до розгляду вводять певні кількісні оцінки стохастичних збурень – статистичні характеристики випадкових впливів, які характеризують стохастичні збурення та при цьому не являються випадковими залежностями. САК, яка спроектована на основі таких методів, буде задовольняти вимогам, що пред'являються до неї, не для одного детермінованого впливу, а для цілої сукупності впливів, які задані за допомогою статистичних характеристик.

Мета статті.

Метою даної роботи є розробка типової математичної моделі ЕГП технологічного обладнання як об'єкту автоматичного керування та САК обладнанням, що враховує стохастичне збурення та шум спостереження.

Матеріали та результати дослідження.

В гідролічних приводах технологічного обладнання найбільше поширення отримали об'ємний (машинний) і дросельний способи регулювання швидкості вихідної ланки гідроприводу. Сутність об'ємного регулювання швидкістю робочого органу полягає в тому, що подача рідини до гідродвигуна змінюється за рахунок зміни подачі насоса, що регулюється, який підживлює систему. Принцип дросельного регулювання полягає в тому, що частина подачі насоса, що не регулюється, відводиться через клапан або дросель на злив, мінуючи гідродвигун. На

відміну від об'ємного способу регулювання в системах з дросельним регулюванням подача рідини насосом завжди більше подачі, що необхідна для отримання заданої швидкості.

В розрахунковій схемі обладнання з ЕГП з дросельним регулюванням (рис. 1) відображені: електричний блок (ЕБ), електромеханічний перетворювач (ЕМП), гідропідсилювач (ГП), гідродвигун (ГД). ЕБ містить сумуючий (порівнювальний) підсилювач, підсилювач напруги, корегуючий контур та підсилювач потужності. ЕМП та ГП зазвичай становлять один пристрій – електрогідравлічний підсилювач (ЕГПС). У вихідному каскаді підсилення ЕГПС розглянутий золотниковий гідропідсилювач.

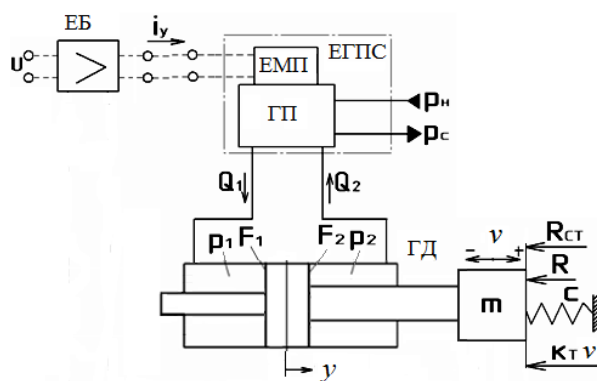


Рис. 1. Розрахункова схема ЕГП з дросельним регулюванням

Математична модель включає наступні рівняння та залежності:

$$L_y \frac{di_y}{dt} + R_y i_y = k_{yc} U; \quad (1)$$

$$T_{2y}^2 \frac{d^2 x_3}{dt^2} + T_{1y} \frac{dx_3}{dt} + x_3 = k_{xi} i_y; \quad (2)$$

$$Q_1 = \begin{cases} \mu_3 \pi d_3 k_n (x_3 - h_n) \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_n - p_1| \text{sign}(p_n - p_1)}, & x_3 > h_n; \\ 0, & |x_3| \leq h_n; \\ \mu_3 \pi d_3 k_n (x_3 + h_n) \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_1 - p_c| \text{sign}(p_1 - p_c)}, & x_3 < -h_n; \end{cases} \quad (3)$$

$$Q_2 = \begin{cases} \mu_3 \pi d_3 k_n (x_3 - h_n) \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_2 - p_c| \text{sign}(p_2 - p_c)}, & x_3 > h_n; \\ 0, & |x_3| \leq h_n; \\ \mu_3 \pi d_3 k_n (x_3 + h_n) \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_H - p_2| \text{sign}(p_H - p_2)}, & x_3 < -h_n; \end{cases} \quad (4)$$

$$m \frac{dv}{dt} = p_1 F_1 - p_2 F_2 - c y - k_T v - R_{cm} \text{sign} v - R; \quad (5)$$

$$\frac{dy}{dt} = v, \quad -H/2 \leq y \leq H/2; \quad (6)$$

$$\frac{W_{но} + F_1(H/2 + y)}{E_{жс}} \frac{dp_1}{dt} = Q_1 - F_1 v; \quad (7)$$

$$\frac{W_{со} + F_2(H/2 - y)}{E_{жс}} \frac{dp_2}{dt} = -Q_2 + F_2 v; \quad (8)$$

де y, v – переміщення та швидкість поршня; p_1, p_2 – тиск у порожнинах гідроциліндра; m – приведена маса рухливих частин; F_1, F_2 – ефективні площі; c – жорсткість позиційного навантаження; κ_T – коефіцієнт сили в'язкого тертя; $R_{см}$ – сила сухого тертя; R – навантаження; H – хід поршня; $E_{жс}$ – модуль пружності робочої рідини; $W_{но}, W_{со}$ – «мертві» об'єми напірної та зливної магістралей; $k_{ос}$ – коефіцієнт передачі ЗЗ; k_{xi} – коефіцієнт передачі ЕГПС; T_{2y}, T_{ly} – постійні часу ЕГПС; p_H, p_C – тиск насосної станції та на злив; x_3 – переміщення золотника; h_n – величина позитивного перекриття; μ_3 – коефіцієнт витрати щілини золотника; d_3 – діаметр золотника; k_n – коефіцієнт повноти використання периметра золотника; ρ – густина робочої рідини; U – вхідна (керуюча) напруга; k_{yc} – коефіцієнт підсилення ЕБ; L_y – індуктивність обмотки керування; R_y – активний опір електричного ланцюга.

На основі дослідження характеристик робочих процесів розроблена типова математична модель обладнання з ЕГП з дросельним регулюванням як об'єкту автоматичного керування. Структурна схема математичної моделі показана на рис. 2, де введені наступні параметри: T_y – постійна часу керуючої частини приводу; T_{η} – механічна постійна часу гідроциліндра; ζ_m – коефіцієнт відносного демпфування гідроциліндра; k_{QU} – коефіцієнт передачі керуючої частини приводу; k_{vQ} – коефіцієнт передачі для швидкості по витраті; k_{vR} – коефіцієнт передачі для швидкості по навантаженню.

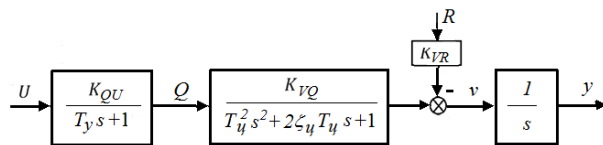


Рис. 2. Структурна схема математичної моделі ЕГП з дросельним регулюванням як об'єкту автоматичного керування

В розрахунковій схемі ЕГП з об'ємним регулюванням (рис. 3) позначені: Q_H – кутова швидкість валу насоса; γ – кут нахилу шайби насоса (блока циліндрів) аксіально-поршневого насоса; t – час; Ω – кутова швидкість вала гідромотора; α – кут повороту вала гідромотора; Q_H, Q_M – ідеальні витрати насоса та гідромотора; $Q_{нн}, Q_{нм}$ – витрати перетоків в насосі та гідромоторі; $Q_{yn1}, Q_{yn2}, Q_{ym1}, Q_{ym2}$ – витрати

виток в лініях насоса та гідромотора; Q_{nn1}, Q_{nn2} – витрати підживлення скрізь підживлючі клапани; p_1, p_2 – тиски в трубопроводах високого та низького тисків; p_{nn} – тиск в магістралі перед підживлючим клапаном.

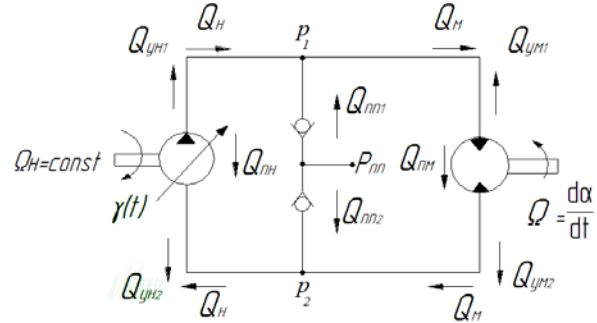


Рис. 3. Розрахункова схема ЕГП з об'ємним регулюванням

Математична модель силової частини гідроприводу обертального руху спеціального технологічного обладнання включає наступні рівняння та залежності:

$$Q_M + Q_{нн} + Q_{нм} + Q_{yn1} + Q_{ym1} + Q_{сжс1} - Q_{nn1} - Q_H = 0; \quad (9)$$

$$Q_M + Q_{нн} + Q_{нм} - Q_{yn2} - Q_{ym2} - Q_{сжс2} + Q_{nn2} - Q_H = 0; \quad (10)$$

$$Q_{нн} = Q_{нм} = Q_{nep}; \quad Q_{ym1} = Q_{ym1} = Q_{ym1}; \quad Q_{yn2} = Q_{ym2} = Q_{ym2}; \quad (11)$$

$$Q_M = \frac{q_M}{2\pi} \Omega = \frac{q_M}{2\pi} \frac{d\alpha}{dt}; \quad Q_H = \frac{q_H}{2\pi} \Omega_H; \quad (12)$$

$$q_H = F_n z_n D_n \operatorname{tg} \gamma; \quad (13)$$

$$Q_{nep} = k_{nep} (p_1 - p_2); \quad Q_{ym1} = k_{ym1} p_1; \quad (14)$$

$$Q_{ym2} = k_{ym2} p_2; \quad (15)$$

$$Q_{сжс1} = \frac{W_0}{E_{жс}} \frac{dp_1}{dt}; \quad Q_{сжс2} = \frac{W_0}{E_{жс}} \frac{dp_2}{dt}; \quad (16)$$

$$M_M - M_{mp} - M_{noz} - M = J \frac{d\Omega}{dt}; \quad \Omega = \frac{d\alpha}{dt}; \quad (17)$$

$$M_M = \frac{q_M}{2\pi} (p_1 - p_2); \quad M_{noz} = k_{noz} \alpha; \quad (18)$$

$$M_{mp} = k_{mp} \frac{d\alpha}{dt}; \quad (19)$$

де $Q_{сжс1}, Q_{сжс2}$ – складові витрати, які пов'язані з компенсацією стисливості рідини (витрати стискування); $k_{кл}$ – провідність підживлюючого

клапана; q_m – робочий об'єм гідромотора; q_n – робочий об'єм насоса; F_n – робоча площа одного поршня (плунжера) насоса; z_n – кількість поршнів; D_n – діаметр кола, на якій розташовані вісі поршнів насоса; k_{nep} – провідність щілин, по яким в насосі та гідромоторі здійснюються перетоки рідини з порожнин з високим тиском в порожнини з низьким тиском; k_{ym} – провідність щілин, по яким здійснюється виток рідини з насоса та гідромотора; J – момент інерції частин, що обертаються з валом гідромотора (приведений момент інерції загрузки та ротора мотора); W_0 – внутрішній об'єм трубопроводів з підключеними до нього об'ємами порожнин насоса та гідромотора; M_{mp} – момент від сил тертя; M_{noz} – момент від дії позиційного навантаження; M_m – крутний момент; k_{noz} – коефіцієнт жорсткості позиційного навантаження; $k_{mp} = k_{mp1} + k_{mp2}$; k_{mp1} – коефіцієнт моменту від сил тертя в гідромоторі; k_{mp2} – коефіцієнт моменту від сил тертя в виконавчому механізмі.

На основі дослідження характеристик робочих процесів розроблена типова математична модель технологічного обладнання з ЕГП з об'ємним регулюванням як об'єкту автоматичного керування. Структурна схема математичної моделі показана на рис. 4, де введені у розгляд наступні параметри: T_{np} – постійна часу процесу регулювання робочого об'єму насоса; T_m – постійна часу гідромотора; ζ_m – коефіцієнт відносного демпфування гідромотора; $k_{\gamma U}$ – коефіцієнт передачі для кута нахилу шайби (блоку циліндрів) по керуючій напрузі; $k_{\Omega \gamma}$ – коефіцієнт передачі силової частини привода; $k_{\Omega M}$ – коефіцієнт передачі для кутової швидкості обертання по навантажуючому моменту.

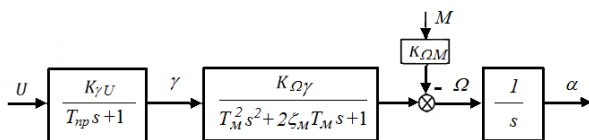


Рис. 4. Структурна схема математичної моделі ЕГП з об'ємним регулюванням як об'єкту автоматичного керування

Аналіз структурних схем математичних моделей ЕГП з дросельним та об'ємними способами регулювання (рис. 2, 4) дозволив запропонувати та покласти в основу подальших досліджень єдину типову математичну модель ЕГП технологічного обладнання як об'єкту автоматичного керування. Структурна схема математичної моделі показана на рис. 5, де обозначені: u – вхідний сигнал; y – вихідна змінна; k_0 , T_0 – коефіцієнт передачі та постійна часу блоку регулювання привода; k , T_1 , T_2 – коефіцієнт передачі та постійні часу об'єкта; $V_o(t)$ – стохастична збуджуюча дія (шум об'єкта).

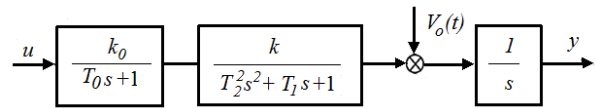


Рис. 5. Структурна схема типової математичної моделі

Єдина типова математична модель стала основою для розробки САК технологічним обладнанням з ЕГП, що враховує стохастичне збурення та шум спостереження.

У просторі стану рівняння об'єкта керування були представлені в матричній формі

$$\dot{x} = Ax + Bu + V_o(t), \quad (20)$$

$$y = Cx + V_n(t), \quad (21)$$

де x – фазовий вектор змінних стану об'єкту автоматичного керування, u – керуючий вплив, y – вихідна змінна, A – матриця параметрів об'єкта керування, B – матриця вхідних параметрів, C – матриця вихідних параметрів, $V_o(t)$ – кольоровий шум об'єкта, $V_n(t)$ – білий шум спостереження;

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1/T_0 T_2^2 & -(T_0 + T_1)/T_0 T_2^2 & -(T_0 T_1 + T_2^2)/T_0 T_2^2 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ K_0 K / T_0 T_2^2 \end{bmatrix};$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

Для формування кольорового шуму об'єкта розглянутий формуючий фільтр з передавальною функцією

$$W_\phi(s) = \frac{b_0^* s + b_1^*}{a_0^* s^2 + a_1^* s + a_2^*}, \quad (22)$$

на вхід якого подавався стаціонарний стохастичний сигнал $V(t)$ типу білий шум зі спектральною щільністю $S_V(\omega) = L_V$.

Критерій оптимальності управління розглядався у виді

$$J = \int_0^{t_f} (\tilde{Q}x^2(t) + \tilde{R}u^2(t))dt \rightarrow \min, \quad (23)$$

де $\tilde{Q}$ – позитивно-визначена матриця, що характеризує якість керування; $\tilde{R}$ – величина обмеження керуючої дії.

У зв'язку з тим, що стохастична збурююча дія, що прикладена до об'єкту керування, проявляє себе незалежно від керуючого сигналу, то синтез САК технологічним обладнанням з ЕГП з гідроприводом обертального руху виконано з урахуванням адитивної перешкоди. Таким чином, рішення задачі стохастичної лінійної оптимальної системи при неповній інформації про стан відповідно до методу розподілу розбито на дві: задачу синтезу оптимального наглядача та детерміновану задачу синтезу оптимальної системи [22].

Для синтезу оптимального лінійного регулятора відповідно поставленій задачі використаний метод динамічного програмування. Функціональне рівняння Белмана розглядалося у вигляді

$$\tilde{Q}x^2 + \tilde{R}u^2 + \frac{\partial S}{\partial x}(A'x + B'u) + \frac{\partial S}{\partial t} = 0. \quad (24)$$

$$2\tilde{R}u + \frac{\partial S}{\partial x}B' = 0. \quad (25)$$

З рівняння (25) прийнято вираз для оптимального керування

$$u = -\frac{1}{2}\tilde{R}^{-1}B' \frac{\partial S}{\partial x}. \quad (26)$$

З урахуванням позитивної визначеності функції Белмана для оптимального керування технологічним обладнанням отримано

$$u = -(K_1''x_1 + K_2''x_2 + K_3''x_3 + K_4''x_4) \quad (27)$$

де x_1, x_2, x_3, x_4 - фазові змінні; $K_1'', K_2'', K_3'', K_4''$ - коефіцієнти підсилення зворотного зв'язку.

Структурна схема оптимальної САК приведена на рис. 6. Структурная схема оптимальной САУ приведена на рис. 6. Відзначимо, що на схемі позначені коефіцієнти фільтра Калмана-Бьюси - K_1', K_2', K_3', K_4' .

Перехідні процеси стохастичної замкнутої САК технологічним обладнанням з ЕГП без використання та з використанням фільтра Калмана-Бьюси при наявності збурюючого впливу на об'єкт керування у вигляді білого шуму зі спектральною щільністю $S_v(\omega)=1$ та $W_\phi(s)=0,025$ приведені на рис. 7. Дослідження показали, що в діапазоні можливих параметрів збурювання для приводів як з дросельним (1), так і з об'ємним регулюванням (2), фільтр Калмана-Бьюси виконує функцію оптимальної фільтрації, забезпечує необхідну якість управління технологічним обладнанням та зменшує тривалість перехідного процесу.

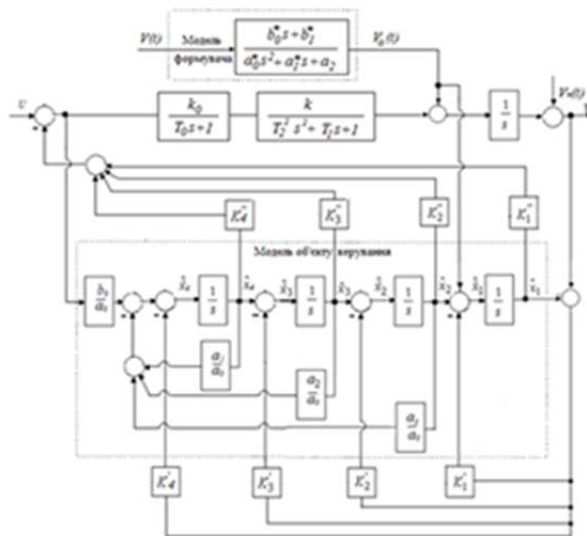


Рис. 6. Структурна схема САК

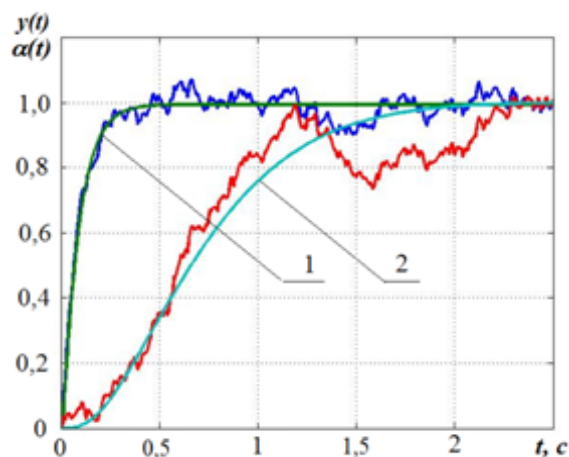


Рис. 7. Перехідні процеси в стохастичній замкнутій системі без використання та з використанням фільтра Калмана-Бьюси для привода с дросельним (1) та об'ємним (2) регулюванням

Виконано дослідження САК, зокрема, вплив параметрів об'єкту керування та оптимального регулятора на якість перехідного процесу. На рис. 8 приведені перехідні процеси в системі для приводу з дросельним регулюванням (а) при різних значеннях коефіцієнту передачі k_{0u} ($m^3/(c \cdot B)$) і приводу з об'ємним регулюванням (б) при різних значеннях безрозмірного коефіцієнту передачі прямого шляху k_0k . На рис. 9 показані перехідні процеси при різних значеннях коефіцієнту передачі K_2'' регулятора для приводу з дросельним регулюванням (а) при $K_1''=108$ і приводу з об'ємним регулюванням (б) при $K_1''=1,35$.

Слід зауважити, що при виборі оптимальних значень коефіцієнтів передач необхідно враховувати, що у ряді випадків особливості технологічного призначення обладнання виключають перерегулювання лінійного чи кутового

переміщення (або зміну знаку швидкості) робочого органу. Очевидно, що для результатів досліджень, які наведені на рис. 8, 9, рекомендовані значення коефіцієнтів передач не будуть відповідати оптимальній швидкості обладнання.

Результати проведених досліджень важливі для удосконалення технологічного обладнання для механічної обробки матеріалів, зокрема, для розширення його функціональних можливостей та поліпшення динамічних характеристик. Необхідно враховувати, що поліпшення динамічних характеристик підвищує надійність та довговічність обладнання, а також рівень охорони праці на виробництві.

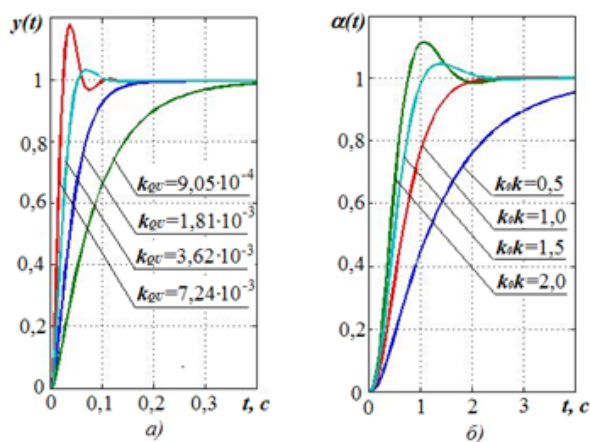


Рис. 8. Вплив на перехідні процеси параметрів об'єкта керування:

а – привід з дросельним регулюванням;
б – привід з об'ємним регулюванням

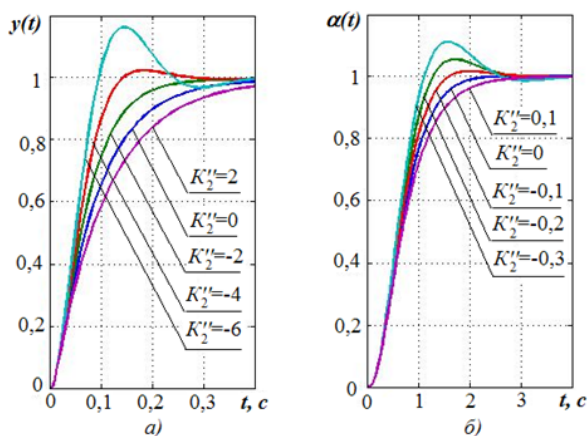


Рис. 9. Вплив на перехідні процеси коефіцієнта K_2'' регулятора:

а – привід з дросельним регулюванням ($K_1'' = 108$);
б – привід з об'ємним регулюванням ($K_1'' = 1,35$)

В подальшому планується проведення досліджень щодо удосконалення САК за рахунок підвищення точності математичної моделі як об'єкту автоматичного керування, зокрема, врахуванням динамічних властивостей елементів та пристроїв

приводу більшого порядку. Викликають інтерес всебічні дослідження характеристик стохастичних збурень та шумів спостереження для різноманітного технологічного обладнання, їх впливу на якість і точність керування.

Висновки.

1. Розроблено типову математичну модель технологічного обладнання з електрогідравлічним приводом як об'єкту автоматичного керування. Математичний опис представляє собою сукупність лінійних динамічних ланок, що мають характерні параметри, а саме: коефіцієнт передачі і постійна часу блоку регулювання приводу, коефіцієнт передачі і постійні часу об'єкту та ін.

2. Синтезовано САК технологічним обладнанням, що враховує шум спостереження та стохастичне збурення об'єкту керування. Рішення задачі стохастичної лінійної оптимальної системи при неповній інформації про стан відповідно до методу розподілу розбито на дві: задачу синтезу оптимального наглядача та детерміновану задачу синтезу оптимальної системи. Для розробки оптимального лінійного регулятора використаний метод динамічного програмування.

3. Виконано дослідження динамічних характеристик САК. Показано, що в діапазоні можливих параметрів збурювання наглядач Калмана-Бьюси виконує функцію оптимальної фільтрації, зменшує тривалість перехідного процесу та забезпечує необхідну якість керування обладнанням. Проведені розрахунки перехідних процесів для переміщень та швидкостей при різних значеннях параметрів. Надані рекомендації щодо вибору оптимальних значень коефіцієнтів передач з урахуванням особливостей технологічного призначення обладнання.

Література

1. Свешников В.К. Станочные гидроприводы: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. / В.К. Свешников, А.А. Усов. – М.: Машиностроение, 1988. – 512 с.
2. Навроцкий К.Л. Теория и проектирование гидро- и пневмоприводов. – М.: Машиностроение, 1991. – 384 с.
3. Гидроприводы и гидропневмоавтоматика станков / В.А. Федоренко, М.Н. Педченко, А.Ф. Пичко, Ю.В. Пересадько, В.С. Лысенко; Под ред. В.А. Федорца. – К.: Вища шк., 1987. – 375 с.
4. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. – М.: Машиностроение, 1987. – 464 с.
5. Попов Д. Н. Механика гидро- и пневмоприводов: Учеб. для вузов. 2-е изд. / Д.Н. Попов. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 320 с.
6. Попов Д.Н. Нестационарные гидромеханические процессы. – М.: Машиностроение, 1982. – 240 с.
7. Соколов В.И., Таванюк Т.Я., Соколова Я.В. Нестационарное трение в гидросистемах станков // Вісн. СевНТУ. Серія «Машиноприладобудування та транспорт». – Севастополь: СевНТУ, 2010. - № 107. – С. 214 - 219.

8. Соколов В.І., Кроль О.С., Єпіфанова О.В. Гідравліка. – Северодонецьк: СХУ ім. В. Даля. – 2017. – 160 с.
9. Харламов Ю.А., Соколов В.І., Кроль О.С. Трибологическая надежность металлорежущих станков. – Северодонецк: ВНУ им. В. Даля. – 2017. – 320 с.
10. Sokolova Ya., Krol O., Tavanuk T., Sokolov V. Transfer function of the automatic electrohydraulic drive // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 15. – N 2. – 2015. – Lublin - Rzeszow, Poland. – pp. 3-8.
11. Sokolova Ya., Krol O., Rasskazova Yu., Sokolov V. Mathematical modeling automatic electrohydraulic drive of machine building equipment // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 15. – N 2. – 2015. – Lublin - Rzeszow, Poland. – pp. 9-14.
12. Соколов В.І., Рассказова Ю.Б. Исследование течения жидкости в микрозазорах с граничным изменением вязкости // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. – 2016. – № 2 (226). – С. 20 - 25.
13. Sokolova Ya., Rasskazova Yu., Krol O., Sokolov V. Modeling of fluid flow in microgap considering the boundary change of dynamic viscosity // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 16. – N 2. – 2016. – Lublin - Rzeszow, Poland. – pp. 55 - 59.
14. Коваленко А.А., Соколов В.І., Дымнич А.Х., Уваров П.Е. Основы технической механики жидкостей и газов: Учебное пособие для вузов. - Луганск: ВУГУ, 1998. - 272 с.
15. Коваленко А. А., Соколов В.І., Уваров П.Е., Пазин В.В. Основы объемного гидравлического привода строительных и дорожных машин. - Луганск: ДонГАСА. – 1999. – 137 с.
16. Соколова Я. В., Таванюк Т.Я., Соколов В.І. Нелинейная математическая модель электрогидравлического следящего привода с дроссельным регулированием // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. – 2010. – № 10 (152). – С. 168 – 175.
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. Соколов В.І., Соколова Я.В., Таванюк Т.Я. Разработка методики расчёта и выбор основных параметров электрогидравлического следящего привода специального технологического оборудования // Вісн. СевНТУ. Серія «Машиноприладобудування та транспорт». – Севастополь: СевНТУ, 2012. - № 129. – С. 223-228.
19. Соколов В.І., Азаренко Н.Г., Соколова Я.В. Моделирование силовой части автоматического электрогидравлического привода с объемным регулированием // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. – 2012. – № 12 (183). – Ч.І. – С. 260 - 270.
20. Соколов В.І., Соколова Я.В., Азаренко Н.Г. Моделирование течения жидкости в микрозазоре с учетом граничного изменения динамической вязкости // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. – 2013. – № 2 (191). – Ч.І. – С. 98 - 102.
21. Соколов В. И., Таванюк Т. Я. Определение передаточных функций электрогидравлического следящего привода оборудования для обработки давлением // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. – 2011. – №. 1(155). – С. 208 - 216.
22. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: учебное пособие. – М.: Физматлит, 2004. – 464 с.
23. Sokolov V., Rasskazova Y. Automation of control processes of technological equipment with rotary hydraulic drive // Eastern-Europe Journal of Enterprise Technologies. Volume 2, Issue 2, 2015, Pages 44-50.
24. Соколова Я.В., Азаренко Н.Г., Соколов В.І. Синтез системы автоматического управления оборудованием для механической обработки материалов с гидравлическим приводом // Восточно-европейский журнал передовых технологий. - Харьков. – 2014. – № 2/2 (68). – С. 56-60.
25. Соколов В.І., Рассказова Ю.Б. Автоматизація процесів керування технологічним обладнанням з гідроприводом обертового руху // Східно-европейський журнал передових технологій. - 2016. – № 2/2 (80). – С.44 - 50.

References

1. Sveshnikov V.K. Stanochnyie gidroprivodyi: Spravochnik. – 2-e izd., pererab. i dop. / V.K. Sveshnikov, A.A. Usov. – M.: Mashinostroenie, 1988. – 512 s.
2. Navrotsky K.L. Teoriya i proektirovanie gidro- i pnevmoprivodov. – M.: Mashinostroenie, 1991. – 384 s.
3. Gidroprivodyi i gidropnevmavtomatika stankov / V.A. Fedorets, M.N. Pedchenko, A.F. Pichko, Yu.V. Peresadko, V.S. Lyisenko; Pod red. V.A. Fedortsa. – K.: Vischa shk., 1987. – 375 s.
4. Popov D.N. Dinamika i regulirovanie gidro- i pnevmosistem. – M.: Mashinostroenie, 1987. – 464 s.
5. Popov D. N. Mehanika gidro- i pnevmoprivodov: Ucheb. dlya vuzov. 2-e izd. / D.N. Popov. – M.: MGTU im. N. E. Bauman, 2005. – 320 s.
6. Popov D.N. Nestatsionarnyie gidromekhanicheskie protsessy. – M.: Mashinostroenie, 1982. – 240 s.
7. Sokolov V.I., Tavanyuk T.Ya., Sokolova Ya.V. Nestatsionarnoe trenie v gidrosiste-mah stankov // Visn. SevNTU. Seriya «Mashy'no pry'ladobuduvannya ta transport». – Sevastopol': SevNTU, 2010. - № 107. – S. 214 - 219.
8. Sokolov V.I., Krol' O.S., Yepifanova O.V. Gidravlika. – Syevyrodonecz'k: SNU im. V. Dalya. – 2017. – 160 s.
9. Harlamov Yu.A., Sokolov V.I., Krol O.S. Tribologicheskaya nadezhnost metallorazhushchih stankov. – Severodonetsk: VNU im. V. Dalya. – 2017. – 320 s.
10. Sokolova Ya., Krol O., Tavanuk T., Sokolov V. Transfer function of the automatic electrohydraulic drive // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 15. – N 2. – 2015. – Lublin - Rzeszow, Poland. – pp. 3-8.
11. Sokolova Ya., Krol O., Rasskazova Yu., Sokolov V. Mathematical modeling automatic electrohydraulic drive of machine building equipment // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 15. – N 2. – 2015. – Lublin - Rzeszow, Poland. – pp. 9-14.
12. Sokolov V.I., Rasskazova Yu.B. Issledovanie techeniya zhidkosti v mikroazorah s granichnym izmeneniyem vyazkosti // Visn. Shidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dalya. – 2016. – № 2 (226). – S. 20 - 25.
13. Sokolova Ya., Rasskazova Yu., Krol O., Sokolov V. Modeling of fluid flow in microgap considering the boundary change of dynamic viscosity // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 16. – N 2. – 2016. – Lublin - Rzeszow, Poland. – pp. 55 - 59.

14. Kovalenko A.A., Sokolov V.I., Dyimnich A.H., Uvarov P.E. Osnovyi tehnikeskoy mehaniki zhidkostey i gazov: Uchebnoe posobie dlya vuzov. - Lugansk: VUGU, 1998. - 272 s.
15. Kovalenko A. A., Sokolov V.I., Uvarov P.E., Pazin V.V. Osnovyi ob'emnogo gidravlicheskogo privoda stroitelnykh i dorozhnykh mashin. - Lugansk: DonGASA. - 1999. - 137 s.
16. Sokolova Ya. V., Tavanyuk T.Ya., Sokolov V.I. Nelineynaya matematicheskaya model elektrogidravlicheskogo sledyashchego privoda s drosselnym regulirovaniem // Visn. Shidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dalia. - 2010. - № 10 (152). - S. 168 - 175.
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.I., Sokolova Ya.V., Tavanyuk T.Ya. Razrabotkametodikiraschyotaivyborosnovnyihparametrov elektrogidravlicheskogosledyashchegoprivodaspetsialnogotekhnologicheskogooborudovaniya // Visn. SevNTU. Seriya «Mashy'nopry'ladobuduvannya ta transport». - Sevastopol': SevNTU, 2012. - № 129. - S. 223-228.
19. Sokolov V.I., Azarenko N.G., Sokolova Ya.V. Modelirovanie silovoy chasti avtomaticheskogo elektrogidravlicheskogo privoda s ob'emnym regulirovaniem // Visn. Shidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dalia. - 2012. - № 12 (183). - Ch.1. - S. 260 - 270.
20. Sokolov V.I., Sokolova Ya.V., Azarenko N.G. Modelirovanie tehnicheskoy zhidkosti v mikroazore s uchetom granichnogo izmeneniya dinamicheskoy vyazkosti // Visn. Shidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dalia. - 2013. - № 2 (191). - Ch.1. - S. 98 - 102.
21. Sokolov V. I., Tavanyuk T. Ya. Opredelenie peredatochnykh funktsiy elektrogidravlicheskogo sledyashchego privoda oborudovaniya dlya obrabotki davleniem // Visn. Shidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dalia. - 2011. - № 1(155). - S. 208 - 216.
22. Kim D.P. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. T.2. Mnogomernyye, nelineynyye, optimalnyie i adaptivnyie sistemy: uchebnoe posobie. - M.: Fizmatlit, 2004. - 464 s.
23. Sokolov V., Rasskazova Y. Automation of control processes of technological equipment with rotary hydraulic drive // Eastern-Europe Journal of Enterprise Technologies. Volume 2, Issue 2, 2015, Pages 44-50.
24. Sokolova Ya.V., Azarenko N.G., Sokolov V.I. Sintez sistemi avtomaticheskogo upravleniya oborudovaniem dlya mehanicheskoy obrabotki materialov s gidravlicheskim privodom // Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. - Harkov. - 2014. - № 2/2 (68). - S. 56-60.
25. Sokolov V.I., Rasskazova Yu.B. Avtomaty'zatsiya procesiv keruvannya tex-nologichny'm obladnanniyam z gidropy'vodom obertal'nogo ruxu // Sxidno-evropejs'ky' zhurnal peredovy'x tekhnologij. - 2016. - № 2/2 (80). - S.44 - 50.

Соколов В.И., Соколова Я.В. Автоматизация процессов управления технологическим оборудованием с электрогидравлическим приводом.

Рассмотрены вопросы автоматизации процессов управления технологическим оборудованием с электрогидравлическим приводом. Целью работы

является синтез и исследование системы автоматического управления (САУ) оборудованием, учитывающей стохастическое возмущение и шум наблюдения.

Разработана типовая математическая модель технологического оборудования с электрогидравлическим приводом как объекта автоматического управления. Математическое описание представляет собой совокупность линейных динамических звеньев, имеющих характерные параметры, а именно: коэффициент передачи и постоянная времени блока регулирования привода, коэффициент передачи и постоянные времени объекта и др.

Синтезирована САУ технологическим оборудованием, учитывающая шум наблюдения и стохастическое возмущение объекта управления. Решение задачи стохастической оптимальной системы при неполной информации о состоянии в соответствии с методом разделения разбито на две: задачу синтеза оптимального наблюдателя и детерминированную задачу синтеза оптимальной системы. Для разработки оптимального линейного регулятора использован метод динамического программирования.

Выполнены исследования динамических характеристик САУ. Показано, что наблюдатель Калмана-Бьюси выполняет функцию оптимальной фильтрации, уменьшает время переходного процесса и обеспечивает необходимое качество управления оборудованием. Проведены расчеты переходных процессов для перемещений и скоростей при различных значениях параметров. Даны рекомендации по выбору оптимальных значений коэффициентов передач с учетом особенностей технологического назначения оборудования.

Результаты исследований могут быть использованы для совершенствования технологического оборудования, в частности, для расширения его функциональных возможностей и улучшения динамических характеристик.

Ключевые слова: технологическое оборудование, электрогидравлический привод, математическая модель, динамические характеристики, передаточная функция, стохастическое возмущение, фильтр Калмана-Бьюси, система автоматического управления

Sokolov V.I., Sokolova Ya.V. Automation of control process of technological equipment with electro-hydraulic drive.

The problems of automation of control processes of technological equipment with electro-hydraulic drive are considered. The purpose of the paper is synthesis and study of the automatic control system (ACS) for equipment that allows for the stochastic disturbance and observation noise.

The typical mathematical model of technological equipment with electro-hydraulic drive as an object of automated control is developed. The mathematical description is a set of linear dynamic links with characteristic parameters, namely: the transmission coefficient and time constant of drive control unit, the transmission coefficient and time constants of object etc.

The ACS of technological equipment that allows for the observation noise and stochastic disturbance of the control object is synthesized. The solution of the problem of the stochastic optimum linear system with incomplete information about the state according to the method of distribution is divided into two: the problem of synthesis of the optimum supervisor and the deterministic problem of synthesis of the

optimum system. To develop the optimum linear controller, the dynamic programming method is used.

The study of dynamic characteristics of the ACS is carried out. It is shown that in the range of possible disturbance options, the Kalman-Bucy supervisor performs the function of optimum filtering, reduces the transient duration and provides necessary equipment control quality. The calculations of transients for displacements and velocities at different parameters are made. Recommendations for selecting the optimum values of transmission coefficients allowing for the features of the technological purpose of equipment are given.

The research results can be used to improve the technological equipment, particularly to expand functionality and enhance dynamic characteristics.

Keywords: technological equipment, electro-hydraulic drive, mathematical model, dynamic characteristics, transfer

function, stochastic disturbance, Kalman-Bucy filter, automatic control system.

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

Соколова Яна Володимирівна – к.т.н., доц., здобувач кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк)

ya.v.sokolova@inbox.ru

Рецензент: д.т.н., проф. **Харламов Ю.О.**

Стаття подана 07.09.2017

УДК 532.72:533.15:697

ИССЛЕДОВАНИЕ НАЧАЛЬНЫХ ЭТАПОВ ДИФФУЗИИ АЭРОЗОЛЕЙ В КАНАЛАХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ

Соколов В.И.

RESEARCH OF INITIAL STAGES OF AEROSOLS DIFFUSION IN THE CHANNELS OF VENTILATION SYSTEMS

Sokolov V.I.

Рассмотрены вопросы диффузии аэрозолей в турбулентных газовых потоках каналов вентиляционных систем промышленных предприятий.

Поведение дискретной сферической частицы в однородном турбулентном потоке описано уравнением Бассе. В качестве характеристик турбулентного движения рассмотрены коэффициенты временной Лагранжевой корреляции и Лагранжевы функции энергетического спектра. Для выполнения количественных оценок коэффициент временной Лагранжевой корреляции основного потока представлен в виде приближенной экспоненциальной зависимости.

Показано, что процесс диффузии аэрозолей носит сложный характер и условно разделяется на три периода: индукционный период, при котором происходит разгон частиц стоковыми силами от нулевой скорости до скорости основного потока, а диффузионный процесс в этот период практически отсутствует; переходной период, при котором диффузионный процесс происходит при переменном коэффициенте диффузии; а также диффузионный процесс аэрозольных частиц при постоянном коэффициенте диффузии, который можно исследовать известными методами.

Выполнена оценка длительности индукционного и переходного периодов диффузионного процесса. Получено выражение для приближенного определения коэффициента диффузии аэрозольных частиц.

Поскольку процесс диффузии аэрозольных частиц носит достаточно сложный характер, то при организации контроля характеристик аэрозольных выбросов, в частности, их концентрации, следует учитывать, как длину пути выравнивания концентрации, так и длину, проходимую частицами во время начальных этапов: индукционного и переходного периода. В случае, когда длина канала относительно невелика или средства контроля концентрации установлены на недостаточном большом расстоянии от источника выбросов, результаты контроля должны быть скорректированы.

Результаты исследований рекомендованы для использования при разработке систем контроля характеристик газозагрязняющих выбросов промышленных вентиляционных систем.

Ключевые слова: вентиляционная система, турбулентный поток, диффузионный процесс, аэрозоль, коэффициент диффузии, индукционный период, переходной период диффузии.

Постановка проблемы.

Разработка систем контроля характеристик выбросов промышленных предприятий, химических производств, атомных станций связана с исследованием диффузионных процессов аэрозолей в турбулентных газовых потоках каналов вентиляционных систем. Оценка параметров процессов диффузии аэрозолей требует исследования поведения дискретных частиц в турбулентном потоке, которое в значительной степени зависит от концентрации этих частиц и от их размера в сравнении с масштабом турбулентности в среде [1-5].

При высокой концентрации наблюдается непосредственное взаимодействие между частицами из-за столкновений, а также из-за влияния на течение среды в окрестности частиц. В случае, когда концентрация частиц мала, что встречается в большинстве практических случаев, взаимодействием между частицами можно пренебречь и каждую частицу рассматривать, как если бы в турбулентном потоке она была единственной. Если частицы крупны по сравнению с масштабом турбулентности, то основное влияние турбулентности на частицы будет состоять в увеличении их сопротивления течению, и частицы в той или иной степени будут следовать за крупномасштабными турбулентными движениями среды. Но, если частицы малы по сравнению с масштабом турбулентности, то они будут стремиться следовать за всеми компонентами турбулентного движения.

Анализ последних исследований и публикаций.

В отечественной и зарубежной литературе сведения по динамике смеси дискретных частиц произвольного размера и концентрации с газом практически отсутствуют. Одним из подходов решения задачи при больших концентрациях мелких

частиц является представление такой смеси как неньютоновской жидкости [6-10].

Для газоаэрозольных потоков в каналах вентиляционных систем можно положить вполне логические допущения [11-15]:

- турбулентность в потоке является однородной и стационарной;
- частица имеет сферическую форму и обладает настолько малыми размерами, что ее движение относительно окружающей среды подчиняется Стоксовому закону сопротивления;
- частица мала по сравнению с наименьшей длиной волны, имеющей место при турбулентном движении;
- любая внешняя сила, действующая на частицу, связана с потенциальным полем, например, гравитационным.

При таких допущениях поведение сферической частицы в газе, движущемся с переменной скоростью, описывается уравнением Бассе [1, 2, 5, 11, 12]

$$\begin{aligned} \frac{\pi}{6} d^3 \rho_p \frac{dv_p}{dt} = 3\pi\mu d(v_f - v_p) + \\ + \frac{\pi}{6} d^3 \rho_f \frac{dv_f}{dt} + \frac{1}{2} \frac{\pi}{6} d^3 \rho_f \left(\frac{dv_f}{dt} - \frac{dv_p}{dt} \right) + (1) \\ + \frac{3}{2} d^2 \sqrt{\pi \rho_f \mu} \int_{t_0}^t \frac{dv_f' - dv_p'}{\sqrt{t-t'}} dt' + F_n, \end{aligned}$$

t - время; t_0 - начальный момент времени; индекс f соответствует основной среде, а индекс p - частице; μ - динамическая вязкость среды; d - диаметр частицы; ρ_p и ρ_f - плотности частиц и газового потока; v_p - скорость дискретной частицы; v_f - скорость частиц основной среды в окрестности дискретной частицы, достаточно удаленной от нее, чтобы не испытывать возмущений, связанных с относительным движением этой частицы.

Член в левой части представляет собой силу, необходимую для ускорения частицы. Первый член в правой части - сила вязкого сопротивления, определяемая законом Стокса. Второй член связан с градиентом давления в среде, окружающей частицу, который обусловлен ускорением жидкости. Третий член характеризует силу, приводящую к ускорению кажущейся массы частицы относительно окружающей среды. Четвертый член - так называемая «сила Бассе» - учитывает влияние отклонения картины течения от установившегося состояния. Последний член F_n представляет собой внешнюю потенциальную силу. Второй, третий и четвертый члены в правой части уравнения приобретают важное значение только в том случае, когда плотность среды сравнима с плотностью частицы или же превышает ее. Когда внешняя потенциальная сила имеет постоянную величину,

например, в случае гравитационного поля, при котором соответствующая компонента равняется весу за вычетом подъемной силы, то движение частицы в установившемся состоянии представляет собой суперпозицию постоянной скорости, равной скорости свободного падения в окружающей среде, и скорости, накладываемой движением среды. В силу линейности уравнения (1) скорость свободного падения не зависит от движения жидкости.

Уравнение Бассе наглядно показывает сложность начальных этапов диффузии аэрозолей, что обусловлено существенной неоднородностью физических свойств потока по длине и сечению каналов, переменным коэффициентом диффузии, разгоном дискретных частиц до скорости основного потока и т.д. Существующие методики расчета диффузионных процессов [1, 7, 13, 14] не учитывают длительности начальных этапов и закономерностей их протекания.

Цель работы.

Целью данной работы является анализ начальных этапов диффузии аэрозолей в турбулентных газовых потоках каналов вентиляционных систем и оценка их длительности.

Материалы и результаты исследования.

Поскольку в большинстве случаев интересует движение дискретной частицы, обусловленное движением окружающей среды, то влияние внешних сил можно не учитывать, а уравнение (1) привести к виду

$$\frac{dv_p}{dt} + av_p = av_f + b \frac{dv_f}{dt} + c \int_{t_0}^t \frac{dv_f' - dv_p'}{\sqrt{t-t'}} dt', \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} a = \frac{36\mu}{(2\rho_p + \rho_f)d^2}, \quad b = \frac{3\rho_f}{2\rho_p + \rho_f}, \\ c = \frac{18}{(2\rho_p + \rho_f)d} \sqrt{\frac{\rho_f \mu}{\pi}}. \end{aligned}$$

При допущении сферической формы частицы согласно уравнению (2) можно рассчитать время разгона частицы стоксовыми силами в зависимости от ее размера, плотности и скорости газового потока. Это время определяет так называемый индукционный период в процессе диффузии аэрозолей.

В качестве характеристик турбулентного движения будем также рассматривать коэффициенты временной Лагранжевой корреляции для промежутка времени τ

$$R_{Lp}(\tau) = \frac{\langle v_p'(t) v_p'(t+\tau) \rangle}{\langle v_p'^2 \rangle}, \quad (3)$$

$$R_{Lf}(\tau) = \frac{\langle v_f'(t) v_f'(t+\tau) \rangle}{\langle v_f'^2 \rangle} \quad (4)$$

и Лагранжевы функции энергетического спектра

$$\langle v_p'^2 \rangle = \int_0^\infty E_{Lp}(n) dn, \quad (5)$$

$$\langle v_f'^2 \rangle = \int_0^\infty E_{Lf}(n) dn. \quad (6)$$

Здесь v_p', v_f' - пульсационные составляющие скоростей дискретной частицы и основного потока, а индекс $\langle \dots \rangle$ обозначает осреднение пульсирующей в турбулентном потоке величины.

Отметим, что коэффициент временной Лагранжевой корреляции связан с Лагранжевой функцией энергетического спектра зависимостью

$$R_{Lp}(t) = \frac{1}{\langle v_p'^2 \rangle} \int_0^\infty E_{Lp}(n) \cos(2\pi nt) dn, \quad (7)$$

$$R_{Lf}(t) = \frac{1}{\langle v_f'^2 \rangle} \int_0^\infty E_{Lf}(n) \cos(2\pi nt) dn, \quad (8)$$

Добавим, что для выполнения количественных оценок коэффициент Лагранжевой корреляции основного потока обычно представляют в виде приближенной экспоненциальной зависимости [1, 2, 11]

$$R_{Lf}(t) = \exp\left(-\frac{t}{T_L}\right), \quad (9)$$

где T_L - Лагранжев интегральный временной масштаб, который рассматривается как мера наиболее длительного интервала времени, в течении которого частица, в среднем, испытывает перемещение в данном направлении.

Связывая Лагранжевы переменные, запишем выражения для Лагранжевых координат через функцию энергетического спектра

$$\langle y_p^2 \rangle = \int_0^\infty E_{Lp}(n) \frac{1 - \cos(2\pi nt)}{4\pi^2 n^2} dn, \quad (10)$$

$$\langle y_f^2 \rangle = \int_0^\infty E_{Lf}(n) \frac{1 - \cos(2\pi nt)}{4\pi^2 n^2} dn. \quad (11)$$

Так как коэффициент турбулентной диффузии [1, 2, 11]

$$D_e = \langle y(t) v'(t) \rangle, \quad (12)$$

то для дискретной частицы и среды имеем

$$D_{ep} = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \langle y_p^2(t) \rangle = \int_0^\infty E_{Lp}(n) \frac{\sin(2\pi nt)}{2\pi n} dn, \quad (13)$$

$$D_{ef} = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \langle y_f^2(t) \rangle = \int_0^\infty E_{Lf}(n) \frac{\sin(2\pi nt)}{2\pi n} dn. \quad (14)$$

При малом времени диффузии

$$D_{ep} = t \int_0^\infty E_{Lp}(n) = \langle v_p'^2 \rangle t,$$

$$D_{ef} = t \int_0^\infty E_{Lf}(n) = \langle v_f'^2 \rangle t,$$

откуда

$$D_{ep}/D_{ef} = \langle v_p'^2 \rangle / \langle v_f'^2 \rangle. \quad (15)$$

При большом времени диффузии основная роль принадлежит низкочастотным компонентам движения

$$D_{ep} = \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^\infty E_{Lp}(n) \frac{\sin(2\pi nt)}{2\pi n} dn =$$

$$= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \frac{\sin \theta}{\theta} E_{Lp}\left(\frac{\theta}{2\pi t}\right) d\theta = \frac{1}{4} E_{Lp}(0), \quad (16)$$

и аналогично

$$D_{ef} = \frac{1}{4} E_{Lf}(0). \quad (17)$$

Согласно выражениям (16) и (17) коэффициент диффузии пропорционален той доле кинетической энергии, которая приходится на турбулентное движение с нулевой частотой. Но при нулевой частоте никакого различия между движением частицы и движением среды не существует. Следовательно, с физической точки зрения, представляется весьма логичным, что коэффициенты диффузии для дискретной частицы и для частиц основного потока должны быть одинаковыми. Поэтому

$$\frac{D_{ep}}{D_{ef}} = \frac{E_{Lp}(0)}{E_{Lf}(0)} = 1. \quad (18)$$

Отметим, что понятия «малого» и «большого» времени диффузии являются относительными и должны определяться в каждом конкретном случае. Формула (18) справедлива для бесконечно большого времени диффузии. Поскольку каналы реальных вентиляционных систем имеют конечные размеры, то в большинстве случаев будет иметь место различие значений коэффициентов турбулентной диффузии.

Произведем оценку длительности индукционного периода, когда происходит разгон частиц стоковыми силами до скорости основного потока. Для этого в уравнении (2) пренебрежем последним членом (силой Бассе). Данное допущение можно считать вполне правомерным, поскольку определяющими являются силы сопротивления и силы, связанные с градиентом давления и с относительным ускорением массы. Тогда имеем

$$\frac{dv_p}{dt} + av_p = av_f + b \frac{dv_f}{dt}. \quad (19)$$

Здесь постоянные коэффициенты определяются согласно уравнению (2). Преобразуем выражение для коэффициента b к виду

$$b = \frac{3\rho_f}{2\rho_p + \rho_f} = \frac{\rho_f}{\rho_p} \frac{3}{2 + \rho_f/\rho_p}.$$

Поскольку для аэрозольных выбросов в воздушных потоках величина ρ_f/ρ_p имеет порядок 10^{-3} , то можно положить $b \approx 0$. Поэтому упростим уравнение (19) к виду

$$\frac{1}{a} \frac{dv_p}{dt} + v_p = v_f. \quad (20)$$

и проинтегрируем при начальном условии $t = 0, v_p = 0$ для скорости основного потока $v_f = u_0 = \text{const}$. Получаем решение (20)

$$v_p = u_0(1 - \exp(-at)),$$

из которого имеем

$$\frac{v_p^2}{v_f^2} = \frac{[u_0(1 - \exp(-at))]^2}{u_0^2} = (1 - \exp(-at))^2. \quad (21)$$

Вполне уместным допустить

$$\left\langle v_p'^2 \right\rangle / \left\langle v_f'^2 \right\rangle \approx v_p^2 / v_f^2.$$

В силу этого с учетом (15) из выражения (9) имеем

$$\begin{aligned} D_{ep}/D_{ef} &= \left\langle v_p'^2 \right\rangle / \left\langle v_f'^2 \right\rangle \approx (1 - \exp(-at))^2 = \\ &= 1 - 2\exp(-at) - \exp(-2at). \end{aligned} \quad (22)$$

Согласно выражения (22) можно оценить время индукционного периода по аналогии с оценкой длительности переходных процессов в системах автоматического регулирования [16-18]. Если

считать окончание индукционного периода по величине

$$\exp(-at) = 0,05,$$

принятой в большинстве технических расчетов [19-22], то время периода составит

$$T_u = 3/a.$$

Подставляя сюда из (3) выражение для коэффициента a , имеем

$$T_u = \frac{(2\rho_p + \rho_f)d^2}{12\mu}. \quad (23)$$

Преобразовав (23) и учитывая, что ρ_f/ρ_p имеет порядок 10^{-3} , то устанавливаем следующую зависимость для времени индукционного периода

$$T_u = \frac{\rho_p d^2}{6\mu}. \quad (24)$$

На рис.1 показана зависимость времени индукционного периода от диаметра частиц при различных значениях их плотности. Как можно видеть, индукционный период существенно зависит от диаметра частиц. Несмотря на то, что этот период является сравнительно непродолжительным (сотые секунды), тем не менее в течении индукционного периода частица в высокоскоростном потоке может пройти значительное расстояние.

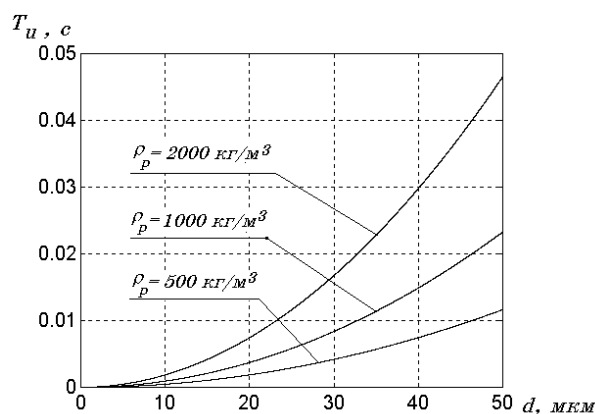


Рис. 1. К определению времени индукционного периода

После окончания индукционного периода энергетические спектры частиц и основного потока не являются одинаковыми, поэтому будут различными и коэффициенты диффузии. Следовательно, будет иметь место диффузионный период при переменном коэффициенте диффузии аэрозольной частицы. Представляя коэффициент Лагранжевой корреляции для газового потока в виде

экспоненциальной зависимости (9), будем иметь соответствующий энергетический спектр в зависимости от частоты пульсаций ω

$$E_{L_f}(n) = 4 \langle v_f'^2 \rangle \frac{T_L}{1 + \omega^2 T_L^2}.$$

С учетом уравнения (19) энергетический спектр для дискретных частиц

$$E_{L_p}(n) = 4 \langle v_f'^2 \rangle \frac{a^2 + b^2 \omega^2}{a^2 + \omega^2} \frac{T_L}{1 + \omega^2 T_L^2}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} \langle v_p'^2 \rangle &= \int_0^\infty E_{L_p}(n) dn = \\ &= \frac{2}{\pi} \langle v_f'^2 \rangle T_L \int_0^\infty \frac{a^2 + b^2 \omega^2}{(a^2 + \omega^2)(1 + \omega^2 T_L^2)} d\omega = \\ &= \frac{a T_L + b^2}{a T_L + 1} \langle v_f'^2 \rangle, \end{aligned}$$

а согласно (7) получаем

$$\begin{aligned} R_{L_p}(t) &= \frac{1}{\langle v_p'^2 \rangle} \int_0^\infty E_{L_p}(n) \cos(\omega t) dn = \\ &= \frac{2}{\pi} \frac{\langle v_f'^2 \rangle}{\langle v_p'^2 \rangle} T_L \int_0^\infty \frac{a^2 + b^2 \omega^2}{(a^2 + \omega^2)(1 + \omega^2 T_L^2)} d\omega = \\ &= \frac{\langle v_f'^2 \rangle}{\langle v_p'^2 \rangle} \frac{1}{a^2 T_L^2 - 1} \left[(a^2 T_L^2 - b^2) \exp\left(-\frac{t}{T_L}\right) - \right. \\ &\quad \left. - a T_L (1 - b^2) \exp(-at) \right] \end{aligned}$$

По коэффициенту Лагранжевой корреляции можно определить коэффициент диффузии (см. (3), (5) и (13))

$$\begin{aligned} D_{ep} &= \langle v_p'^2 \rangle \int_0^t R_{L_p}(\tau) d\tau = \langle v_f'^2 \rangle T_L \times \\ &\times \left[1 - \frac{(a^2 T_L^2 - b^2) \exp(-t/T_L) - (1 - b^2) \exp(-at)}{a^2 T_L^2 - 1} \right]. \end{aligned}$$

Так как

$$\begin{aligned} D_{ef} &= \langle v_f'^2 \rangle \int_0^t R_{L_f}(\tau) d\tau = \\ &= \langle v_f'^2 \rangle T_L [1 - \exp(-t/T_L)] \end{aligned} \quad (25)$$

то после преобразований получим

$$\frac{D_{ep}}{D_{ef}} = 1 + \frac{1 - b^2}{a^2 T_L^2 - 1} \frac{\exp(-at) - \exp(-t/T_L)}{1 - \exp(-t/T_L)}.$$

Поскольку $\rho_f / \rho_p \ll 1$, то полагаем $b \approx 0$ и

$$a = 18\mu / (\rho_p d^2). \quad (26)$$

Тогда имеем

$$\frac{D_{ep}}{D_{ef}} = 1 + \frac{\exp\left(-\frac{18\mu t}{\rho_p d^2}\right) - \exp(-t/T_L)}{\left(\left(\frac{18\mu T_L}{\rho_p d^2}\right)^2 - 1\right)(1 - \exp(-t/T_L))}. \quad (27)$$

Произведем оценку Лагранжева интегрального масштаба времени. На основании (18) при $t \rightarrow \infty$

$$T_L = D_{ef} / \langle v_f'^2 \rangle,$$

а учитывая, что степень турбулентности

$$\varepsilon = \sqrt{\langle v_f'^2 \rangle} / u_0, \text{ получим}$$

$$T_L = \frac{D_{ef}}{\varepsilon^2 u_0^2}. \quad (28)$$

Здесь u_0 - средняя скорость потока в канале.

Выполним преобразования

$$T_L = \frac{1}{\varepsilon^2} \frac{D_{ef}}{\nu} \frac{\nu}{u_0 d_z} \frac{d_z}{u_0} = \frac{1}{\varepsilon^2} \frac{D_{ef}}{\nu} \frac{1}{\text{Re}} t_0,$$

где $\text{Re} = u_0 d_z / \nu$ - число Рейнольдса; $\nu = \mu / \rho_f$ - кинематическая вязкость основного потока; d_z - гидравлический диаметр канала; $t_0 = d_z / u_0$ - масштаб времени, численно равный времени прохождения частицей основного потока пути, равного гидравлическому диаметру канала.

Рассматривая диффузионное число Пекле [5, 14]

$$Pe_\theta = \text{Re} \frac{\nu}{D_{ef}}, \quad (29)$$

получим

$$\frac{T_L}{t_0} = \frac{1}{\varepsilon^2 Pe_\theta}. \quad (30)$$

На рис.2 показана зависимость безразмерного Лагранжева интегрального масштаба времени от степени турбулентности для диапазона диффузионных чисел Пекле 300...400, являющегося рабочим для систем вентиляции промышленных предприятий, химических производств и атомных

станций. Следует отметить, что для степени турбулентности $\varepsilon=0,05$, величина Лагранжева интегрального масштаба времени составляет $T_L = (1 \dots 1,33)t_0$, т.е. приближенно равна времени прохождения частицей основного потока пути, равного гидравлическому диаметру канала.

Если подставить (30) в (27) и ввести в рассмотрение безразмерное время

$$\bar{t} = t/t_0, \quad (31)$$

то получим

$$\frac{D_{ep}}{D_{ef}} = 1 + \frac{\exp\left(-\frac{18\mu\bar{t}_0}{\rho_p d^2}\right) - \exp(-\varepsilon^2 Pe_o \bar{t})}{\left(\left(\frac{18\mu\bar{t}_0}{\rho_p d^2 \varepsilon^2 Pe_o}\right)^2 - 1\right)(1 - \exp(-\varepsilon^2 Pe_o \bar{t}))}$$

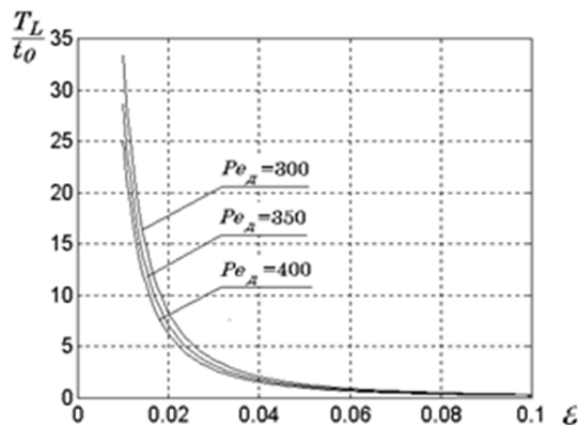


Рис. 2. К определению Лагранжева интегрального масштаба времени

Учитывая, что $Re = u_0 d_c / \nu$; $t_0 = d_c / u_0$ и $\mu = \nu / \rho_f$, имеем

$$\frac{D_{ep}}{D_{ef}} = 1 + \frac{\exp\left(-\frac{18}{Re} \left(\frac{d_c}{d}\right)^2 \frac{\rho_f}{\rho_p} \bar{t}\right) - \exp(-\varepsilon^2 Pe_o \bar{t})}{\left(\left(\frac{18}{\varepsilon^2 Re Pe_o} \left(\frac{d_c}{d}\right)^2 \frac{\rho_f}{\rho_p}\right)^2 - 1\right)(1 - \exp(-\varepsilon^2 Pe_o \bar{t}))} \quad (32)$$

Как видно, при $\bar{t} \rightarrow \infty$ согласно выражению (32) имеем $D_{ep} = D_{ef}$, что полностью соответствует результату (18).

Согласно (32) максимальное безразмерное время переходного периода в диффузионном процессе, когда коэффициент диффузии аэрозольной

частицы приближается к коэффициенту диффузии основного потока, составит

$$\bar{T}_{nn} = 3 \max\left\{\left(\frac{1}{\varepsilon^2 Pe_o}\right); \left(\frac{Re}{18} \left(\frac{d}{d_c}\right)^2 \frac{\rho_p}{\rho_f}\right)\right\}. \quad (33)$$

Данное выражение показывает, что время переходного периода существенно зависит от ряда факторов и подлежит оценке в каждом конкретном случае.

На рис.3 показана зависимость максимального безразмерного времени переходного периода от отношения диаметра частицы к гидравлическому диаметру канала для различных соотношений плотности частиц и газового потока. Расчеты выполнены для степени турбулентности $\varepsilon=0,05$, диффузионного числа Пекле $Pe_o=350$, числа Рейнольдса $Re=5 \cdot 10^6$. Анализ зависимостей показывает, что с уменьшением плотности дискретных частиц время переходного периода не зависит от диаметра частицы.

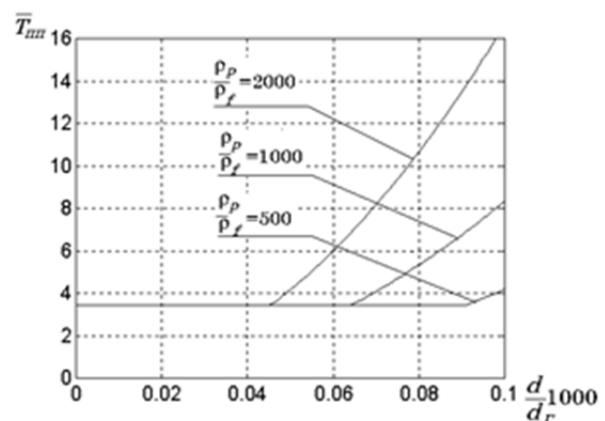


Рис. 3. К определению максимального времени переходного периода

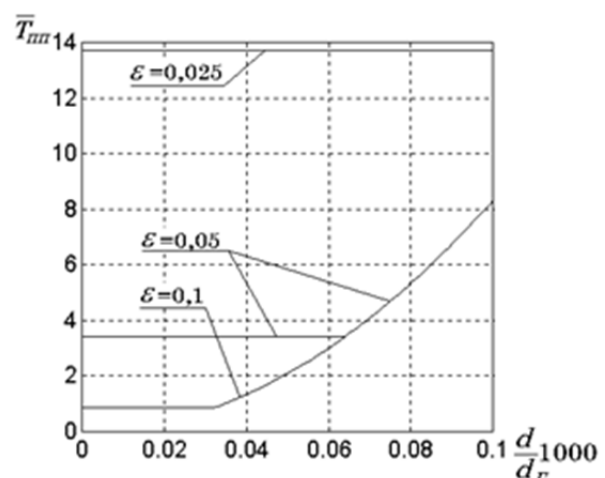


Рис. 4. К определению максимального времени переходного периода

На рис.4 показана зависимость максимального безразмерного времени переходного периода от отношения диаметра частицы к гидравлическому диаметру канала для различной степени турбулентности потока. Расчеты выполнены для отношения плотностей $\rho_p/\rho_f = 10^3$, диффузионного числа Пекле $Pe_\delta = 350$, числа Рейнольдса $Re = 5 \cdot 10^6$. Как видно, турбулизация потока уменьшает время переходного периода. Интересным является фактор независимости времени данного периода от диаметра частиц при малой степени турбулентности.

Выводы.

Таким образом, процесс диффузии аэрозолей носит сложный характер и условно разделяется на три периода:

1. Индукционный период, при котором происходит разгон частиц стоковыми силами от нулевой скорости до скорости основного потока. Диффузионный процесс в этот период практически отсутствует, а длительность периода оценивается выражением (24).

2. Переходной период, при котором диффузионный процесс происходит при переменном коэффициенте диффузии. Определить коэффициент диффузии аэрозольных частиц приближенно можно по выражению (32), максимальное время переходного периода устанавливается зависимостью (33).

3. Диффузионный процесс аэрозольных частиц при постоянном коэффициенте диффузии, который можно исследовать известными методами [1, 5, 7, 11].

В заключении необходимо отметить следующее. Поскольку процесс диффузии аэрозольных частиц носит достаточно сложный характер, то при организации контроля концентрации аэрозольных выбросов следует учитывать, как длину пути выравнивания концентрации, так и длину, проходимую частицами во время начальных этапов: индукционного и переходного периода. В случае, когда длина канала относительно невелика или средства контроля концентрации установлены на недостаточном большом расстоянии от источника выбросов, результаты контроля должны быть скорректированы.

Л и т е р а т у р а

- Недопекин Ф.В., Коваленко А.А., Соколов В.И. Диффузионные процессы в стационарных газовых потоках. – Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2007. – 224 с.
- Хинце И.О. Турбулентность. - М.: Физматгиз, 1963. - 680 с.
- Калюжный Г.С., Коваленко А.А., Соколов В.И., Минин С.А. Диффузия газов и аэрозолей в турбулентных потоках. – Луганск: ВУГУ, 1999. – 100 с.
- Андрійчук Н.Д., Иващенко Е.А., Коваленко А.А., Соколов В.И. Термодинамика для инженеро-строителей. – Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2005. – 304 с.
- Соколов В.И., Коваленко А.А., Калюжный Г.С. и др. Инженерные задачи диффузии примеси в потоке. – Луганск: ВУГУ, 2000. – 168 с.
- Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. - М.: Наука, 1987. - 840 с.
- Андрійчук Н.Д., Соколов В.И., Коваленко А.А., Дядичев К.М. Пути совершенствования систем теплоснабжения. – Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2003. – 244 с.
- Соколов В.И., Рассказова Ю.Б. Исследование течения жидкости в микросторах с граничным изменением вязкости // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. - 2016. - № 2 (226). – С. 20 - 25.
- Соколов В.И., Кроль О.С., Спіфанова О.В. Гідравліка. – Северодонецк: СНУ ім. В. Даля. – 2017. – 160 с.
- Коваленко А.А., Соколов В.И., Дымнич А.Х., Уваров П.Е. Основы технической механики жидкостей и газов: Учебное пособие для вузов. - Луганск: Издательство ВУГУ, 1998. - 272 с.
- Недопекин Ф.В., Коваленко А.А., Соколов В.И. и др. Основы механики сплошных сред. – Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2010. – 277 с.
- Соколов В.И. Аэродинамика газовых потоков в каналах сложных вентиляционных систем. – Луганск: ВУГУ, 1999. – 200 с.
- Соколов В.И. Измерение концентрации примеси в каналах вентиляционных систем // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. - 2015. - № 5 (222). – С. 97 - 100.
- Соколов В.И. Критериальный анализ диффузионных процессов в системах вентиляции // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. - 2015. - № 5 (222). – С. 101 - 104.
- Соколов В.И. Моделирование газодинамических характеристик вентиляционных систем на основе их объектной декомпозиции // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. - 2016. - № 5 (226). – С. 86 - 89.
- Sokolov V., Rasskazova Y. Automation of control processes of technological equipment with rotary hydraulic drive // Eastern-EuropeJournal of Enterprise Technologies. Volume 2, Issue 2, 2015, Pages 44-50.
- Соколова Я. В., Таванюк Т.Я., Соколов В.И. Нелинейная математическая модель электрогидравлического следящего привода с дроссельным регулированием // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. - 2010. - № 10 (152). – С. 168 – 175.
- Коваленко А. А., Соколов В.И., Уваров П.Е., Пазин В.В. Основы объемного гидравлического привода строительных и дорожных машин. - Луганск: ДонГАСА. – 1999. – 137 с.
- Соколова Я.В., Азаренко Н.Г., Соколов В.И. Синтез системы автоматического управления оборудованием для механической обработки материалов с гидравлическим приводом // Восточно-европейский журнал передовых технологий. - Харьков. – 2014. – № 2/2 (68). – С. 56-60.
- Соколов В. И., Таванюк Т. Я. Определение передаточных функций электрогидравлического следящего привода оборудования для обработки давлением // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. – 2011. – №. 1(155). – С. 208 - 216.
- Sokolova Ya., Krol O., Tavanuk T., Sokolov V. Transfer function of the automatic electrohydraulic drive // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 15. – N 2. – 2015. – Lublin - Rzeszow, Poland. - pp. 3-8.

22. Соколов В.І., Рассказова Ю.Б. Автоматизація процесів керування технологічним обладнанням з гідроприводом оберального руху // Східно-європейський журнал передових технологій. - 2016. - № 2/2 (80). - С.44 - 50.

References

1. Nedopekin F.V., Kovalenko A.A., Sokolov V.I. Dif-fuzionnyie protsessy v statsionarnyih gazovyih potokah. - Lugansk: VNU im. V. Dalia, 2007. - 224 s.
2. Hintse I.O. Turbulentnost. - M.: Fizmatgiz, 1963. - 680 s.
3. Kalyuzhnyi G.S., Kovalenko A.A., Sokolov V.I., Mi-nin S.A. Diffuziya gazov i aerezoley v turbulent-nyih potokah. - Lugansk: VUGU, 1999. - 100 s.
4. Andriychuk N.D., Ivaschenko E.A., Kovalenko A.A., Sokolov V.I. Termodinamika dlya inzhenerov-stroiteley. - Lugansk: VNU im. V. Dalia, 2005. - 304 s.
5. Sokolov V.I., Kovalenko A.A., Kalyuzhnyi G.S. i dr. Inzhenernyie zadachi diffuzii primesi v potoke. - Lugansk: VUGU, 2000. - 168 s.
6. Loytsyanskiy L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza. - M.: Nauka, 1987. - 840 s.
7. Andriychuk N.D., Sokolov V.I., Kovalenko A.A., Dya-dichev K.M. Puti sovershenstvovaniya sistem teplo-snabzheniya. - Lugansk: VNU im. V. Dalia, 2003. - 244 s.
8. Sokolov V.I., Rasskazova Yu.B. Issledovanie teche-niya zhidkosti v mikroazorah s granichnym izmene-niem vyazkosti // Visn. Shidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dalia. - 2016. - № 2 (226). - S. 20 - 25.
9. Sokolov V.I., Krol' O.S., Yepifanova O.V. Gidravlika. - Syevyerodonec'k: SNU im. V. Dalia. - 2017. - 160 s.
10. Kovalenko A.A., Sokolov V.I., Dyimnich A.H., Uvarov P.E. Osnovy tehnikeskoj mehaniki zhidkostey i ga-zov: Uchebnoe posobie dlya vuzov. - Lugansk: Izda-telstvo VUGU, 1998. - 272 s.
11. Nedopekin F.V., Kovalenko A.A., Sokolov V.I. i dr. Osnovy mehaniki sploshnyih sred. - Lugansk: VNU im. V. Dalia, 2010. - 277 s.
12. Sokolov V.I. Aerodinamika gazovyih potokov v kanalah slozhnyih ventilyatsionnyih sistem. - Lugansk: VUGU, 1999. - 200 s.
13. Sokolov V.I. Izmerenie kontsentratsii primesi v kanalah ventilyatsionnyih sistem // Visn. Shidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dalia. - 2015. - № 5 (222). - S. 97 - 100.
14. Sokolov V.I. Kriterialnyy analiz diffuzionnyih protsessov v sistemah ventilyatsii // Visn. Shidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dalia. - 2015. - № 5 (222). - S. 101 - 104.
15. Sokolov V.I. Modelirovanie gazodinamicheskikh harakteristik ventilyatsionnyih sistem na osnove ih ob'ektnoy dekompozitsii // Visn. Shidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dalia. - 2016. - № 5 (226). - S. 86 - 89.
16. Sokolov V., Rasskazova Y. Automation of control processes of technological equipment with rotary hydraulic drive // Eastern-Europe Journal of Enterprise Technologies. Volume 2, Issue 2, 2015, Pages 44-50.
17. Sokolova Ya. V., Tavanyuk T.Ya., Sokolov V.I. Nelineynaya matematicheskaya model elektrogidravlichesko sledyaschego privoda s drosselnyim regulirovaniem // Visn. Shidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dalia. - 2010. - № 10 (152). - S. 168 - 175.
18. Kovalenko A. A., Sokolov V.I., Uvarov P.E., Pazin V.V. Osnovy ob'emnoy gidravlicheskoj privoda stroitelnyih i dorozhnyih mashin. - Lugansk: DonGASA. - 1999. - 137 s.
19. Sokolova Ya.V., Azarenko N.G., Sokolov V.I. Sintez sistem avtomaticheskogo upravleniya oborudovaniem dlya mehanicheskoy obrabotki materialov s gidravlicheskim privodom // Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovyih tehnologiy. - Harkov. - 2014. - № 2/2 (68). - S. 56-60.
20. Sokolov V. I., Tavanyuk T. Ya. Opredelenie peredatochnyih funktsiy elektrogidravlichesko sledyaschego privoda oborudovaniya dlya obrabotki davleniem // Visn. Shidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dalia. - 2011. - № 1(155). - S. 208 - 216.
21. Sokolova Ya., Krol O., Tavanuk T., Sokolov V. Transfer function of the automatic electrohydraulic drive // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. - Vol. 15. - N 2. - 2015. - Lublin - Rzeszow, Poland. - pp. 3-8.
22. Sokolov V.I., Rasskazova Yu.B. Avtomaty`zaciya procesiv keruvannya tex-nologichny`m obladnannnyam z gidropry`vodom obertal`nogo ruxu // Sxidno-yeuropejs`ky`j zhurnal peredovy`x tehnologij. - 2016. - № 2/2 (80). - S.44 - 50.

Соколов В.І. Дослідження початкових етапів дифузії аерозолів в каналах вентиляційних систем.

Розглянуті питання дифузії аерозолів в турбулентних газових потоках каналів вентиляційних систем промислових підприємств.

Поведінку дискретної сферичної частки в однорідному турбулентному потоці описано рівнянням Бассе. В якості характеристик турбулентного руху розглянуті коефіцієнти часової Лагранжевої кореляції і Лагранжеві функції енергетичного спектру. Для виконання кількісних оцінок коефіцієнт часової Лагранжевої кореляції основного потоку представлений у вигляді приблизної експоненціальної залежності.

Показано, що процес дифузії аерозолів носить складний характер та умовно розподіляється на три періоди: індукційний період, при якому відбувається розгін часток Стоксовими силами від нульової швидкості до швидкості основного потоку, а дифузійний процес в цей період практично відсутній; перехідний період, при якому дифузійний процес відбувається при змінному коефіцієнті дифузії; а також дифузійний процес аерозольних часток при постійному коефіцієнті дифузії, який можна досліджувати відомими методами.

Виконана оцінка тривалості індукційного і перехідного періодів дифузійного процесу. Отримано вираз для приблизного визначення коефіцієнта дифузії аерозольних часток.

Оскільки процес дифузії аерозольних часток носить достатньо складний характер, то при організації контролю характеристик аерозольних викидів, зокрема, їх концентрації, слід враховувати, як довжину шляху вирівнювання концентрації, так і довжину, що проходять частки під час початкових етапів: індукційного та перехідного періодів. У випадку, коли довжина каналу відносно невелика або засоби контролю концентрації встановлені на недостатньо великій відстані від джерела викидів, результати контролю повинні бути скореговані.

Результати досліджень рекомендовані для використання при розробці систем контролю характеристик газоповітряних викидів промислових вентиляційних систем.

Ключові слова: вентиляційна система, турбулентний потік, дифузійний процес, аерозоль, коефіцієнт дифузії, індукційний період дифузії, перехідний період дифузії.

Sokolov V.I. Research of initial stages of aerosols diffusion in the channels of ventilation systems.

The problems of diffusion of aerosols in turbulent gas streams of ducts of ventilation systems of industrial enterprises are considered.

The behavior of a discrete spherical particle in a uniform turbulent flow is described by the Basset equation. As the characteristics of turbulent motion, the coefficients of the time Lagrangian correlation and Lagrangian functions of the energy spectrum are considered. To carry out quantitative estimates, the coefficient of the temporal Lagrangian correlation of the main flow is represented as an approximate exponential dependence.

It is shown that the process of diffusion of aerosols is of a complex nature and conditionally divided into three periods: the induction period at which the particles are dispersed by Stokes forces from zero velocity to the main flow velocity, and the diffusion process is practically absent in this period; transition period at which the diffusion process occurs at a variable diffusion coefficient; as well as the diffusion process of aerosol particles with a constant diffusion coefficient, which can be investigated by known methods.

The duration of the induction and transition periods of the diffusion process is estimated. It is obtained by an expression for the approximate determination of the diffusion coefficient of aerosol particles.

Since the process of diffusion of aerosol particles is quite complex, when organizing the control of the characteristics of aerosol emissions, in particular, their concentration, one should take into account both the length of the concentration equalization path and the length traveled by the particles during the initial stages: induction and transition period. In the case where the length of the channel is relatively small or the concentration control means are installed at a sufficiently short distance from the source of emissions, the results of the control should be corrected.

The results of the research are recommended for use in the development of control systems for the characteristics of gas-air emissions from industrial ventilation systems.

Keywords: ventilation system, turbulent stream, diffusion process, aerosol, diffusion coefficient, induction diffusion period, transition diffusion period.

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

Рецензент: д.т.н., проф. **Чернецька-Білецька Н.Б.**

Стаття подана 07.09.2016

УДК 621.646-62-82

ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ СЛЕДЯЩИХ ПРИВОДОВ

Таванюк Т.Я., Николаенко А.П., Романченко А.В., Шумакова Т.А.

ESTIMATION OF THE ADEQUACY OF MATHEMATICAL MODELS OF CHARACTERISTICS OF ELECTROHYDRAULIC SERVO DRIVES

Tavanyuk T.Y., Nikolaenko A.P., Romanchenko A.V., Shumakova T.A.

В работе представлен автоматизированный стенд экспериментальных исследований статических и динамических характеристик электрогидравлических следящих приводов технологического оборудования. Рассмотрена методика проведения эксперимента и проверки адекватности математических моделей характеристик приводов.

Ключевые слова: адекватность, математическая модель, динамические характеристики, экспериментальные исследования.

Постановка проблемы.

Проектирование высокотехнологического оборудования требует разработки адекватных математических моделей рабочих процессов, протекающих в них. В общем случае характеристики рабочих процессов являются нестационарными или периодически изменяются во времени.

Математическая модель никогда не бывает тождественна рассматриваемому объекту, не передает всех его свойств и особенностей. Она является приближенным описанием объекта и носит всегда приближенный характер. Точность соответствия определяется степенью соответствия, адекватности модели и объекта.

Анализ исследований и публикаций.

Аналитические методы определения статических и динамических характеристик электрогидравлических следящих приводов технологического оборудования не получили еще широкого распространения в связи со сложностью. На данный момент наиболее приемлемыми являются методы экспериментального определения динамических характеристик. Кроме того, полученные аналитически математические модели требуют проверки адекватности, которая может быть выполнена только на основе экспериментальной проверки [1].

Проверка адекватности математических моделей, как правило, осуществляется сопоставлением расчётных и экспериментальных

характеристик (величин, зависимостей), степень расхождения которых должна удовлетворять определённым критериям [2,3].

Проведение динамических испытаний является более трудоёмким процессом, чем статических, и получение достоверных сведений о динамических свойствах является более сложной задачей [8-10]. Это связано с корректным выбором испытательного сигнала, его реализацией при проведении эксперимента, оценкой динамической погрешности измерений и т.д. В полной мере отмеченные трудности относятся к исследованию динамических характеристик электрогидравлических следящих приводов технологического оборудования.

Целью работы является разработка автоматизированного стенда экспериментальных исследований статических и динамических характеристик электрогидравлических следящих приводов технологического оборудования, а также методики проведения эксперимента и проверки адекватности математических моделей характеристик приводов.

Результаты исследования.

Автоматизированный стенд экспериментальных исследований (АСЭИ) состоит из следующих основных узлов:

1. Электрогидравлический усилитель (ЭГУ), объединяющий электромеханический преобразователь (ЭМП), гидравлический усилитель (ГУ), распределительный и блокирующий золотники.

2. Гидравлический исполнительный орган, выполненный в виде гидроцилиндра с кривошипно-шатунным механизмом.

3. Устройство маслоснабжения, состоящее из электродвигателя, пластинчатого насоса, сетчатого фильтра, маслобака.

4. Механизм местного ручного управления, включающий приводной винт со штурвалом,

рукоятку переключателя, указатели положения, вал с кулачками.

5. Электрический датчик обратной связи дифференциально-трансформаторного типа с выпрямителем.

6. Контрольно-регулирующие устройства (манометр, дроссели, предохранительные клапаны, реле давления).

Все узлы собраны на плите, установленной на маслобаке, который одновременно является несущей конструкцией. Давление питания не менее 2 МПа, максимальный рабочий угол порота 90° , пределы изменения величины напряжения управления $0...48$ В, рабочая жидкость - масло «индустриальное 20» или «турбинное 22».

Привод может работать в режимах автоматического, дистанционного и местного ручного управления.

При автоматическом или дистанционном управлении на вход АСЭИ (ЭМП 26, рис. 1) от электронного регулирующего блока (ЭРБ) подается аналоговый сигнал в виде двух напряжений постоянного тока. При появлении сигнала небаланса (входные напряжения на катушках различны) сердечник под действием разности электромагнитных сил переместится. Величина перемещения сердечника 25 пропорциональна сигналу небаланса, а направление перемещения определяется знаком этого сигнала. Сердечник 25 ЭМП жестко связан с управляющей иглой 22 гидравлического усилителя мощности.

При перемещении управляющей иглы изменяются зазор и потери в нем, а следовательно, и давление в камере 20. Нарушается равновесие, и золотник 17 тоже перемещается до нового положения равновесия. Причем величина и направление смещения золотника 17 точно такие же, как и иглы 22, т.е. золотник следит за движением иглы.

При отсутствии сигнала небаланса на ЭМП сердечник 25 и игла 22 занимают среднее положение равновесия, при котором золотник 17 перекрывает каналы 39 и 40, ведущие исполнительного механизма 51. Поршень 49 неподвижен. При появлении сигнала небаланса на ЭМП золотник 17 смещается, и масло под давлением поступает в одну из полостей гидроцилиндра 51, а с другой сливается в бак. Поршень приходит в движение. Скорость его движения зависит от величины смещения золотника 17, степени открытия дросселя 14 и давления после насоса, устанавливаемого и поддерживаемого переливным клапаном 10 (он же предохранительный клапан всей системы). Для контроля давления в гидросистеме служит манометр М. Движение поршня через шатун 45 и кривошип 44 передается на вал 47, а через рычаг 41 - на регулирующий орган.

Таким образом, осуществляется преобразование входного электрического сигнала в механическое воздействие привода на

регулирующий орган при значительном усилении мощности.

Питание электромагнита осуществляется через микровыключатель МВ, переключение контактов 5 и 6 которого производится с помощью реле давления 7.

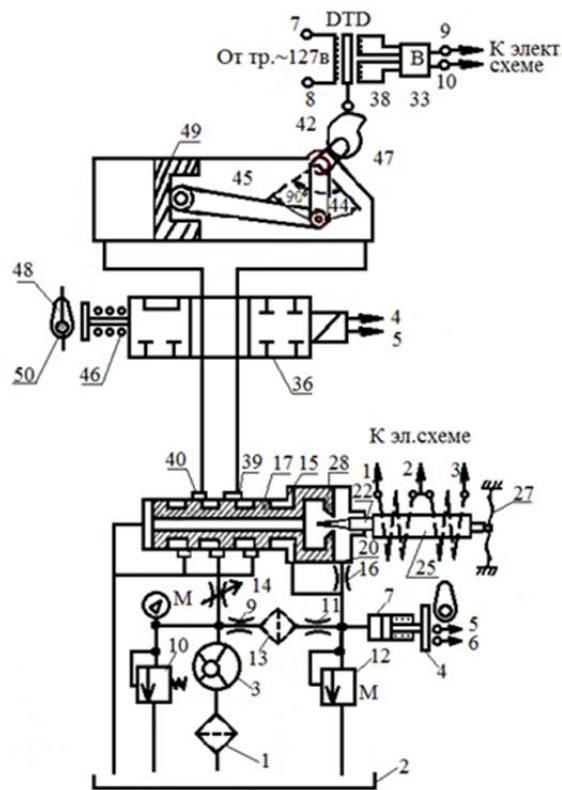


Рис. 1. Гидравлическая схема АСЭИ

Для подачи в ЭРБ электрического сигнала обратной связи служит дифференциально-трансформаторный датчик (ДТД) 35 с выпрямителем 33 (рис.1.). Сигнал датчика в пределах ± 12 В используется в ЭРБ для формирования закона регулирования, а также для подачи информации оператору о положении выходного рычага 41, а, следовательно, и регулирующего органа.

В АСЭИ управление приводом осуществляется дистанционно от специального электронного регулирующего блока ЭРБ, состоящего из блока питания, задатчика и усилителя. Таким образом, гидравлический привод будет обрабатывать входной электрический сигнал. Величина угла поворота выходного рычага 41 привода, направление его вращения и время движения (время обработки сигнала) определяются, во-первых, величиной и знаком сигнала управления и, во-вторых, конструктивными и динамическими данными привода и объекта регулирования.

АСЭИ предусматривает возможность получения статических характеристик, частотных (амплитудной частотной и фазовой частотной) и переходной характеристик привода. Для этого АСЭИ включает генератор входных испытательных

сигналов, подаваемых на вход ЭРБ, и регистрирующую аппаратуру - лучевой И-6 и шлейфовый Н-700 осциллографы.

Таким образом, экспериментальная установка и контрольно-измерительная аппаратура позволяет создавать переменные входные испытательные сигналы и регистрировать динамические характеристики привода оборудования

Одной из задач при проведении эксперимента является выбор испытательного сигнала [1, 8, 9]. Испытательный сигнал является одним из компонентов метода исследования (метода идентификации) и свойства сигнала при заданных требованиях к результату исследования определяются выбранным методом.

Требования к параметрам испытательных сигналов выражаются в требовании к их точностным и временным (спектральным) свойствам.

Характеристические сигналы можно рассматривать как предельные для семейства реальных сигналов при уменьшении (увеличении) некоторых параметров. Например, единичный ступенчатый сигнал может быть представлен как предел для сигнала с монотонным нарастанием и единичным установившимся значением, при стремлении к нулю фронта нарастания:

$$x(t, \Delta) = \begin{cases} t/\Delta, & 0 \leq t \leq \Delta; \\ 1, & t > \Delta, \end{cases} \quad (1)$$

где Δ - длительность фронта нарастания.

Другим приближением ступенчатого сигнала является сигнал с экспоненциальным нарастанием:

$$x(t) = (1 - \exp(-bt)), \quad (2)$$

где $b=1/T_2$; T_2 - постоянная времени входного сигнала.

Анализ характеристических сигналов, приведенных выше, с точки зрения простоты организации, точности воспроизведения и спектральных свойств показал, что для проводимых исследований наиболее подходящим сигналом является ступенчатый [1].

Немаловажным обстоятельством является также то, что в этом случае среднеквадратичная и максимальная погрешности преобразования любого монотонного ограниченного сигнала не превосходит соответствующих погрешностей преобразования ступенчатого сигнала. Поэтому, если исследуемая модель нестационарного рабочего процесса в приводе будет адекватна при испытаниях на ступенчатое воздействие, она заведомо будет адекватно описывать этот процесс и при любых других монотонных воздействиях, имеющих место на практике.

При исследовании динамических характеристик привода, кроме ступенчатого сигнала, в качестве испытательного сигнала использовался и гармонический сигнал. Это объясняется тем, что одними из наиболее важных характеристик привода оборудования являются его частотные характеристики.

Считаем гипотезу о нормальном распределении погрешностей выполненной.

Вычисляем наиболее вероятное среднее арифметическое значение:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (3)$$

где n - число параллельных опытов (не менее пяти);

x_i - значение измеряемой величины в i -ом опыте.

Среднеквадратичное отклонение результатов измерений:

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (4)$$

Обнаружение грубой погрешности осуществлялось при помощи критерия Граббса:

$$t_r = \frac{|x_n - \bar{x}|}{S_n}, \quad (5)$$

где x_n - проверяемое значение.

Если значение критерия Граббса больше табличного [5], то измерение отбрасывалось и повторно вычислялись $\bar{x}$ и S_n .

Число параллельных опытов невелико, поэтому случайная ошибка

$$\Delta x_c = \frac{t S_n}{\sqrt{n}}, \quad (6)$$

где S_n - критерий Стьюдента при числе опытов n и доверительной вероятности α (доверительная вероятность принималась, равной 0,95).

Суммарная ошибка Δx находилась в зависимости от случайной и систематической:

$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{t_n S_n}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(\frac{\delta t_\infty}{3}\right)^2}, \quad (7)$$

где t_∞ - значение критерия Стьюдента при $n \rightarrow \infty$; δ - систематическая погрешность прибора.

В большинстве случаев измеряется не непосредственно интересующая нас величина, а

другая, зависящая от нее тем или иным образом. Такие измерения называются косвенными (в отличие от прямых, при которых определяемая величина измеряется непосредственно). К ним в наших опытах относились, в частности, статистические характеристики элементов и устройств привода. В общем случае непосредственно измеряемые величины $X_1, X_2, \dots, X_k$ будем считать аргументами, косвенно измеряемую величину функцией

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k). \quad (8)$$

Среднее значение косвенно измеряемой величины находим как

$$\bar{y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_k), \quad (9)$$

где $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_k$ – среднеарифметические значения непосредственно измеряемых величин.

Учитывая, что погрешности непосредственно измеряемых величин взаимонезависимы и малы по сравнению с измеряемыми величинами, разложим функцию в ряд Тейлора. Ограничившись первым членом ряда и используя закон сложения случайных погрешностей, можно получить выражение для определения величины доверительного интервала погрешности косвенно измеряемой величины:

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}, \quad (10)$$

где $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ – частные производные к переменным $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_k$.

Подразумевается, что доверительная вероятность для доверительных интервалов погрешностей измерений одна и та же, поэтому доверительная вероятность доверительного интервала погрешности косвенного измерения также равна α .

Граница относительной погрешности косвенного измерения:

$$\Delta \bar{y} = \frac{\Delta y}{\bar{y}} = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}. \quad (11)$$

Так как $\frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i = \frac{\partial}{\partial x_i} \ln f \Delta x_i$, то

$$\Delta \bar{y} = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial}{\partial x_i} \ln f \Delta x_i \right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial x_1} \ln f \Delta x_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial x_2} \ln f \Delta x_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial}{\partial x_k} \ln f \Delta x_k \right)^2}$$

Для проверки адекватности моделей выбран критерий Фишера [3]

$$F_e = \frac{S_{ad}^2}{S_e^2}, \quad (12)$$

представляющий собой отношение двух дисперсий – воспроизводимости и адекватности.

Дисперсия воспроизводимости [3]:

$$S_e^2 = \sum_{i=1}^n \frac{S_{ni}^2}{n}, \quad (13)$$

где S_{ni}^2 – среднее квадратичное отклонение при измерении i -го результата.

Рассеяние экспериментальных точек относительно расчетных характеризуется остаточной дисперсией или дисперсией адекватности [4]

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - y_{pi})^2}{m - l - 1}, \quad (14)$$

где y_{pi} , y_i – расчетные и экспериментальные значения;

m – число сравниваемых значений;

l – число коэффициентов, определенных по опытным данным.

Теоретическая зависимость полагается адекватной опытной, если полученное экспериментальное значение критерия Фишера F_e меньше табличного $F_{табл}$, выбираемого по числу степеней свободы числителя и знаменателя, а также доверительной вероятности α

$$F_e < F_{табл}.$$

На разработанном АСЭИ и с использованием предложенной методики проведены экспериментальные исследования и подтверждена адекватность нелинейной математической модели привода оборудования, представленной в работах [6,7].

На рис. 2 представлены опытные данные и переходной процесс перемещения выходного звена привода и сопоставлены опытные данные и

безразмерная амплитудная частотная характеристика. Экспериментальные значения критерия Фишера (менее 1,2) не превышали табличных значений. Поэтому разработанные модели динамических характеристик можно считать адекватными и положить в основу дальнейших исследований.

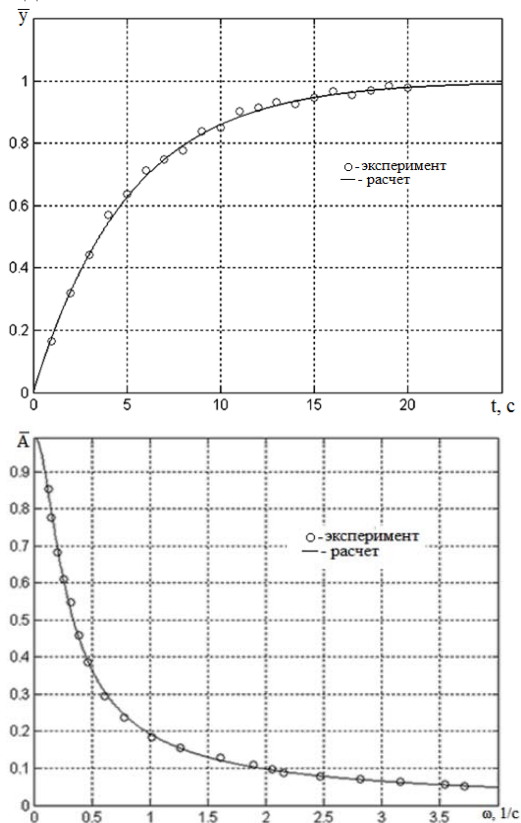


Рис. 2. Опытные данные и расчетная зависимость переходного процесса и амплитудной частотной характеристики

Выводы.

В ходе работы был разработан автоматизированный стенд экспериментальных исследований статических и динамических характеристик электрогидравлических следящих приводов технологического оборудования. Представлена методика проведения эксперимента и проверки адекватности математических моделей характеристик приводов.

Литература

1. Балакирев В.С. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления/Балакирев В.С., Дудников В.Г., Цирлин А.М. – М.: Энергия, 1967. – 232 с.
2. Горский В.Г. Планирование промышленных экспериментов / В.Горский, Ю.Адлер. – М.: Металлургия, 1974. – 264 с.
3. Алиев Т.А. Экспериментальный анализ / Алиев Т.А. – М.: Машиностроение, 1991. – 272 с.

4. Кринецкий И.И. Основы научных исследований/ Кринецкий И.И. – К.: Вища шк., 1981. – 210 с.
5. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента. – М.: Мир, 1980. – 612 с.
6. Соколов В.И. Определение передаточных функций электрогидравлического следящего привода оборудования для обработки давлением / В.И. Соколов, Т. Я. Таванюк // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2011. – № 1 (155). – Ч.1. С. 130-135.
7. Соколова Я.В. Нелинейная математическая модель электрогидравлического следящего привода с дроссельным регулированием/ Соколова Я.В., Таванюк Т.Я., Соколов В.И. // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2010. – № 10(152). – С. 168 – 175.
8. Кроль О.С., Шевченко С.В., Соколов В.И. Проектування металорізальних верстатів у середовищі APM WinMachine. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля. – 2011. – 388 с.
9. Соколов В.И., Кроль О.С., Єфіфанова О.В. Гідравліка. – Северодонецьк: СНУ ім. В. Даля. – 2017. – 160 с.
10. Кроль О.С., Шумакова Т.О., Соколов В.И. Проектування зуборізних інструментів за допомогою системи КОМПАС. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля. – 2013. – 142 с.

References

1. Balakirev VS Experimental determination of dynamic characteristics of industrial control objects / Balakirev VS, Dudnikov VG, Tsirlin AM - Moscow: Energia, 1967. - 232 p.
2. Gorsky V.G. Planning industrial experiments / V. Gorsky, J. Adler. - Moscow: Metallurgy, 1974. - 264 p.
3. Aliev TA Experimental analysis / Aliev TA - M.: Mechanical Engineering, 1991. - 272 p.
4. Krinetsky I.I. Fundamentals of Scientific Research / Krinetsky II - K.: Вища шк., 1981. - 210 with.
5. Johnson N. Statistics and experiment planning in engineering and science: Methods of experiment planning. - Moscow: Mir, 1980. - 612 p.
6. Sokolov V.I. Determination of the transfer functions of the electrohydraulic servo drive of pressure treatment equipment / V.I. Sokolov, T. Ya. Tavanyuk // News of the Sci-Dokuukrainian National University. Volodymyr Dahl. - 2011. - No. 1 (155). - P.1. Pp. 130-135.
7. Sokolova Ya.V. Nonlinear mathematical model of electrohydraulic servo drive with throttle control / Sokolova Ya.V., Tvaniuk T.Ya., Sokolov VI // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. - 2010. - No. 10 (152). - P. 168 - 175.
8. Krol O., Shevchenko S.V., Sokolov V. Design machine tools in environment APM WinMachine. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2011.
9. V. Sokolov, O. Krol, O. Yefifanova. Hydraulics. V. Dahl EUNU, Severodonetsk, 2017.
10. Krol O., Shumakova T., Sokolov V. Design metal cutting instruments by dint of system of KOMPAS. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2013.

Таванюк Т.Я., Ніколаєнко А.П., Романченко О.В.
Шумакова Т.О. Оцінка адекватності математичних моделей характеристик електрогидравлічних слідуючих приводів.

У роботі представлений автоматизований стенд експериментальних досліджень статичних та динамічних характеристик електрогідравлічних слідкуючих приводів технологічного обладнання. Розглянута методика проведення експерименту та перевірки адекватності математичних моделей характеристик приводів.

Ключові слова: адекватність, математична модель, динамічні характеристики, експериментальні дослідження.

Tavanyuk T.Y., Nikolaenko A.P., Romanchenko A.V., Shumakova T.A. Estimation of the adequacy of mathematical models of characteristics of electrohydraulic servo drives.

In work the automated stand of experimental researches of static and dynamic characteristics of electrohydraulic servo drives of the process equipment is presented. The technique of carrying out the experiment and testing the adequacy of the mathematical models of the drive characteristics is considered.

Key words: adequacy, mathematical model, dynamic characteristics, experimental studies.

Таванюк Тетяна Яківна – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк). ttavanyuk@gmail.com

Ніколаєнко Ганна Павлівна – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк). apnikolaienko@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.ru

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

Рецензент: д.т.н., проф. **Харламов Ю.О.**

Стаття подана 20.09.2017

УДК 621.941

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА

Ткачѳв Р.П., Мелконов Г.Л.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF PROCESSING MATERIALS USING THE BLADE TOOL

Tkachev R., Melkonov G.

В статье рассмотрены вопросы повышения эффективности лезвийной обработки материалов. Для результативного решения этих вопросов разработан процесс, названный скользящим резанием. Этот процесс обеспечивает уменьшение силовой напряженности в зоне резания, энергоемкости и работы на преодоление деформаций. Также представлены различные подходы, оказывающие вспомогательное действие на решение данных вопросов.

Ключевые слова: лезвийный инструмент; скользящее резание материалов; движение точек; режущая кромка; контактная зона лезвия; точение металлов; межатомные связи.

Введение. Одной из главных задач современного машиностроительного производства является повышение эффективности обработки материалов, которое заключается в обеспечении необходимого качества деталей с наименьшей себестоимостью их изготовления.

Постановка проблемы. При резании материалов возникают значительные силы и температура. Они приводят к снижению качества поверхностного слоя, производительности и точности обработки. Процессы точения и фрезерования пластичных и упругих материалов сопровождаются выполнением значительной работы на преодоление деформаций. В общей работе резания на долю деформации приходится 55%, доля трения по передней поверхности занимает 35% и доля трения по задней поверхности составляет 10%. Установлено, что при резании металлов более 99,5% работы переходит в теплоту. Поэтому уменьшение силовой напряженности процесса резания, его энергоемкости и работы на преодоление деформаций является важной научной проблемой. Благодаря решению этой проблемы появится возможность получить более высокое качество поверхностного слоя после точения и фрезерования материалов и исключить дальнейшие доводочные операции.

Анализ последних исследований и публикаций. Проблемы повышения эффективности обработки материалов резанием были рассмотрены в работах А.А. Потапова, А.Н. Резникова, В.Т. Солоненко, А.А. Рыжкина, Э.В. Рыжова, Ф.В. Новикова, А.В. Якимова и других ученых. Но и сегодня данные проблемы не являются окончательно решенными и требуют дальнейших исследований.

Цель статьи. В качестве одного из наиболее результативных решений этой проблемы рассматривается эффект скользящего резания, который заключается в том, что при внедрении лезвия в материал происходит его скольжение по обрабатываемой поверхности. Также дополнительно к этому методу прорабатываются некоторые подходы, направленные на повышение эффективности обработки материалов лезвийным инструментом.

Результаты исследований. Одним из путей уменьшения работы деформации является высокоскоростное резание[1]. Его идея базируется на теоретическом положении физики твердого тела. Согласно этому положению, при увеличении скорости пластической деформации металла область последней уменьшается, и металл становится более хрупким. Вследствие этого уменьшается относительная работа пластической деформации, и, следовательно, количество выделившейся теплоты, и возникает более низкая температура в зоне резания. Но, не смотря на это, внедрение высокоскоростного резания в производство до настоящего времени носит ограниченный характер, так как требуется решать множество технических и экономических проблем. Из этого следует, что высокоскоростное резание не решает в полной мере проблему, и, следовательно, не получило широкого применения в промышленности.

Уменьшение силовой напряженности процесса резания без снижения при этом производительности обработки является важной задачей. Ученными проводились теоретические и экспериментальные

исследования энергоемкости процессов лезвийной и абразивной обработки с целью определения условий ее уменьшения [2]. Результаты исследований показали, что добиться наиболее существенного снижения энергоемкости при лезвийной обработке возможно. Для этого необходимо увеличить коэффициент резания:

$$K_{рез.} = \frac{P_z}{P_y} \quad (1)$$

где P_z, P_y – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания. Однако, как показывает практика, добиться значительного увеличения коэффициента резания при резании традиционными лезвийными инструментами не удается.

Для того чтобы добиться снижения работы резания, предлагается создать условия, при которых будет проявляться эффект Баушингера. Он заключается в уменьшении сопротивления кристаллического материала пластической деформации после предварительной малой пластической деформации противоположного знака. Однако обеспечить такие условия при традиционном резании можно только при реверсе вращения заготовки и переустановке резца, а это, в свою очередь, приведет к значительному снижению производительности.

Поэтому в результате для решения поставленной задачи разработан процесс, названный скользящим резанием. Это процесс обработки, при котором скользящее движение режущей кромки, во время рабочего цикла, по поверхности резания в направлении главного движения превалирует над ее перемещением в направлении движения подачи.

Необходимым условием проявления эффекта скользящего резания для управления интенсивностью физических процессов, происходящих в зоне резания, является установление угла наклона кромки λ в пределах: $70^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ$. Такое положение режущей кромки лезвия инструмента в принципиальной кинематической схеме резания существенно изменяет соотношение угловых и линейных скоростей элементарных абсолютных движений, сообщаемых точкам режущей кромки и заготовке.

Анализ и теоретическое исследование возможных принципиальных кинематических схем резания и движения, их составляющих с эффектом скольжения кромки по поверхности резания, открывают широкие возможности для создания новых, в настоящее время еще неизвестных, методов обработки и конструкций режущих инструментов.

Механизм скользящего резания металлов заключается в следующем: при контакте инструмента с заготовкой, режущая кромка которого во время рабочего цикла скользит по поверхности

резания в направлении главного движения и перемещается в направлении движения подачи, происходит их силовое взаимодействие. При этом первоначальный контакт рабочей части инструмента с заготовкой произойдет между вершиной выступа субшероховатости режущей кромки, который находится ближе к обрабатываемой поверхности, и обрабатываемым металлом. В результате силового воздействия выступа на обрабатываемый металл возникают растягивающие напряжения в направлении скорости резания и сжимающие напряжения в направлении скорости подачи. Таким образом, происходит локализация напряжений разного характера (растяжения и сжатия) в поверхностном слое обрабатываемого металла и создаются условия стеснения подвижности его атомов. При достижении силы межатомных связей происходит разрыв этих связей и образуется микротрещина, которая развивается в направлении движения подачи. Скользящее движение кромки по обрабатываемой поверхности включает новые последующие контактные силовые взаимодействия выступов субшероховатости и шероховатости с обрабатываемым материалом, следствием которого является образование множества микротрещин. Образовавшиеся микротрещины объединяются в макротрещину, которая начинает распространяться перед режущей кромкой при ее перемещении, разрушая металл на более ранней стадии пластической деформации в направлении движения подачи. Макротрещина перемещается одновременно с режущей кромкой в плоскости резания. В результате происходит срезание слоя обрабатываемого металла и формируется сливная стружка, которая представляет собой сплошную ленту без разрывов и трещин.

При скользящем резании обеспечивается гораздо лучшее проникновение лезвия в металл и за счет «кинематического заострения».

В результате новой кинематики существенно изменяются угловые кинематические параметры, которые в значительной степени отличаются от кинематических параметров при традиционном точении.

Сущность новой кинематики будет представлена ниже (рис. 1).

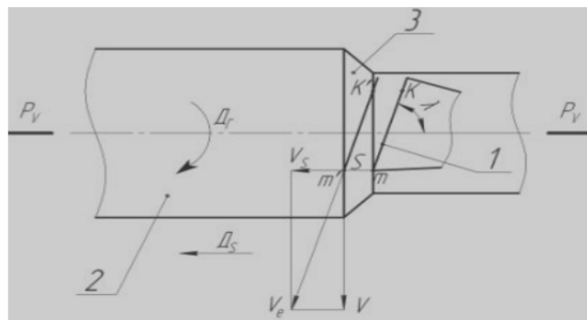


Рис. 1. Схема перемещения точек режущей кромки по поверхности резания во время рабочего цикла:
1 – режущая кромка; 2 – заготовка; 3 – поверхность резания

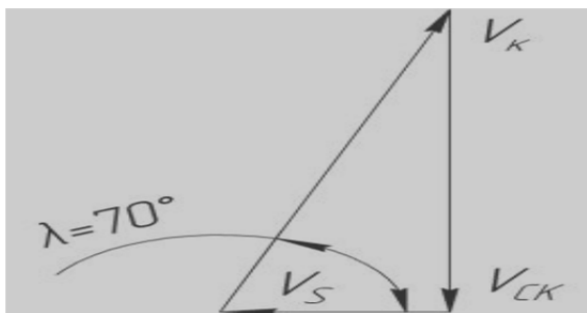


Рис. 2. Треугольник скоростей движения точек режущей кромки

Первоначальный контакт режущей кромки 1 с обрабатываемой заготовкой 2 произойдет в точке m . Точка m , занимая свое пространственное положение в принципиальной кинематической схеме [3], в результирующем движении, перемещаясь по обрабатываемой поверхности 3 во время рабочего цикла займет положение m' , а последней точкой режущей кромки, которая войдет в контакт с заготовкой в конце рабочего цикла будет точка k в положении k' . Все точки режущей кромки за первый рабочий цикл будут постепенно врезаться в обрабатываемый материал со смещением по поверхности, образуемой кромкой в результирующем движении в направлении скорости резания V от m до k . При этом перемещение каждой точки режущей кромки, во время рабочего цикла, по обрабатываемой поверхности в направлении движения подачи DS будет различным, и изменяться от перемещения точкой m , равное подаче S , до нуля в точке k' . При следующем рабочем цикле точка m переместится по обрабатываемой поверхности в направлении движения подачи DS на расстояние $2S$, а точка k на расстояние S .

Рабочая длина режущей кромки K_p определяется из соотношения:

$$K_p = \frac{S}{\cos \lambda} \quad (2)$$

Из рис.1 следует, что точки режущей кромки, перемещаясь в направлении движения подачи DS и в направлении главного движения резания $ДГ$, одновременно сдвигаются (скользят) в направлении главного движения резания $ДГ$ от m до k' . Скорость движения точек режущей кромки V_K равна векторной сумме скоростей их перемещения в осевом направлении VS и скольжения в направлении главного движения резания V_{CK} (рис.2). Соотношение скоростей скольжения и перемещения в направлении движения подачи точек режущей кромки определяется из выражения:

$$\operatorname{tg} \lambda = \frac{V_{CK}}{V_S} \quad (3)$$

Таким образом, учитывая, что при скользящем резании угол наклона режущей кромки находится в пределах $70^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ$, а $\operatorname{tg} 70^\circ = 2,7$ и возрастает с увеличением угла λ , то скорость скольжения в направлении главного движения резания больше скорости перемещения в осевом направлении от 2,7 до бесконечности при $\lambda = 90^\circ$.

Приведенные особенности скользящего продольного точения вносят существенные отличия кинематических углов резания рассматриваемого процесса от традиционного [4]. Кинематический угол наклона режущей кромки λ_k измеряется в плоскости резания в кинематической системе координат, а в данном случае плоскость резания совпадает с рабочей плоскостью PS и определяется:

$$\lambda_k = \lambda_u - \eta \quad (4)$$

где η — угол скорости резания (угол между направлением скоростей результирующего движения резания и главного движения резания).

Условие стеснения подвижности атомов или молекул в зоне скользящего резания и разрыв связей на более ранней стадии деформации можно объяснить на примере деформированного состояния малого объема тела. Различают три основных вида деформированного состояния малого объема тела.

1. Растяжение (рис. 3,а), при котором вдоль одной из трех главных осей деформации наблюдается удлинение, а вдоль двух остальных главных осей — укорочение.

2. Сжатие (рис. 3,б), при котором вдоль одной из трех главных осей деформации наблюдается укорочение, а вдоль двух остальных главных осей — удлинение.

3. Сдвиг (рис. 3,в), при котором деформация вдоль одной из трех главных осей отсутствует, вдоль второй главной оси наблюдается укорочение, а вдоль третьей главной оси — равное ему удлинение.

При скользящем резании (рис. 3,г) напряжения растяжения действуют в направлении главного движения (ось y), а напряжения сжатия в направлении движения подачи (ось x). Таким образом, вдоль оси y должно происходить усиленное удлинение, вдоль оси x — усиленное укорочение, а вдоль оси z — одновременное удлинение и укорочение.

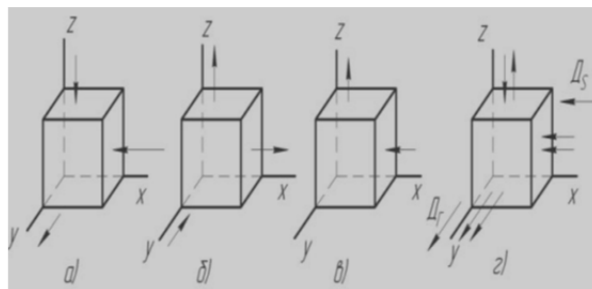


Рис. 3. Виды деформированного состояния малого объема тела

Количество теплоты при резании металлов можно определить выражением:

$$Q = Q_d + Q_{mn} + Q_{mz} \quad (5)$$

где Q_d – теплота деформации, образующаяся на условной плоскости сдвига; Q_{mn} – теплота трения, образующаяся на передней поверхности режущего инструмента в пределах длины контакта между стружкой и инструментом; Q_{mz} – теплота трения на задней поверхности режущего инструмента в пределах площадки контакта между задней поверхностью и поверхностью резания [5].

При скользящем резании металла теплота деформации Q_d незначительна в связи с действием нового механизма. Энергия деформации преобразовывается в работу разрыва межатомных связей на более ранней стадии.

Теплота трения Q_{mn} , образующаяся на передней поверхности режущего инструмента между стружкой и контактной поверхностью, возрастает в результате увеличения длины контакта (см. рис.3) и трения, как следствия скольжения по обрабатываемой поверхности лезвия инструмента.

Теплота трения Q_{mz} на задней поверхности также возрастает по вышеупомянутым причинам.

Результаты проведенных опытов полностью подтвердили предположение о «холодном точении» металлов при скользящем резании и достижении высокого качества обработанной поверхности.

Шероховатость обработанной поверхности измеряли на информационно-вычислительном комплексе мод. 170623.1, который предназначен для подключения датчика и мотопривода профилометра модели 107622 к персональному настольному компьютеру типа IBM/PC и управления их работой в процессе измерения и обработки сигнала измерительной информации – трассирования, снятия профиля, его визуализации [6]. Комплекс проводил измерения геометрических размеров особенностей профиля, вычисления параметров шероховатости, а также запись результатов измерений на компьютер и распечатку их на принтере [7].

Профилограмма и результаты измерений приведены на рис. 4.

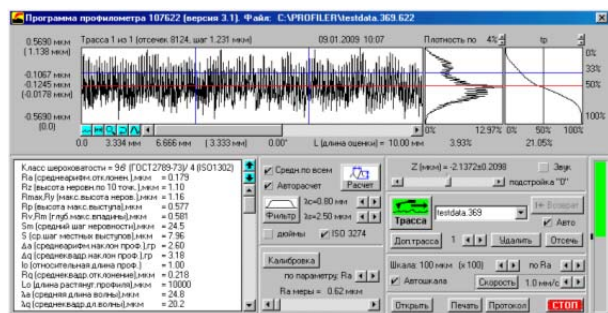


Рис. 4. Профилограмма обработанной поверхности стали 45 скользящим точением

Помимо скользящего резания, на эффективность лезвийной обработки материалов большое влияние оказывает уровень работоспособности инструмента и подготовленность самого материала [6].

Рассмотрим некоторые направления повышения эффективности процессов обработки.

Обработка с предварительным нагревом срезаемого слоя. Для обеспечения процесса резания и повышения работоспособности инструмента применяют различные способы нагрева. В идеальном способе должно обеспечиваться разупрочнение обрабатываемого материала только в зоне стружкообразования и только на глубину резания во избежание структурных изменений от воздействия высокой температуры [8]. Источник тепла должен обладать высокой удельной теплотворной способностью, чтобы обеспечить быстрый нагрев обрабатываемого материала. Важным требованием являются регулирование температуры нагрева, надежность контроля и постоянство заданной температуры нагрева, так как наибольший эффект наблюдается в довольно узком интервале оптимальных температур, обеспечивающем максимальную стойкость инструмента и производительность обработки. Способ нагрева должен отличаться также простотой монтажа оборудования и обеспечивать безопасность обслуживающего персонала [9].

Термохимическая обработка материала инструмента. Термическая обработка инструментальных материалов позволяет за счет изменения их физико-механических свойств существенно повысить работоспособность режущего инструмента. При этом наряду с режимами термообработки – температурой нагрева, временем выдержки и программой нагрева – большое значение имеет среда, в которой выполняется обработка.

Лазерная и магнитная обработка материала инструмента. Для многих инструментальных материалов использование таких методов, как лазерная упрочняющая обработка, магнитное упрочнение дает значительное увеличение работоспособности в условиях резания.

Создание новых инструментальных материалов. Разработка и создание инструментальных материалов должны базироваться на результатах исследований процесса резания – имея данные об особенностях протекания процесса обработки конкретного конструкционного материала, можно предложить лучший инструментальный материал для его эффективной обработки [10].

При создании материала для режущего инструмента необходимо учитывать особенности механического и физико-химического взаимодействия в зоне резания.

Защитные покрытия на режущих инструментах. Наличие на контактных

поверхностях инструмента защитных покрытий приводит к коренному изменению механики и физикохимии контактного взаимодействия инструмента и обрабатываемого изделия. Первое предопределяется перераспределением напряжений на поверхностях инструмента, изменением коэффициента трения и, как следствие, сил и температуры резания. Второе связано с тем, что для обеспечения наиболее оптимальных условий работы режущего инструмента в каждом конкретном случае должно выбираться такое покрытие, которое обеспечивает минимизацию или отсутствие эффектов, оказывающих наибольшее отрицательное влияние на работоспособность режущего инструмента [11, 13-15].

Снижение динамичности процесса резания.

Случайные воздействия на режущий инструмент, связанные с неравномерностью припуска на обработку и изменением механических свойств обрабатываемого материала, жесткостью оборудования приводят к возникновению собственных колебаний в технологической системе. Существует несколько путей борьбы с вибрациями:

1. Разработка и использование виброгасящих устройств.
2. Разработка виброустойчивых зон условий резания.
3. Разработка виброустойчивого режущего инструмента за счет увеличения жесткости или повышения демпфирующей способности.

Учет структурных особенностей и свойств обрабатываемых материалов. Процесс обработки должен вестись так, чтобы с изделия удалялись более дефектные слои материала, а к обработанной поверхности прилегали наиболее твердые, прочные и однородные его участки. Следствием этого является повышение работоспособности инструмента [12], определяемое снижением динамических нагрузок на режущее лезвие, получение меньшей шероховатости обработанной поверхности и возрастание эксплуатационных характеристики изделий.

Учитывая гетерогенность структуры и свойств некоторых конструкционных материалов, их различие для деталей даже одной партии, большое значение имеет разработка способов определения оптимальных условий обработки, позволяющих оценивать параметры режима резания для каждой отдельно взятой детали. Такую оценку можно провести на основании данных деформационно-спектрального анализа.

Выводы. 1. Разработан новый процесс скользящего резания материалов, основанный на новой кинематике движения точек режущей кромки, в результате которой в контактной зоне лезвия и заготовки действуют напряжения разного характера: растяжения и сжатия. Это создает условие стеснения подвижности молекул или атомов обрабатываемого материала непосредственно перед режущей кромкой и наступает хрупкое разрушение, представляющее

собой разрыв с низкой энергией. Скользящее резание материалов позволяет обеспечить высокое качество обработанной поверхности при точении металлов: $Ra=0,18$ мкм. 2. Сформулирована гипотеза о механизме скользящего резания металлов и дано кинематическое определение процессу скользящего резания материалов. Показано, что основой обеспечения эффекта скользящего резания является установление угла наклона режущей кромки λ в пределах $70^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ$. 3. Характерным для скользящего точения металлов является низкая температура в зоне резания из-за преобразования энергии деформации в работу разрыва межатомных связей обрабатываемого материала при отделении части материала (стружки) и формирования новых поверхностных слоев деталей на более ранней стадии деформации. 5. Показана причина разрыва межатомных связей на более ранней стадии деформации обрабатываемого материала на примере деформированного состояния малого объема тела.

Л и т е р а т у р а

1. Мелконов Г.Л., Никитченко И.В. Метод прогнозирования работоспособности круглых пил, основанных на термометрическом контроле. – Вісн. Східноукр. Національного ун-ту ім. В. Даля. – 2-16. - №2 (226).
2. Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Теория резания. – Минск – Москва: Новое знание, 2007. – 512с.
3. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. Пособие / Якимов А.В., Новиков Ф.В. и др. – Одесса: ОГПУ, 1999. 450с.
4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.1 «Механика резания материалов» – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580с.
5. Новиков Т.В., Кленов О.С. Исследование энергоёмкости процессов лезвийной и абразивной обработки материалов // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ» 2008. – Вып.75. – С. 282-288.
6. Мелконов Г.Л. Использование в качестве рабочего инструмента валковые калибры при обработке сферических деталей. – Х.: НТУ «ХПИ» - 2015 р. - №11 (1120) – 220с.
7. Режущий инструмент А.с. 1152723. СССР. / В.А. Марунич, В.Д. Дручков, Н.Я. Горбатко. – Оpubл. 1985, Бюл. №16.
8. Инструмент для механической обработки материалов А.с. 1219387. СССР. В29С37/00 / В.Д. Дручков, В.А. Маруничи др. – № 3649606/23-05; Заявл. 10.10.83; Оpubл. 23.03.86, Бюл. №11. – 2с.: ил.
9. ГОСТ 25762-83. Обработка резанием. Термины, определения и обозначения общих понятий.
10. ГОСТ 25751-83 Инструменты режущие. Термины и определения общих понятий.
11. ГОСТ 25761-83. Виды обработки резанием. Термины и определения общих понятий.
12. Рыжов, Э.В. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями [Текст] / Э.В. Рыжов, С.А. Клименко, О.Г. Гуцаленко – К.: Наук. думка, 1994. – 181 с.

13. Соколов В.І., Кріль О.С., Спіфанова О.В. Гідравліка. – Северодонецьк: СНУ ім. В. Даля. – 2017. – 160 с.
14. Кріль О.С., Шумакова Т.О., Соколов В.І. Проектування зуборізних інструментів за допомогою системи КОМПАС. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля. – 2013. – 142 с.
15. Кріль О.С., Шевченко С.В., Соколов В.І. Проектування металорізальних верстатів у середовищі АРМ WinMachine. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля. – 2011. – 388 с.

References

1. Melkonov G. L., Nikitchenko, I. V. Method of prediction of performance circular saws, on the basis of thermometric control. – VSN. Shanor. National UN-Tu im. V. Dal. – 2-16. - №2 (226).
2. Yastcheritsyn P. I. Feldshtein E. E., M. A. Korniewicz Theory of cutting. – Minsk: New knowledge, 2007. – 512с.
3. The theoretical basis of cutting and grinding of materials: Proc. Manual / Yakimov A. V., Novikov F. V., etc. – Odessa: OGPU, 1999. 450C.
4. Physico-mathematical theory of processes of processing of materials and engineering technologies / Under the General editorship of F. V. Novikov and A. V. Yakimov. In ten volumes. – Vol. 1 "Mechanics of cutting of materials" – Odessa: ONPU, 2002. – 580с.
5. Novikov T. V., Klenov O. S. Study of the energy intensity of the processes of edge cutting machining and abrasive machining materials Cutting and tool in technological systems: Intern. scientific-tech. sat. – Kharkov: NTU "KHPI" 2008. – Vol.75. – P. 282-288.
6. Melkonov, G. the Use as a working tool to be a roller gauges in the processing of spherical components. – H.: NTU "HP" - 2015 - No. 11 (1120) – 220s.
7. Cutting tool A. S. 1152723. Of the Soviet Union. / Marunich V. A., V. D. Druzhkov, N. I. Gorbatko. – Publ. 1985, bull. No. 16.
8. Tool for machining materials A. S. 1219387. Of the Soviet Union. B29C37/00 / Druzhkov V. D., V. A. Marusici. – No. 3649606/23-05; Appl. 10.10.83; Publ. 23.03.86, bull. No. 11. – 2С.: II.
9. GOST 25762-83. Machining. Terms, definitions and designations of General concepts.
10. GOST 25751-83 cutting Tools. Terms and definitions of General concepts.
11. GOST 25761-83. The types of machining. Terms and definitions of General concepts.
12. Ryzhov, E. V. Technological quality assurance of parts with coatings [Text] / E. V. Ryzhov, S. A. Klimenko, O. G., Gutsalenko – K.: of Sciences. Dumka, 1994. – 181 p.
13. Sokolov V., Krol O., Yepifanova O. Hydraulics. V. Dahl EUNU, Severodonetsk, 2017.

14. Krol O., Shumakova T., Sokolov V. Design metal cutting instruments by dint of system of KOMPAS. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2013.
15. Krol O., Shevchenko S.V., Sokolov V. Design machine tools in environment АРМ WinMachine. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2011.

Ткачов Р.П., Мелконов Г.Л. Підвищення ефективності обробки матеріалів з використанням лезового інструменту

У статті розглянуто питання підвищення ефективності лезвийної обробки матеріалів. Для результативного вирішення цих питань розроблено процес, названий ковзаючим різанням. Цей процес забезпечує зменшення силової напруженості в зоні різання, енергоємності і роботи на подолання деформацій. Також представлені різні підходи, які надають допоміжну дію на рішення даних питань.

Ключові слова: лезвий інструмент; ковзаюче різання матеріалів; рух точок; ріжуча кромка; контактна зона леза; точіння металів; міжатомні зв'язки.

Tkachev R., Melkonov G. Improving the efficiency of processing materials using the blade tool

In the article the questions of increase of efficiency of cutting edge materials processing. To effectively address these issues developed a process called a sliding cutting. This process provides a reduction in tensions in the area of cutting energy intensity and work to overcome strains. A variety of approaches that provide a support action to address these Further experimental research was inappropriate because it would already be area rough turning and not finishing. The methodology of experimental studies provides a rationale for the chosen directions of experimental research or specific experiments, evaluate the accuracy and reliability of received data, output the empirical dependence of tool life from time to time. issues.

Keywords: cutting tool; moving the cutting of materials; the movement of the points; the cutting edge; the contact area of the blade; turning of metals; inter-atomic bonding.

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

Ткачів Р.П. – студент групи ММ-151 СНУ ім. В. Даля mpm.snu.edu@gmail.com

Рецензент: д.т.н., проф. **Чернецька-Білецька Н.Б.**

Стаття подана 10.09.2017

УДК 536.46:533.6:621.4

УПРАВЛЯЕМОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ**Харламов Ю.А.****CONTROLLED INITIATION OF A GASEOUS DETONATION****Kharlamov Y.A.**

В статье рассмотрены способы и методы управляемого инициирования газовой детонации в технических устройствах, использующих в качестве источника энергии детонационное горение газов. Систематизированы и классифицированы конструктивно-технологические способы и приемы инициирования. Рассмотрены схемы конструкций для ускорения перехода горения в детонацию. Кратко описаны методы прямого инициирования детонации.

Ключевые слова: детонационная волна, детонационная камера сгорания, источник зажигания, преддетонационное расстояние, источник зажигания, препятствия-турбулизаторы, ударная волна.

Введение. Использование газовой детонации обосновано стремлением наиболее эффективно преобразовать химическую энергию топлива в кинетическую энергию. Преимущество детонационного режима горения по сравнению с дефлаграционным состоит в более быстром выделении энергии. Параметры газа при детонационном сжигании во много раз больше, чем при обычном сжигании [1]. Переход к использованию управляемого детонационного горения - горения с существенно сверхзвуковой скоростью сулит качественный скачок в энергосбережении.

Постановка проблемы. Существует множество фундаментальных и технических проблем, препятствующих использованию детонации в технических устройствах. Одна из ключевых проблем - инициирование детонации в относительно коротких трубах (длиной до 1 м) при низкой энергии зажигания смеси (до нескольких джоулей). Обеспечение быстрого перехода горения в детонацию (ПГД) в углеводородовоздушных смесях при минимальной энергии зажигания - важнейшая фундаментальная проблема, решение которой открывает пути практического использования детонационного взрыва в перспективных силовых установках летательных аппаратов - импульсных детонационных двигателях (ИДД).

Анализ последних исследований и публикаций. При детонации резко возрастает давление продуктов сгорания, импульс давления воздействует на рабочую поверхность. Затем продукты сгорания расширяются, охлаждаются и выбрасываются в окружающее пространство, освобождая объем для новой порции газов. В пульсирующем детонационном устройстве цикл повторяется с определенной частотой. Преимущество пульсирующего детонационного устройства состоит в том, что в нем используется цикл, близкий к термодинамическому циклу при постоянном объеме. На это впервые указал Я. Б. Зельдович.

Примерами практического применения газовой детонации являются детонационно-газовое напыление покрытий [2], сверление и дробление горных пород, утилизация автомобильных покрышек, очистка технологического оборудования от пылевых отложений, удаление заусенцев, метание тел и многие др. [3]. Интересным применением пульсирующего детонационного устройства является пульсирующий детонационный двигатель (ПДД) [3]. Проблема повышения тяговой и топливной эффективности авиационных двигателей вызвала интерес к научным разработкам по созданию детонационного двигателя, способного заменить существующие силовые установки летательных аппаратов, о чем свидетельствуют многочисленные публикации (например, [4]). Идея использования управляемой детонации в технических устройствах не нова. Еще в 40-е годы прошлого столетия Я.Б. Зельдович и Г. Хоффман исследовали возможность сжигания топлива в детонационной волне для получения реактивной тяги. Это позволяет проектировать двигатели с высокой удельной мощностью. При детонационном сжигании кислородоводородной газовой смеси удельная мощность энерговыделения может на порядок

превосходит удельную мощность ракетных кислородоводородных двигателей.

Целью данной статьи является систематизация, классификация и разработка конструктивных способов управляемого инициирования газовой детонации, главным образом, в технологических устройствах для обработки материалов.

Способы инициирования газовой детонации. При проектировании детонационно-газовых устройств различного назначения необходимо обеспечить возможность инициирования детонации в газовых смесях при минимальных затратах энергии на коротких расстояниях и за малое время.

Известно много схем организации управляемого детонационного горения, включая схемы с импульсно-детонационным (ИД) и с непрерывно-детонационным (НД) рабочим процессом [2-4]. Импульсно-детонационный рабочий процесс основан на циклическом заполнении камеры сгорания (КС) горючей смесью с последующим зажиганием и распространением детонации вдоль КС. Непрерывно-детонационный рабочий процесс основан на непрерывной подаче горючей смеси в КС и ее непрерывном сгорании в одной или нескольких детонационных волнах (ДВ), циркулирующих в тангенциальном направлении поперек потока.

Важнейшая проблема, возникающая при реализации управляемого детонационного горения, — это проблема инициирования детонации в рабочей смеси того или иного горючего газа (топлива) с окислителем — на кратчайших расстояниях при минимальной энергии зажигания. Согласно современным представлениям возбуждение химической реакции в горючей смеси достигается тремя основными способами [5]:

1) слабое инициирование (воспламенение), возбуждающееся ламинарным горением; 2) сильное (прямое) инициирование, обеспечивающее формирование самоподдерживающейся детонационной волны (ДВ) в непосредственной близости от воспламенителя;

3) промежуточное, когда смесь только поджигается на начальном этапе, а затем фронт пламени ускоряется под воздействием естественных или искусственных причин до скоростей видимого пламени (сотен метров в секунду), с возможностью реализации перехода горения в детонацию (ПГД).

В результате слабого воспламенения у источника инициирования формируется ламинарное или турбулентное пламя с характерными дозвуковыми скоростями его распространения по смеси. В случае сильного инициирования в непосредственной близости от инициатора возникает детонационная волна, которая распространяется по горючей смеси со сверхзвуковой скоростью. Сильное инициирование также принято называть прямым инициированием

детонации. Инициирование перехода горения в детонацию обеспечивается первоначально зажиганием смеси от слабого инициатора и последующим ускорением пламени за счет автотурбулизации или взаимодействия с препятствиями и переходом к детонации. Такой переход возникает на существенном удалении от источника зажигания.

Переход горения в детонацию (ПГД) является одной из актуальных проблем в теории горения и взрыва [1], в практике взрывобезопасности и взрывозащиты [6] и в проектировании детонационно-газовых технологий и оборудования. Детонация представляет собой распространение горения со сверхзвуковой скоростью, другими словами, распространение в горючей среде самоподдерживающейся (за счет энергоснабжения при экзотермической реакции) ударной волны [1]. Образование детонационных взрывных волн без искусственного инициирования обусловлено неустойчивостью нормального горения (процесса распространения ламинарного пламени). В результате развития внутренней неустойчивости пламени, процесс горения автотурбулизуется, и движение пламени ускоряется: происходит резкое увеличение скорости фронта горения по сравнению с ламинарными режимами за счет увеличения площади поверхности горения. Турбулизации пламени могут способствовать также внешние факторы:

- отражение слабой ударной волны, порожденной пламенем, от различных препятствий с последующим усилением этой волны [1,6,7];
- шероховатость стенок [5];
- многочисленные неоднородности среды (особенно для гетерогенных сред) [8];
- вихревые потоки перед фронтом пламени [5];
- другие факторы тепловых и химических процессов [9].

Способы ускорения перехода горения в детонацию. Проблема ускорения процессов ПГД изучается и разрабатывается многими научными коллективами. Прямое инициирование детонации требует высоких затрат энергии, однако, детонацию можно инициировать через переход горения в детонации, что требует в $10^3 \dots 10^5$ раз меньше энергии. Без применения дополнительных методов по ускорению перехода горения в детонацию переход осуществляется за значительное время и на большом расстоянии от точки воспламенения.

Для многих практических применений газовой детонации необходимо сокращение расстояния между точкой поджига и местом фактического возникновения детонационной волны. При этом предпочтительным является переход горения в детонацию (ПГД) так как не требует большого начального вложения энергии. Способы ПГД Ивановым К.В. разделены на три группы: 1. различные воздействия на фронт пламени, уже распространяющийся в канале (акустическое

воздействие, шероховатости канала, применение форкамер); 2. увеличение эффективности поджига (акустическое воздействие на очаг воспламенения, струйный и объемный поджиг); 3. возбуждение волны детонации в узких каналах, в пределе – около или субкритического диаметра.

Особо важное значение проблема ПГД при конструировании технологических устройств имеет при использовании горючих газов-заменителей ацетилена и использовании в устройствах преддетонационных режимов сгорания. Рекомендации по организации благоприятных условий для ускорения пламени в КС рассматриваются во многих работах [1, 10-19 и др.].

Основными конструктивными приемами ускорения ПГД являются:

1. выполнение детонационных камер сгорания (ДКС) постоянного сечения с крутыми поворотами и витками;
2. установка спиралей Щелкина К.И. на преддетонационном участке ДКС;
3. выполнение ДКС с переменным поперечным сечением по длине;
4. профилирование стенок ДКС;
5. установка в ДКС препятствия специальной формы;
6. использование набора регулярных препятствий специальной формы, установленных внутри ДКС;
7. применение форкамерного зажигания;
8. использование предкамер с пористой набивкой;
9. использование распределенных источников зажигания;
10. использование средств для повышения эффективности поджига;
11. термическая активация горючей смеси;
12. раздельная подача газообразных топливных компонентов перекрестными высокоскоростными газовыми струями;
13. перепуск ДВ из донорной топливной смеси с высокой детонационной способностью в КС, заполняемую рабочим телом;
14. комбинированные способы ускорения процесса ПГД.

Рассмотрим эти приемы более подробно.

1. Экспериментальные и теоретические исследования инициирования и распространения газовой и гетерогенной детонации традиционно проводились в прямых трубах или трубах с поворотами малой кривизны. Длина ПГД сокращается с уменьшением диаметра трубы. Однако существует минимальный (предельный) диаметр трубы d_{min} , при котором еще возможно распространение детонации. Значение d_{min} находится в пределах от $\frac{\lambda}{\pi}$ до λ [20], где λ – ширина ячейки многофронтной детонации (например, для стехиометрической пропано-

воздушной смеси при нормальных начальных условиях $\lambda = 50$ мм).

Однако в 2006-2007 гг. выяснилось [20-22], что крутые повороты и витки труб — элементы, которые значительно ускоряют переход горения в детонацию (ПГД). Это позволяет создавать компактные компоновки детонационных труб с несколькими U-образными поворотами. Такие компоновки позволяют обеспечить ПГД за счет увеличения длины трубы и многократных отражений волн сжатия, образованных ускоряющимся пламенем, при их дифракции в U-образных поворотах. Повороты существенно облегчают инициирование газовой детонации. Минимальная скорость ударной волны (УВ), требуемая для возбуждения детонации в трубах внутренним диаметром 51 и 41 мм в стехиометрической пропановоздушной смеси при нормальных начальных условиях, оказалась близкой к 800 м/с (вместо 1700-1800 м/с в прямых трубах). Такие волны легко генерировать в прямой трубе со спиралью Щелкина с помощью слабого источника зажигания. Механизм инициирования детонации в этом случае связан с многократными отражениями УВ при прохождении поворотов и вторичными взрывами. Однако U-образные повороты увеличивают гидравлическое сопротивление и осложняют циклическое заполнение ДКС свежей горючей смесью. Следовательно, для применения таких компоновок в ИДД необходимо искать компромиссное решение для обеспечения ПГД на кратчайшем расстоянии.

2. Классические эксперименты К.И. Щелкина по ускорению пламени и ПГД в трубах с проволочными спиралями убедительно показали [1], что турбулизация течения перед ускоряющимся фронтом пламени – самое сильное средство воздействия на ускорение горения, позволяющее значительно сократить преддетонационное расстояние и время.

3. Выполнение ДКС с переменным поперечным сечением по длине. Наличие турбулизационных камер большего диаметра, чем диаметр самой детонационной трубы [23], способствует возникновению существенных неоднородностей в потоке перед зоной пламени, что может приводить к возникновению детонации. Поршневой эффект, создаваемый расширяющимися продуктами горения смеси в камерах, порождает серию первичных ударных волн, движущихся перед фронтом пламени. Некоторые волны образуются в результате взаимодействия поперечных волн сжатия, возникающих при ускорении турбулентного пламени. Наличие одной или двух турбулизационных камер с широким поперечным сечением в области зажигания сокращает преддетонационное расстояние для смесей углеводородов с воздухом и стабилизирует переход к детонации. Увеличение числа турбулизационных камер, расположенных в начальной секции трубы,

способствует переходу горения в детонацию, пока скорость турбулентного пламени при выходе из последней не превышает скорость звука. Дальнейшее увеличение числа камер препятствует переходному процессу.

4. Профилирование стенок ДКС [24]. Регулярный параболический профиль может существенно сократить время и расстояние перехода ударной волны в детонационную по сравнению с профилем стенки в виде прямоугольных выступов. Переход ударной волны в пропановоздушной смеси в детонационную в канале с прямыми стенками для инициирующей ударной волны с числом Маха 4,0 не происходит за время 1 мс и на расстоянии 1,4 м, а в канале с регулярным параболическим профилем стенок для инициирующей ударной волны с числом Маха 3,0 детонация возникает ко времени 590 мкс на расстоянии 0,57 м.

5. Установка в ДКС препятствия специальной формы. [21,24.] Установка в трубе осесимметричного препятствия специальной формы (сопла) позволяет обеспечить переход УВ в детонацию в стехиометрической пропановоздушной смеси при нормальных условиях при очень низкой минимальной скорости УВ на входе в сопло - 680 ± 20 м/с, что приблизительно соответствует числу Маха, равному 2 [26].

При распространении УВ в трубе с центральным телом (ЦТ) существенно облегчается ПГД в метано-воздушной смеси [27]. ЦТ должно удовлетворять определенным требованиям: перекрывать сечение трубы приблизительно на 60%, иметь параболический профиль головной части с углом атаки $\sim 40^\circ$ и параболический или эллиптический профиль хвостовой части с углом схождения не более 7° . В этом случае детонацию можно инициировать УВ с числом Маха 3.5 на длине ~ 0.5 м за время ~ 0.2 мс.

6. Использование набора регулярных препятствий специальной формы, установленных внутри ДКС. Регулярные препятствия специальной формы позволяют значительно сократить длину и время ПГД по сравнению с регулярными препятствиями в виде прямоугольных выступов [28,29]. Иницирование детонации аналогично случаю бегущего импульса зажигания, по крайней мере на заключительных стадиях процесса, когда в трубе сформировалась УВ. В этом случае вместо принудительного зажигания смеси вблизи фронта УВ происходит самовоспламенение смеси, вызванное отражением УВ от препятствий. Задержка самовоспламенения, определяемая интенсивностью УВ и длительностью фазы сжатия в ней, играет ту же роль, что и задержка принудительного зажигания.

7. Применение форкамерного зажигания. Для уменьшения преддетонационного расстояния известно применение форкамеры (расширение в начале детонационного канала) [34]. В связи с

ускорением фронта пламени в канале вследствие расширения продуктов сгорания газа в форкамере, на начальном этапе достигается смещение баланса между выделяемой в ходе реакции и диссипирующей энергиями в положительную сторону.

8. Использование предкамер с пористой набивкой. Ускорение ПГД гетерогенной смеси гептана с кислородом и воздухом достигается при размещении в предкамере, где происходят впрыск топлива и смешение его с окислителем, пористой набивки из металлической (медной, стальной) стружки – ПНМС; набивка хаотично заполняет полость предкамеры [30].

9. Использование распределенных источников зажигания. Детонацию в горючем газе можно инициировать с помощью бегущего импульса принудительного зажигания, который формируется путем последовательного запуска нескольких разрядников с тщательно подобранными временами задержки [31].

10. Использование средств для повышения эффективности поджига (воспламенения) горючей смеси. Сокращение длины перехода горения в детонацию достигается при использовании неравновесной плазмы высоковольтного наносекундного газового разряда [32,33]. В [35] определено влияние акустического воздействия на область воспламенения газа при энергиях инициирования в диапазоне 0,06 – 0,48 Дж. При энергиях инициирования меньших 0,1 Дж влияние акустического воздействия на область воспламенения имеет негативный характер. Одним из способов ускорения развития детонации является применение комбинированного метода зажигания: сочетание коронного и искрового разрядов, служащих для предобработки малой части объема камеры сгорания и зажигания смеси [36].

Известны исследования возможности применения струйного воспламенения с использованием эффекта самовоспламенения водорода для безыскрового поджига основного объема горючей смеси. Эксперименты по самовоспламенению водорода проводились в канале диаметром 5 мм и длиной до 185 мм. Из-за высокого давления и температуры за ударной волной происходит воспламенение в зоне перемешивания на контактной поверхности с последующим абсолютным ускорением фронта пламени [35]. Применение струйного воспламенения с использованием эффекта самовоспламенения водорода при истечении в канал для возбуждения детонации на расстояниях до 10 калибров затруднено необходимостью наличия водорода под высоким давлением (~ 100 атм.).

11. Термическая активация горючей смеси. Повышение начальной температуры смеси перед зажиганием – фактор, существенно ускоряющий переход горения в детонацию [23,30].

12. Раздельная подача газообразных топливных компонентов перекрестными высокоскоростными газовыми струями обеспечивает высокую турбулентность, что создает условия для быстрого ускорения пламени в гладкой трубе [37]. Раздельная подача газообразных топливных компонентов — природного газа (ПГ) и кислорода—без использования каких-либо препятствий-турбулизаторов сверхзвуковыми перекрестными струями, истекающими под давлением от 25 до 150 атм в гладкую детонационную трубу (ДТ) диаметром 74 мм, позволяет обеспечить быстрый ПГД на расстояниях до 300 мм за времена, составляющие десятые доли миллисекунды (0,4 мс). Это перспективно для создания компактных преддетонаторов для детонационных камер сгорания (КС).

13. Перепуск ДВ из донорной топливной смеси с высокой детонационной способностью в КС, заполняемую рабочим телом [37]. При организации управляемого детонационного горения по схеме импульсно-детонационного (ИД) рабочего процесса процедура перепуска ДВ происходит в каждом рабочем цикле. При непрерывно-детонационном (НД) рабочем процессе перепуск ДВ происходит однократно с возможностью повторения инициирующих импульсов в случае срыва режима.

14. Комбинированные способы ускорения процесса ПГД. В случае одновременного воздействия термической активации смеси и пористой набивки из металлорежущей стружки на процессы в импульсной камере усиливается эффект, приводящий к сокращению преддетонационного расстояния [30]. Для ускорения ПГД широко применяют различные комбинации конструктивных элементов. Так, например, в [38] комбинированное инициирование детонации достигалось с помощью труб околопредельного диаметра, спирали Щелкина, витков и переходных конусов для перепуска ДВ в трубу большого диаметра. Детонация возникала на коротких расстояниях, причем энергия инициирования оказалась значительно меньшей, чем при прямом инициировании одним электрическим разрядом. В работе [22] использовали комбинации спирали Щелкина и витки детонационной трубы (ДТ), а также генераторы ударных волн и крутые повороты ДТ. По патенту РФ № 2427756 устройство для инициирования газовой детонации имеет систему генерации первичной ударной волны и рабочий участок ДКС со стенками, имеющими регулярные профилированные препятствия. Система генерации первичной ударной волны состоит из источника зажигания и турбулизатора для турбулизации и ускорения фронта пламени до видимой скорости пламени 550-750 м/с с образованием первичной ударной волны с числом Маха не выше 2,5-3,0, а перед рабочим участком трубы, оборудованным

регулярными профилированными препятствиями, имеется участок трубы без препятствий длиной не менее $L = V \cdot \tau$, где V - видимая скорость пламени, τ - время индукции самовоспламенения горючей смеси при нормальном отражении ударной волны от жесткой стенки, обеспечивающий пространственное разделение турбулентного фронта пламени и фронта первичной ударной волны. По патенту РФ № 2429409 аналогичное устройство отличается наличием центрального тела с криволинейными поверхностями взамен рабочего участка с профилированными стенками, а по патенту РФ № 2430303 - использованием суживающе-расширяющегося сопла.

Некоторые конструктивные приемы ускорения пламени в ДКС представлены на рис. 1, а и б.

Схема I (рис. 1, а) представляет один из вариантов форкамерного зажигания. В начале камеры сгорания 1 размещается диафрагма 2 с одним или несколькими отверстиями, образуя таким образом камеру зажигания 3, в которой установлен точечный источник зажигания 4. Через отверстия диафрагмы пламя вырывается далеко вперед, поджигая большую массу горючей смеси. К недостаткам такой ДКС относится необходимость организации охлаждения диафрагмы для предупреждения неконтролируемого инициирования воспламенения горючей смеси.

В схеме II (рис. 1, а) используется прием создания шероховатостей путем введения спирали в камеру сгорания. Эту же роль могут выполнить канавки, нарезанные в стенках камеры сгорания. Интенсификация сгорания осуществляется за счет интенсивной турбулентности, вызываемой шероховатостью. Во избежание перегрева спирали внутри камеры сгорания ее можно изготовить из трубки малого диаметра, подсоединив к системе проточной жидкости и использовать даже в качестве прямого или обратного подвода к охлаждающей полости ствола.

В схеме III (рис. 1, а) используется так называемый детонационный ящик путем перекрытия сечения камеры сгорания на начальном участке перегородками, увеличивающими путь пламени [4,10]. Горение ускоряется в детонационном ящике за счет большой неравномерности в распределении скоростей. Здесь также требуется организация охлаждения перегородок

Схема IV (рис. 1, а) иллюстрирует использование теплового пограничного слоя создаваемого, например, накаливаемой электрическим током проволокой. Тепловой пограничный слой, внося дополнительную кривизну во фронт пламени, может способствовать ускорению пламени [40].

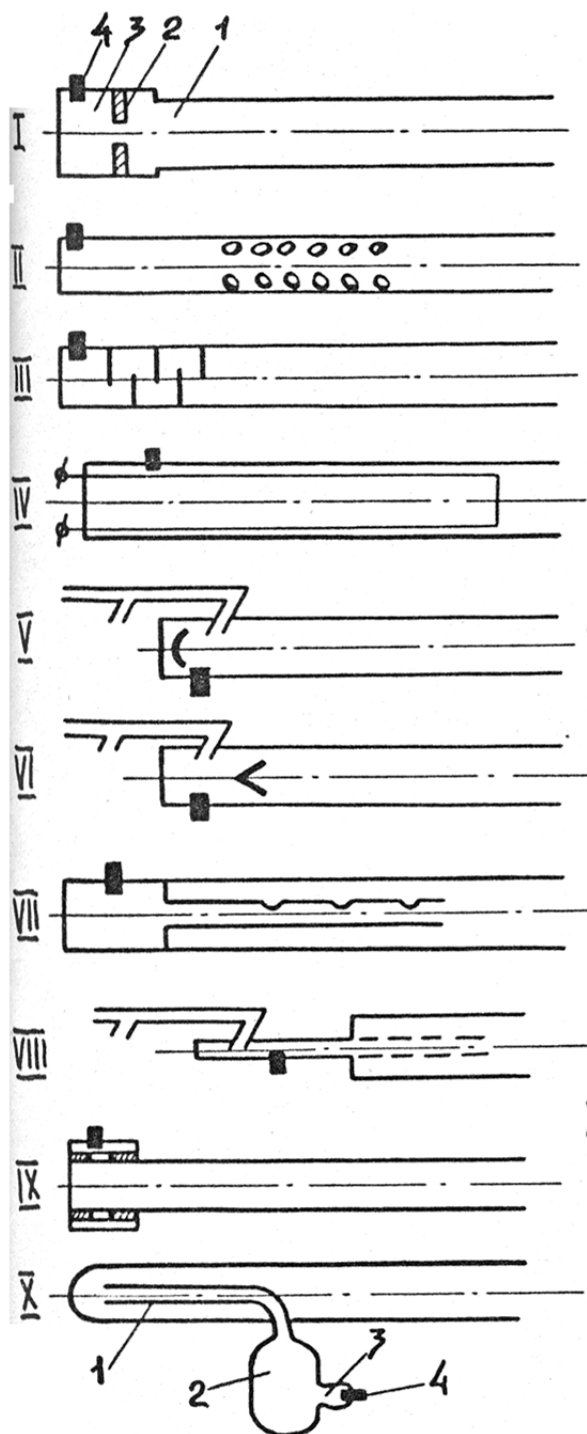


Рис. 1,а. Схемы устройств для ускорения перехода горения в детонацию

В схеме V (рис. 1,а) для сокращения времени выгорания торец камеры сгорания закрывается полусферой [11, 41]. В схеме VI (рис. 1,а) для сокращения времени выгорания установлен уголкового турбулизатора [11, 42]. В схемах VII и VIII (рис. 1,а) для лучшего смешения горючей смеси и форкамерного зажигания применяется перфорированная трубка [11, 43]. Эти схемы можно использовать при низкой частоте рабочих циклов детонационно-газового оборудования. В противном

случае возможно преждевременное воспламенение и требуется охлаждение конструктивных элементов внутри ДКС.

В схеме IX (рис. 1,а) форкамера зажигания выполнена в виде кольцевой полости, охватывающей начальный участок основной камеры сгорания и соединенной с ней через отверстия. В этом случае требуется организовать охлаждение кольцевой стенки, разделяющей камеру зажигания и ДКС. Конструкция кольцевой камеры зажигания со всеми водоохлаждаемыми стенками использована в конструкции установки напыления покрытий, разработанной в Луганском машиностроительном институте [44].

Схема X (рис. 1,а) применяется в импульсных камерах большого объема и отличается наличием сферического закрытого торца и патрубком подачи горючей смеси 1, соединенного с дополнительной камерой сгорания 2, имеющей форкамеру зажигания 3 с точечным источником зажигания 4 [45,46].

Применение форкамерно-факельного зажигания улучшает характеристики горения, в частности уменьшает время горения и увеличивает стабильность выгорания рабочего заряда в ДВС [50, 51] и в какой-то мере характеризует процессы инициирования горения в ДКС. Причем скорость выгорания топливного заряда в ДВС при форкамерно-факельном зажигании переменна по времени, достигая значительной величины в начальный момент и снижаясь до величин, характерных для искрового зажигания. Падение скорости выгорания связано с затуханием пульсаций в турбулентном ядре, образующемся в результате форкамерного истечения. Высокая начальная скорость выгорания при малом масштабе турбулентности в ядре приводит к значительности стабилизации выгорания заряда. Ускорение процесса сгорания при осуществлении факельного зажигания обуславливает значительное увеличение температуры и давления газов, изменение состава продуктов сгорания. Все это в определенной мере влияет также и на образование импульсной двухфазной струи при детонационно-газовом напылении (ДГН) и может быть использовано для регулирования ее параметров.

Ускорение выгорания горючей смеси достигается использованием криволинейных камер сгорания или их участков, кольцевых камер сгорания, а также имеющих резкие повороты (схемы XI, XIII) (рис. 1,б) [11].

В схеме XII (рис. 1,б) для сокращения времени выгорания применяют форкамерное зажигание сильными струями в сочетании с искривленным рабочим каналом [11, 47].

В схемах XIII и XIV (рис. 1,б) применяются специальные вставки (стержневые или с отверстиями), также сокращающие преддетонационное расстояние [48]. Функции этих вставок могут выполнять патрубки для ввода порошка в ствол.

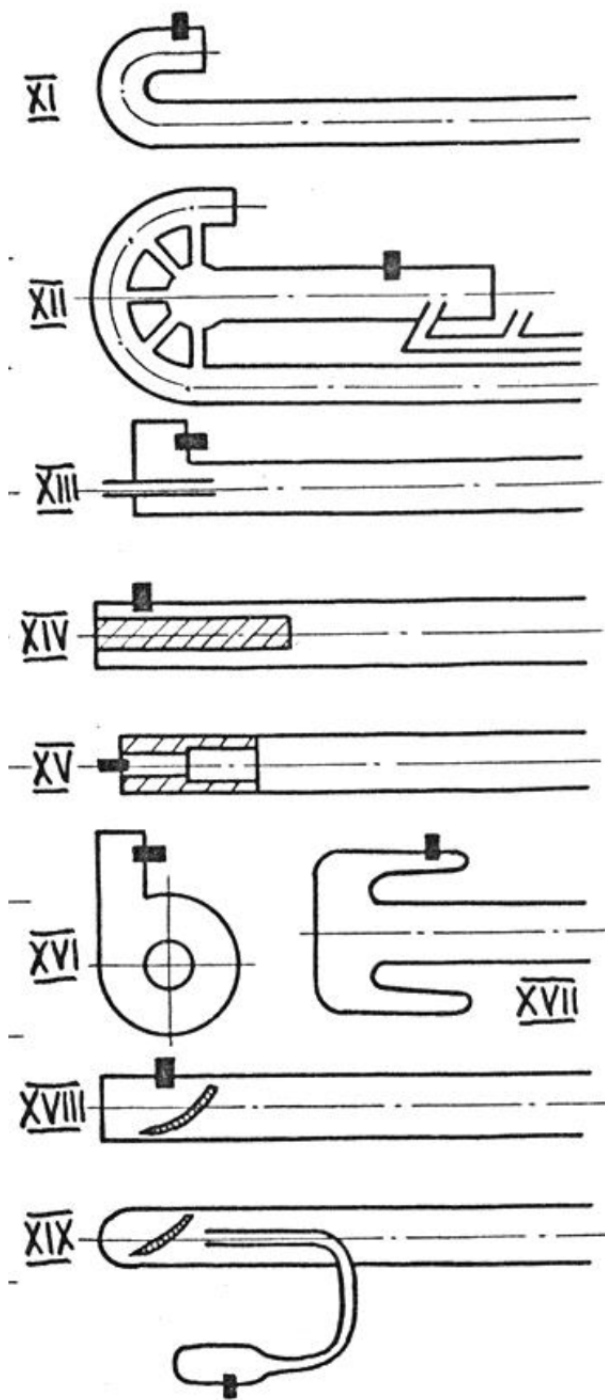


Рис. 1, б. Схемы устройств для ускорения перехода горения в детонацию

Определенные преимущества имеют тангенциально расположенные (XVI) и кольцевые (XVII) (рис. 1, б) камеры зажигания, к тому же обеспечивающие более равномерное заполнение ствола свежей горючей смесью.

Для ускорения выгорания смеси и сокращения преддетонационного расстояния применяют спиральные и винтовые турбулизаторы, устанавливаемые на начальном участке камеры сгорания (схемы XVIII и XIX) (рис. 1, б) [45, 46].

Известно применение и других приемов: ступенчатые стволы с увеличением размеров поперечного сечения по направлению движения фронта горения; воспламенение смеси множеством одновременно срабатывающих источников зажигания или воспламенение смеси от нескольких источников, последовательно срабатывающих с заданной скоростью [40], воспламенение лучом лазера; смещение источника зажигания от закрытого торца; использование мощных электрических разрядов и химических запалов; предварительный подогрев горючей смеси и пр.

Если скорость горения довольно просто можно изменить в желательном направлении изменением аэродинамики потоков в камере, т.е. увеличением эффективной поверхности пламени, расслоением заряда, то улучшение воспламенения требует локального или общего изменения условий протекания химической реакции, которое не может быть обеспечено только конструктивными модификациями камеры сгорания. Надежность и интенсивность стадии воспламенения горючей смеси в ДГУ влияет не только на скорость тепловыделения, но и определяет такие характеристики, как экономичность ДГУ, возможность работы с различными видами и характером исходной подготовки горючих смесей. Из способов улучшения характеристик воспламенения рабочей смеси в первую очередь следует отметить внедрение промоторов в горючее и форкамерно-факельное зажигание [49]. Несмотря на кажущуюся несхожесть этих решений технической задачи, они имеют общую научную основу: создание благоприятных условий для самовоспламенения за счет дополнительной подачи в топливовоздушную смесь химически активных частиц (в общем случае этот термин объединяет атомы, радикалы и легко окисляющиеся промежуточные продукты) и повышение температуры перед воспламенением.

Увеличение скорости движения потока смеси приводит к увеличению максимальной скорости пламени в 2-4 раза по сравнению со скоростью распространения пламени по покоящейся смеси [11]. Для всех конструкций камер горения в потоке происходит с большей скоростью, чем в покоящемся газе. Причина в том, что фронт пламени искривляется и становится турбулентным. В работах [29, 52] показана возможность быстрого ПГД в условиях высокоскоростного течения (~ 10 м/с) с раздельной подачей топливных компонентов — природного газа (98.9% метана) и воздуха — в трубе диаметром 150 мм с открытым концом при слабом источнике зажигания с энергией ~ 1 Дж. Показано, что в такой трубе с помощью препятствий-турбулизаторов специальной формы и расстановки можно обеспечить надежный ПГД на расстоянии 3—4 м от источника зажигания за время 15—16 мс с момента зажигания.

В «предетонаторах» (ДТ с донорной топливной смесью), как правило, используются слабые источники зажигания (запальные свечи), препятствия-турбулизаторы, обеспечивающие быстрый ПГД [37], а в качестве окислителя — кислород. Кроме требования надежной работы в частотном режиме к предетонаторам предъявляют требования высокой живучести и компактности — минимальных габаритных размеров, обеспечивающих генерацию инициирующей ДВ при минимальном запасе донорной топливной смеси. Однако продукты детонации кислородных смесей имеют очень высокую температуру (выше 3000 К), и неохлаждаемые препятствия-турбулизаторы быстро разрушаются, тогда как отказ от использования препятствий-турбулизаторов приводит к значительному (в десятки раз) увеличению габаритных размеров предетонаторов.

Прямое инициирование детонации. В отличие от прямого инициирования детонации переход от медленного горения к детонации характеризуется, с одной стороны, меньшими энергозатратами, а с другой — меньшей воспроизводимостью. А в ряде горючих смесей (водород-воздух, метан-воздух) детонация как следствие собственного ускорения ламинарного пламени недостижима, и предельным режимом является сверхзвуковое пламя, не обеспечивающее энергетически перспективного детонационного термодинамического цикла. Поэтому прямое инициирование детонации является более точно контролируемым [53]. К недостаткам этого подхода следует относиться достаточно большой энерговклад за микросекундные времена, оказывающий высокую интенсивность воздействия на детонационно-способную смесь. Это приводит к возникновению больших динамических нагрузок на стенки рабочей камеры и существенное изменение состояния горючей среды в области подвода энергии.

Для прямого инициирования детонации необходимо существование достаточно сильной ударной волны, способной зажечь горючую смесь. Одним из способов создания такой волны является концентрированный подвод энергии - выделение энергии по какому-либо закону в некотором объеме в течение достаточно малого промежутка времени [53]. При данном способе инициирования сгорание газа может происходить как в волне детонации, так и во фронте пламени. При этом один режим горения может переходить в другой, например, с течением времени волна детонации может расщепиться на обычную ударную волну и следующий за ним фронт медленного горения.

Параметрами, влияющими на прямое инициирование детонации, являются: критическая энергия, критическое время, критический объем [54]. Под критической энергией подразумевается минимальное количество энергии, которую необходимо затратить для инициирования детонации в заданных условиях. Иницирование детонации

определяется временем ввода энергии в заданный объем. Поэтому критическая энергия является функцией времени и объема.

В качестве горючих в детонационно-газовых устройствах используются газообразные и жидкие углеводороды: природный газ, пропан-бутан, бензин, авиационный керосин и дизельное топливо, что связано с развитой инфраструктурой их производства и сбыта. Поскольку эти горючие не предназначены для детонационного сжигания, ведутся поиски модификации их характеристик, в частности, повышения их детонационной способности. Одно из возможных решений — использование для этой цели добавки водорода — альтернативного топлива с широкими концентрационными пределами детонации и высокой детонационной способностью. В [55] показано, что добавки водорода существенно облегчают условия инициирования ДВ в стехиометрической метано-воздушной смеси.

Увеличение радиуса, по которому осуществляется ввод энергии, снижает удельную мощность источника энергии, уменьшает пороговые значения температуры, которую необходимо достичь за счет ввода энергии, увеличивает время, в течение которого требуется ввести критическую энергию [54]. Поэтому, целесообразно создавать источники инициирования, в которых обеспечивается объемный ввод энергии.

Существенное снижение критической энергии прямого инициирования детонации (например, искровым разрядом) в топливо-кислородных смесях с локальными неоднородностями, сформировавшимися при воздействии неравновесной плазмы, может быть использовано для оптимизации существующих и разработки новых схем плазменного инициирования детонации [56].

При кольцевом электрическом разряде в метанокислородной смеси обнаружен уникальный режим отражения ударных и детонационных волн от оси симметрии [57]. При докритических значениях энергии разряда, происходящем в ограниченном объеме, формируется высокоскоростной режим распространения горения, связанный сего турбулизацией.

Анализ масштаба времени процесса инициирования детонации, осуществляемый комбинированным поджигом с помощью коронного и искрового разрядов показал, что детонация [58] формируется на расстоянии порядка 1 см от места искрового разряда, и, следовательно, процесс формирования неразрывно связан с взаимодействием взрывной волны от искры с локальными неоднородностями в реагирующей среде, вызванными стримерами коронного разряда. При этом возможны два механизма инициирования детонации: 1. при взаимодействии ударной волны с протяженными тепловыми неоднородностями, одномерный механизм, 2. дифракция ударной волны

на тепловой неоднородности с формированием поперечной детонационной волны. Наименьшее значение критической энергии прямого инициирования детонации (0,4 Дж/см) обеспечивается во втором механизме, когда основную роль играют двумерные эффекты дифракции ударной волны.

Бесконтактные методы реализуют более мягкое инициирование детонации. Химически активные микрочастицы, выполненные из нанотрубок, легированных железом, при лучистом нагреве и последующем испарении обеспечивают локальный энерговыклад, достаточный для инициирования детонации в облаке взвешенных в горючей газовой смеси частиц [54]. Необходимый для воспламенения разогрев газообразной горючей смеси может быть достигнут также при лучистом нагреве химически нейтральных микрочастиц, взвешенных в этой среде [59].

Принципиальное отличие лазерного инициирования горения и детонации от других способов (взрыв, электрический разряд, разогрев о поверхность, искра) состоит в возможности дистанционного и почти мгновенного возбуждения процессов в больших объемах взрывоопасной смеси [53]. Конфигурация лазерного пучка (например, в виде кольца или вытянутого прямоугольника) может формировать не только расходящийся, но и плоский или сходящийся фронт волны горения или фронт ударной волны в случае образования плазмы.

Для снижения энергии прямого инициирования детонации в ДТ устанавливают центральное тело специальной формы. С помощью численной оптимизации найден профиль центрального тела, максимально облегчающий условия перехода УВ в ДВ в трубе со стехиометрической метано-воздушной смесью [55].

При комбинированном способе снижения энергии прямого инициирования детонации кроме установки в трубе центрального тела специальной формы в горючую смесь добавляют водород. Добавки водорода существенно облегчают условия инициирования ДВ в стехиометрической метано-воздушной смеси [55].

Интересным представляется прямое инициирование детонации встречными соударяющимися струями газов [60].

Выводы. Механизм инициирования режима детонационного горения в технических устройствах зависит от состава, свойств и параметров начального состояния газовых смесей, вида источника зажигания и его параметров, конструктивных особенностей и параметров камер зажигания, детонационных камер сгорания и соединяющих их каналов.

Выбор рациональных способов и приемов инициирования газовой детонации должен осуществляться с учетом области применения, условий эксплуатации и требований к надежности инициирования.

В настоящее время отсутствуют достоверные критерии и рекомендации для выбора вида и параметров рациональных систем контролируемого инициирования газовой детонации в устройствах, использующих горение.

Целесообразно разработать рекомендации и критерии выбора способов инициирования газовой детонации для конкретных применений и видов детонационно-газового оборудования.

Л и т е р а т у р а

1. Щелкин К.И., Трошин Я.К. Газодинамика горения. — М.: Изд-во АН СССР. - 1963. - 256 с.
2. Шоршоров М.Х., Харламов Ю.А. Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий. — М.: Наука, 1978. — 224 с.
3. Баженова Т. В., Голуб В. В. Использование газовой детонации в управляемом частотном режиме (обзор) // Физика горения и взрыва, 2003, т.39, № 4. - С.3-21.
4. Roy G.D., Frolov S.M., Borisov A.A., Netzer D.W. Pulse detonation propulsion: Challenges, current status, and future perspective // Prog. Energ. Combust. Sci., 2004. Vol. 30. Iss. 6. P.545-672.
5. Васильев А.А. Оптимизация перехода горения в детонацию // Физика горения и взрыва, 2012, т. 48, № 3. - С.25-34.
6. Взрывные явления. Оценка и последствия: В 2-х кн. Кн. 1 / Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П. и др. - М: Мир, 1986. - 319 с.
7. Зверев И.Н., Смирнов Н.Н. Газодинамика горения. - М.: Изд-во МГУ, 1987. - 307 с.
8. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч.1. - М: Гл. ред. Физ.-мат. лит. - 1987. - 464 с.
9. Зельдович Я.Б. Избранные труды: Химическая физика и гидродинамика. - М.: Наука. 1984. - 374 с.
10. Детонационно-газовая аппаратура для напыления покрытий / Ю.А. Харламов, М.Х. Шоршоров, Ю.И. Писклов, Б.Л. Рябошапка. - М.: ИМЕТ АН СССР, 1980 - 65 с.
11. О механизме импульсной очистки. - Казань: Изд-во КГУ, 1979 - 72 с.
12. Подымов В.Н. Релаксационные колебания пламени - Казань: Изд-во КГУ, 1979 - 63 с.
13. Подымов В.Н., Северянин В.С., Щелоков Я.М. Прикладные исследования вибрационного горения. - Казань: Изд-во КГУ, 1978. - 219 с.
14. Хитрин Л.Н. Физика горения и взрыва. М.: Изд-во МГУ. - 1957.
15. Пятницкий Л.И. О механизме ускорения пламени при переходе нормального горения в детонацию. Доклады АН СССР, 1962, т. 144, № 6, с. 1262-1265.
16. Фрайвальд Г. Быстрые химические реакции, горение и детонация в газах. В кн.: Физика быстротекающих процессов. Т. III. - М.: Мир, 1971.
17. Попов В.А. Некоторые закономерности преддетонационного участка распространения пламени. - Известия АН СССР. ОТН, 1953, № 10, с. 1428-1439.
18. Ударные волны в реальных газах. М.: Наука, 1968.
19. Саламандра Г.Д. Состояние среды перед фронтом пламени в начальной стадии процесса сгорания // Теплофизические свойства и газодинамика высокотемпературных сред. М.: Наука, 1972, с. 122-130.

20. Фролов С.М., Аксенов В.С., Шамшин И.О. Иницирование газовой детонации в трубах с крутыми U-образными поворотами // Доклады Академии наук, 2007, том 417, № 6, С. 1-5.
21. Уткин П.С., Ахмедьянов И.Ф., Лебедева А.Ю. Численное исследование иницирования газовой детонации в трубах со сложной геометрией стенок // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2011, № 4 (3), с. 1206–1208.
22. Frolov S.M. Detonation initiation techniques for pulse detonation propulsion // Progress in Propulsion Physics 1 (2009) 321-340.
23. Смирнов Н.Н., Никитин В.Ф. Влияние геометрии канала и температуры смеси на переход горения в детонацию в газах // Физика горения и взрыва, 2004, т. 40, № 2. – С. 68-83.
24. Уткин П.С. Численное моделирование иницирования и распространения волн газовой детонации в профилированных трубах. Автореф....к.ф.-м.н. – М., 2010. – 23 с.
25. Фролов С.М., Аксенов В.С. Иницирование газовой детонации в трубе с профилированным препятствием // Доклады РАН, 2009, том 427, № 3, с. 344-347.
26. Фролов С.М., Аксенов В.С., Скрипник А.А. Иницирование детонации в смеси природного газа с воздухом в трубе с фокусирующим соплом // Доклады РАН, 2011, том 436, № 3, с. 346-350.
27. Иницирование детонации в трубе с профилированным центральным телом / С. М. Фролов, И. О. Шамшин, С. Н. Медведев, А. В. Дубровский // Доклады РАН, 2011, том 438, № 5, с. 640-643.
28. Сокращение длины и времени перехода горения в детонацию в трубе с профилированными регулярными препятствиями / С. М. Фролов, И. В. Семенов, П. В. Комиссаров, П. С. Уткин, В. В. Марков // Доклады РАН, 2007, том 415, № 4, с. 509-513.
29. Циклический переход горения в детонацию в проточной камере сгорания импульсно-детонационного горелочного устройства / С. М. Фролов, В. С. Аксенов, К. А. Авдеев, А. А. Борисов и др. // Химическая физика, 2013, том 32, № 3. – С. 39-43.
30. Ассад М.С., Пенязков О.Г. Способы ускорения перехода горения в детонацию в малогабаритной камере сгорания реактивного типа // ВЕСЦІ НАЦЫЯНАЛЬНАЙ АКАДЭМІІ НАВУК БЕЛАРУСІ, № 2, 2015. СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК. – С.72-76.
31. Иницирование газовой детонации бегущим импульсом принудительного зажигания / С. М. Фролов, В. Я. Басевич, В. С. Аксенов, С. А. Полихов // Доклады Академии наук, 2004, том 394, № 2, с. 1-3.
32. Жуков В.П. Воспламенение насыщенных углеводородов при высоких давлениях и иницирование детонации наносекундным разрядом. Автореф....к.ф.-м.н. – Долгопрудный, 2005. – 23 с.
33. Ракитин А.Е. Иницирование детонации в газах высоковольтным наносекундным разрядом. Автореф....к.ф.-м.н. – Долгопрудный, 2009. – 24 с.
34. Смирнов Н.Н. Газовая и волновая динамика, Айрис-пресс, Москва, 2005.
35. Иванов К.В. Управление переходом горения в детонацию в каналах субкритического диаметра. Автореф....к.ф.-м.н. – М., 2012. – 24 с.
36. Коновалов Г.М. Исследование влияния импульсного коронного разряда на процесс развития детонации в газовых смесях. Автореф....к.ф.-м.н. – М., 2007. – 22 с.
37. Компактный импульсный преддетонатор для иницирования рабочего процесса в детонационных камерах сгорания / В.А. Сметанюк, В.С. Аксёнов, А.С. Коваль, С.М. Фролов // Горение и взрыв, 2017, Т.10. № 2. – С.66-72.
38. Фролов С.М., Аксенов В.С., Басевич В.Я. Иницирование гетерогенной детонации в трубах с витками и спиралью Щелкина // Теплофизика высоких температур, 2006, том 44, № 2. – С.285-292.
39. Соколик А.С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. - М.: Изд-во АН СССР, 1960. - 428 с.
40. Методы наружной очистки котлов-утилизаторов / Я.М. Щелоков, Э.М. Телегин, В.Н. Подымов, В.И. Гасников. - Казань: Изд-во КГУ, 1974. - 216 с.
41. А.с. № 457844 (СССР). Камера пульсирующего горения / Э.М. Телегин, Д.А. Ильин, В.Н. Подымов и др. - БИ № 3, 1975.
42. А.с. № 612125 (СССР). Устройство пульсирующего горения / Н.Р. Чучалин, В.Н. Подымов, Я.М. Щелоков - БИ № 23, 1978.
43. А.с. № 612122 (СССР). Устройство для создания пульсирующего потока продуктов сгорания /Э.М. Телегин, Я.М.Щелоков, О.В. Танцырев и др. - БИ № 23, 1978.
44. Харламов Ю.А. Детонационно-газовые установки для нанесения покрытий (обзор) // Сварочное производство, 1989, № 11. – С.21-24.
45. Разрушение горного массива машинами взрывоимпульсного действия. М.: Наука, 1974. - 230 с.
46. Взрывоимпульсное разрушение горных пород. М.: Наука, 1978. - 212 с.
47. А.с. № 612123(СССР). Устройство для создания пульсирующего потока продуктов сгорания /Э.М. Телегин, А.Г. Габидовский, В.Н. Подымов и др. - БИ № 23, 1978.
48. Experimental and theoretical studies on the formation of detonation waves in variable geometry tubes/ By E.Bolinger, M.C. Fong et al. Washington, 1963 (NASA TN D-1983). – 75 p.
49. Самовоспламенение углеводородов в присутствии промотирующих добавок / А.А. Борисов, Б.Е. Гельфанд, Е.В. Драгалова и др. // Химическая физика, 1983, № 6, с. 838 - 848.
50. Мехтиев Р.И. Особенности образования NO и CHx при форкамерно-факельном поджигании горючей смеси и возможности уменьшения их концентраций. - Физика горения и взрыва, 1984, № 5, с. 70-73.
51. Скорость и стабильность выгорания при форкамерно-факельном зажигании в двигателе внутреннего сгорания / Л.А. Гуссак, В.П. Карпов, В.Г. Слущкий, А.И. Спасский.- Физика горения и взрыва, 1983, № 5, с. 104 - 108.
52. Переход горения в детонацию в условиях высокоскоростного течения с отдельной подачей топливных компонентов / С. М. Фролов, В. С. Аксенов, К. А. Авдеев, А. А. Борисов, В. С. Иванов, А. С. Коваль, С. Н. Медведев, В. А. Сметанюк, Ф. С. Фролов, И.О. Шамшин // Доклады Академии наук, 2013, том 449, № 6, с. 1-4.
53. Волков К.Н., Булат П.В. История исследования детонационного горения // Ударные волны: Сборник

- статей – Краснодар: Издательский Дом – ЮГ, 2015 – С.105-128.
54. Корытченко К.В. Анализ условий прямого инициирования детонации в водородно-кислородной смеси атмосферного давления // Вісник НТУ «ХПІ». 2012. № 49 (955). – С. 85-98.
 55. Медведев С.Н. Математическое моделирование самовоспламенения, горения и детонации тройных смесей углеводород – водород – воздух. Автореф....к.ф.-м.н. – М., 2011. – 23 с.
 56. Заев И.А. Расчетно-теоретическое исследование механизмов инициирования детонации в газовых смесях при воздействии неравновесной плазмы электрического разряда. Автореф....к.ф.-м.н. – М., 2008. – 21 с.
 57. Мануйлович И.С. Взрывные и детонационные процессы в каналах и открытом пространстве. Автореф....к.ф.-м.н. – М., 2010. – 25 с.
 58. Заев И. А., Кириллов И. А., Потапкин Б. В. Теоретическое исследование механизмов инициирования детонации при взаимодействии взрывной волны с тепловыми неоднородностями, вызванными стримерами коронного разряда // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2008. Т. 6. <http://chemphys.edu.ru/issues/2008-6/articles/278/>
 59. Объемное инициирование газовой детонации путем лучистого нагрева взвешенных в газе микрочастиц / В.П. Ефремов, М.Ф. Иванов, А.Д. Киверин, И.С. Яковенко // Письма в ЖТФ, 2016, том 42, вып. 4. – С.52-59.
 60. Kailasanath K., Li C. Detonation Initiators for Propulsion Systems https://www.nrl.navy.mil/content_images/05Simulation_Kailasanath.pdf
 61. Кроль О.С., Шевченко С.В., Соколов В.І. Проектування металорізальних верстатів у середовищі APMWinMachine. – Луганськ: ЧНУ ім. В. Даля. – 2011. – 388 с.
 62. Соколов В.І., Кроль О.С., Єпіфанова О.В. Гідравліка. – Северодонецьк: ЧНУ ім. В. Даля. – 2017. – 160 с.
 63. Кроль О.С., Шумакова Т.О., Соколов В.І. Проектування зуборізних інструментів за допомогою системи КОМПАС. – Луганськ: ЧНУ ім. В. Даля. – 2013. – 142 с.
 7. Zverev I.N., Smirnov N.N. Gas dynamics of combustion. – Moscow: Izd-vo MGU, 1987. – 307 p.
 8. Nigmatulin R.I. Dynamics of multiphase media. Part 1. – M.: Ch. Ed. Phys.-Math. lit.- 1987. – 464 p.
 9. Zel'dovich Ya.B. Selected works: Chemical physics and hydrodynamics. – Moscow: Science. 1984. – 374 p.
 10. Detonation-gas equipment for coating deposition / Yu.A. Kharlamov, M.H. Shorshorov, Yu.I. Pisklov, B.L. Ryaboshapko. – M.: IMET AS USSR, 1980 – 65 p.
 11. On the mechanism of pulse cleaning. – Kazan: Publishing house KSU, 1979 – 72 p.
 12. Podymov V.N. Relaxation oscillations of the flame – Kazan: Izd-vo KSU, 1979 – 63 p.
 13. Podymov V.N., Severyanin V.S., Shchelokov Ya.M. Applied research of vibration combustion. – Kazan: Publishing house KSU, 1978. – 219 p.
 14. Khitrin L.N. The physics of combustion and explosion. Moscow: Moscow State University. – 1957.
 15. Pyatnitsky L.I. On the mechanism of the acceleration of the flame in the transition of normal combustion to detonation. Reports of the Academy of Sciences of the USSR, 1962, v. 144, No. 6, p. 1262-1265.
 16. Freivald G. Rapid chemical reactions, combustion and detonation in gases. In: Physics of fast processes. T. III. – Moscow: Mir, 1971.
 17. Popov V.A. Some regularities of the predetonational section of flame propagation. – Izvestiya of the USSR Academy of Sciences. OTN, 1953, No. 10, p. 1428-1439.
 18. Shock waves in real gases. Moscow: Nauka, 1968.
 19. Salamandra G.D. State of the environment in front of the flame front in the initial stage of the combustion process // Thermophysical properties and gas dynamics of high-temperature media. Moscow: Nauka, 1972, p. 122-130.
 20. Frolov S.M., Aksenov V.S., Shamshin I.O. Initiation of gas detonation in pipes with steep U-shaped turns // Reports of the Academy of Sciences, 2007, Vol. 417, No. 6, pp. 1-5.
 21. Utkin P.S., Ahmadyanov I.F., Lebedeva A.Yu. Numerical study of the initiation of gas detonation in pipes with complex wall geometry // Vestnik Nizhegorodskogo Universiteta im. N.I. Lobachevsky, 2011, No. 4 (3), p. 1206-1208.
 22. Frolov S.M. Detonation initiation techniques for pulse detonation propulsion // Progress in Propulsion Physics 1 (2009) 321-340.
 23. Smirnov N.N., Nikitin V.F. Influence of channel geometry and mixture temperature on the transition of combustion to detonation in gases // Physics of Combustion and Explosion, 2004, v. 40, No. 2. – P. 68-83.
 24. Utkin P.S. Numerical simulation of initiation and propagation of gas detonation waves in profiled tubes. Autoref.... k.f.-m.n. – M., 2010. – 23 p.
 25. Frolov S.M., Aksenov V.S. The Initiation of Gas Detonation in a Pipe with a Profiled Obstacle // Doklady RAN, 2009, Vol. 427, No. 3, pp. 344-347.
 26. Frolov S.M., Aksenov V.S., Skripnik A.A. Initiation of detonation in a mixture of natural gas with air in a pipe with a focusing nozzle // Doklady RAN, 2011, Vol. 436, No. 3, pp. 346-350.
 27. Initiation of detonation in a pipe with a profiled central body / S.M. Frolov, I.O. Shamshin, S.N. Medvedev, A.V. Dubrovsky // Doklady RAN, 2011, Vol. 438, No. 5, pp. 640-643.
 28. Reduction of the length and time of the transition of combustion to detonation in a pipe with profiled regular obstacles / S.M. Frolov, I.V. Semenov, P.V. Komissarov, P.S.

References

1. Shchelkin K.I., Troshin Ya.K. Gas dynamics of combustion. — M.: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR.- 1963.-256 p.
2. Shorshorov M.Kh., Kharlamov Yu.A. Physicochemical bases of detonation-gas spraying of coatings. – M.: Nauka, 1978. – 224 p.
3. Bazhenova T.V., Golub V.V. Use of gas detonation in controlled frequency mode (review) // Physics of Combustion and Explosion, 2003, vol. 39, no. 4. – P.3-21.
4. Roy G.D., Frolov S.M., Borisov A.A., Netzer D.W. Pulse detonation propulsion: Challenges, current status, and future perspective // Prog. Energ. Combust. Sci., 2004. Vol. 30. Iss. 6. P.545-672.
5. Vasiliev A.A. Optimization of the transition of combustion to detonation // Physics of Combustion and Explosion, 2012, vol. 48, No. 3. – P.25-34.
6. Explosive phenomena. Evaluation and consequences: In 2 books. Book. 1 / Baker U., Cox P., Westin P. et al. – M: Mir, 1986. – 319 p.

- Utkin, VV Markov // *Doklady RAN*, 2007, Vol. 415, No. 4, pp. 509-513.
29. Cyclic transition of combustion to detonation in a flowing combustion chamber of a pulse detonation burner device / SM Frolov, VS Aksenov, KA Avdeev, AA Borisov et al. // *Chemical Physics*, 2013, Volume 32, No. 3. - P. 39-43.
30. M. Assad, O. Penyzkov. Methods for accelerating the transition of combustion to detonation in a small-sized combustion chamber of a reactive type. VESTSI NATSYANALNYA AKADEMII NAVUK BELARUS, No. 2, 2015. SERIES FIZIKA-TEKhNICHNYKH NAVUK. - P.72-76.
31. Initiation of gas detonation by a traveling impulse of forced ignition / SM Frolov, V. Ya. Basevich, VS Aksenov. SA Polikhov // *Reports of the Academy of Sciences*, 2004, vol. 394, No. 2, p. 1-3.
32. Zhukov V.P. Ignition of saturated hydrocarbons at high pressures and initiation of detonation by a nanosecond discharge. Autorefkf.-mn. - Dolgoprudny, 2005. - 23 p.
33. Rakitin A.E. Initiation of detonation in gases by a high-voltage nanosecond discharge. Autorefkf.-mn. - Dolgoprudny, 2009. - 24 p.
34. Smirnov N.N. Gas and wave dynamics, Iris Press, Moscow, 2005.
35. Ivanov K.V. Control of the combustion transition in combustion in detonation in channels of subcritical diameter. Autorefkf.-mn. - M., 2012. - 24 p.
36. Kononov G.M. Investigation of the effect of a pulsed corona discharge on the development of detonation in gas mixtures. Autorefkf.-mn. - M., 2007. - 22 p.
37. Compact pulse predetonator for initiating the working process in detonation combustion chambers / V.A. Smetanyuk, V.S. Aksenov, A.S. Koval, S.M. Frolov // *Burning and Explosion*, 2017, T.10. № 2. - P.66-72.
38. Frolov SM, Aksenov VS, Basevich V.Ya. Initiation of heterogeneous detonation in pipes with coils and spiral Schelkina // *Thermophysics of high temperatures*, 2006, Volume 44, No. 2. - P.285-292.
39. Sokolik A.S. Self-ignition, flame and detonation in gases. - Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1960. - 428 p.
40. Methods of external cleaning of waste-heat boilers / Ya.M. Shchelokov, E.M. Telegin, V.N. Podymov, V.I. Gasnikov. - Kazan: Publishing house of KSU, 1974. - 216 p.
41. A.c. No. 457844 (USSR). Pulsating Burning Chamber / EM.Telegin, D.A. Ilyin, V.N. Podymov and. others - BI No. 3, 1975.
42. A.c. No. 612125 (USSR). The device of pulsating combustion / N.R. Chuchalin, V.N., Podymov, Ya.M.Shchelokov - BI No. 23, 1978.
43. A.c. No. 612122 (USSR). Device for creating pulsating flow of combustion products / E.M. Telegin, Ya.M.Sh Shchelokov, O.V. Dancirev et. al. - BI No. 23, 1978.
44. Kharlamov Yu.A. Detonation-gas plants for coating applications (review) // *Welding Production*, 1989, No. 11. - P.21-24.
45. Destruction of the mountain massif by explosion-pulse machines. Moscow: Nauka, 1974. - 230 p.
46. Explosive destruction of rocks. Moscow: Nauka, 1978. - 212 p.
47. A.c. No. 612123 (USSR). Device for creating pulsating flow of combustion products / EM. Telegin, A.G. Gabidovsky, V.N. Podymov et. al. - BI No. 23, 1978.
48. Experimental and theoretical studies on the formation of detonation waves in variable geometry tubes/ By E.Bolinger, M.C. Fong et al. Washington, 1963 (NASA TN D-1983). - 75 p.
49. Self-ignition of hydrocarbons in the presence of promoting additives. Borisov, B.E. Gelfand, E.V. Dragalova et al., *Chemical Chemistry*, 1983, No. 6, p. 838 - 848.
50. Mekhtiyev RI Features of the formation of NO and CHx in the prechamber-flare ignition of the combustible mixture and the possibility of reducing their concentrations. - *Physics of burning and explosion*, 1984, No. 5, p. 70-73.
51. Velocity and stability of burn-up in prechamber-flare ignition in an internal combustion engine / L.A. Gussak, V.P. Karpov, V.G. Slutsky, A.I. Spassky. - *Physics of Combustion and Explosion*, 1983, No. 5, p. 104 - 108.
52. Combustion into detonation under conditions of high-velocity flow with separate supply of fuel components / SM Frolov, VS Aksenov, KA Avdeev, AA Borisov, VS Ivanov, A. S. Koval, S. N. Medvedev, V. A. Smetanyuk, F. S. Frolov, I.O. Shamshin // *Reports of the Academy of Sciences*, 2013, volume 449, No. 6, p. 1-4.
53. Volkov K.N., Bulat P.V. History of Detonation Combustion Studies // *Shock Waves: Collection of Articles - Krasnodar: Publishing House - SOUTH*, 2015 - P.105-128.
54. Korytchenko K.V. Analysis of the conditions for direct initiation of detonation in a hydrogen-oxygen mixture of atmospheric pressure // *Bicnik NTU "KhPI"*. 2012. No. 49 (955). - P. 85-98.
55. Medvedev SN Mathematical modeling of autoignition, combustion and detonation of ternary hydrocarbon-hydrogen-air mixtures. Autorefkf.-mn. - M., 2011. - 23 p.
56. Zaev IA A theoretical and theoretical study of the mechanisms of initiation of detonation in gas mixtures under the influence of a nonequilibrium plasma of an electric discharge. Autorefkf.-mn. - Moscow, 2008. - 21 p.
57. Manuilovich IS Explosive and detonation processes in channels and open space. Auto-refph-m. - M., 2010. - 25 with.
58. Zaev IA, Kirillov IA, Potapkin BV Theoretical investigation of the deuteron initiation mechanisms during the interaction of a blast wave with thermal inhomogeneities caused by corona discharge streamers // *Physico-chemical kinetics in a gas di- nuke*. 2008. T. 6. <http://chemphys.edu.ru/issues/2008-6/articles/278/>
59. Volumetric initiation of gas detonation due to radiant heating of microparticles suspended in a gas / V.P. Efremov, M.F. Ivanov, A.D. Kiverin, I.S. Yakovenko // *Letters in ZhTF*, 2016, Vol. 42, no. 4. - P.52-59.
60. Kailasanath K., Li C. Detonation Initiators for Propulsion Systems https://www.nrl.navy.mil/content_images/05Simulation_Kailasanath.pdf
61. Krol O., Shevchenko S.V., Sokolov V. Design machine tools in environment APM WinMachine. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2011.
62. Sokolov V., Krol O., Yepifanova O. Hydraulics. V. Dahl EUNU, Severodonetsk, 2017.
63. Krol O., Shumakova T., Sokolov V. Design metal cutting instruments by dint of system of KOMPAS. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2013.

Харламов Ю.О. Керуюче ініціювання газової детонації.

У статті розглянуті способи і методи керованого ініціювання газової детонації в технічних пристроях, що використовують як джерело енергії детонаційне горіння газів. Систематизовані і класифіковані конструктивно-технологічні способи і прийоми ініціювання. Розглянуто схеми конструкцій для прискорення переходу горіння в детонацію. Коротко описані методи прямого ініціювання детонації.

Ключові слова: детонаційна хвиля, детонаційна камера згорання, джерело запалювання, преддетонаційна відстань, джерело запалювання, перешкоди-турбулізатори, ударна хвиля.

Kharlamov Y.A. Controlled initiation of a gaseous detonation

The means and methods of controlled initiation of gas detonation in technical devices that use detonation combustion of gases as an energy source are considered in the article. Systematized and categorized constructive-technological means and methods of initiation. Schemes of designs for accelerating the transition of combustion to detonation are considered. The methods of direct initiation of detonation are briefly described.

Key words: detonation wave, detonation combustion chamber, ignition source, predetonation distance, ignition source, obstacle-turbulizers, shock wave.

Харламов Ю.О. – д.т.н., професор, професор кафедри машинобудування та прикладної механіки Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: yuriy.kharlamov@gmail.com

Рецензент: д.т.н., проф. **Соколов В.І.**

Стаття подана 12.10.2017

УДК 546:621.9.048.4:662.61

РАЗВИТИЕ ДЕТОНАЦИОННО-ГАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Харламов Ю.А.

DEVELOPMENT OF GASEOUS DETONATION TECHNOLOGIES

Kharlamov Y.A.

Рассмотрены особенности газовой детонации как источника энергии. Систематизированы и проанализированы основные области практического применения газовой детонации в промышленности, на транспорте и в энергетике. Показано, что более высокая эффективность сгорания топлива в детонационном режиме обуславливает перспективность расширения сфер применения газовой детонации.

Ключевые слова: взрывчатые вещества, газовая детонация, детонационная волна, двигатель, напыление, устройство, энергетическая установка.

Введение. Взрывчатые вещества (ВВ), кроме применения в военных целях и в добывающей промышленности, используют для выполнения различных технологических операций в машиностроении и других отраслях. Применение взрывных технологий позволяет в короткие сроки с приемлемыми затратами решать многие технологические проблемы, в том числе возникающие при создании новой техники. Развитие взрывных технологий продолжается и в настоящее время.

Постановка проблемы. Для реализации взрывных технологий используются заряды твердых ВВ и изделия из них (например, удлиненные кумулятивные заряды, кумулятивные перфораторы), системы их инициирования, системы контроля безопасности и т. п. Вместе с объектами воздействия (свариваемыми пластинами, упрочняемыми деталями, заготовками для штамповки и др.), специальной оснасткой (матрицами для штамповки, контейнерами для сохранения готового изделия, основаниями и опорами) заряды ВВ и системы их инициирования образуют технологическое взрывное устройство. Очень часто технологические взрывные устройства располагаются в специальных защитных взрывостойких камерах (взрывных камерах), являющимися по сути промышленными взрывными установками [1]. Тем не менее широкое применение твердых ВВ ограничено, прежде всего,

по требованиям безопасности. Поэтому практический интерес представляет использование газовой детонации.

Анализ последних исследований и публикаций. Сейчас наблюдается «настороженное отношение неспециалистов к взрывным технологиям» [1]. Уровень давлений, температур и скоростей, развиваемых за детонационными или близкими к ним по интенсивности ударными волнами в газах, а также импульсный характер воздействия указанных факторов, определяют большие потенциальные возможности их технического и технологического использования. Многочисленные возможные приложения газовой детонации описаны в работах [1-8]. Частота повторения циклов газовой детонации достигает 10, а в отдельных случаях – до 100 Гц.

Цель статьи. Для дальнейшего развития и разработки новых способов и устройств, основанных на использовании газовой детонации, необходимо систематизировать и классифицировать детонационно-газовые технологии и устройства и сферы их применения.

Газовая детонация

Детонационная волна (ДВ) в газовой смеси представляет собой многофронтный газодинамический комплекс [8-11]. Движение поперечных волн в стационарно распространяющейся ДВ носит квазипериодический характер, а их траектории образуют упорядоченную структуру с характерным поперечным масштабом, называемым размером ячейки a . С использованием размера ячейки определяются минимальные размеры канала, в котором может распространяться детонация, критическая энергия инициирования детонации, скорость и размеры быстролетящего тела, необходимые для возбуждения детонационного режима сгорания смеси и т. д. Несмотря на многофронтный характер реальной ДВ, при теоретическом рассмотрении осредненных

характеристик процесса широко используются идеализированные классические представления о ДВ.

Идеальная детонационная волна в химически реагирующих газовых смесях представляет собой комплекс из ударной волны (УВ) и примыкающей к ней волны горения. Воспламенение смеси и основное тепловыделение происходят, как правило, в адиабатических условиях, хотя формирование волны в целом идет за счет процессов переноса. Согласно модели Зельдовича — Неймана — Дёринга [12] непосредственно к УВ примыкает зона индукции — область изотермической цепной реакции с приблизительно постоянными температурой T и давлением p (пик Неймана). В пике Неймана температура и плотность ρ в несколько раз, а давление — в десятки раз превышают значения перед УВ [13]. За зоной индукции следует зона основного тепловыделения, в которой температура повышается с 1500...2000 до 3000...4500 К, давление уменьшается вдвое, а плотность снижается до величины $(1,7...1,9)\rho_0$.

В *зоне индукции* многоатомные молекулы топлива, если таковые имеются, разлагаются с выделением или поглощением тепла, затем в быстрых реакциях обмена (в основном, междуодно- и двухатомными молекулами) экспоненциально накапливаются активные центры. Качественно в конце зоны индукции реакция обмена становятся квазиравновесными, а концентрация активных центров — максимальной по порядку величины, сравнимой с концентрацией исходных реагентов.

В *зоне основного тепловыделения* реакции обмена квазиравновесны. Тепло выделяется в тримолекулярных реакциях рекомбинации, скорости которых пропорциональны кубу плотности и слабо зависят от температуры. Для углеводородных горючих при отсутствии свободного углерода в продуктах детонации (ПД) тепловые эффекты всех основных реакций рекомбинации близки друг к другу $((110 \pm 10)$ ккал/моль), все реакции рекомбинации приводят к одинаковому уменьшению числа частиц. Поэтому суммарный тепловой эффект приблизительно пропорционален изменению суммарной массовой концентрации молекул — величине, обратной средней молекулярной массе смеси μ .

За зоной основного тепловыделения следует квазиравновесное течение продуктов детонации (ПД). Идеальной детонацией Чепмена - Жуге (СЖ) называется детонация с мгновенными реакциями и условиями на звуковой поверхности: химическая равновесность ПД и $u = a_e$, где u — скорость газа и a_e — равновесная скорость звука. Скорость детонации, температура и отнесенные к начальным значениям давление и плотность ПД слабо зависят от начальной температуры смеси и изменения начальной плотности на два-три порядка, а размер ячейки приблизительно обратно пропорционален

начальному давлению и чувствителен к неидеальности газа [13].

Детонационные волны при $D > D_{СЖ}$ и $p > p_{СЖ}$ называются *пересжатыми*. Они возбуждаются под воздействием волн сжатия, догоняющих фронт, и без их «поддержки» быстро замедляются. Даже небольшоепересжатие волны (по скорости детонации) приводит к резкому увеличению давления, плотности и массовой скорости газа [13], а в реальной многофронтной ДВ — к резкому уменьшению размера ячейки. При значительном пересжатии из-за процессов диссоциации реакция становится эндотермической, вследствие чего фронт УВ становится устойчивым, а ячеистая структура исчезает.

При уменьшении диаметра трубы из-за больших теплопотерь и при некотором предельном диаметре звуковая скорость газа становится не достижимой ни при каких значениях D . Количественно этот диаметр близок к предельному диаметру реальной детонации, который приблизительно на порядок меньше размера ячейки многофронтной детонации [14-16]. Дефицит скорости предельной детонации зависит от состава смеси и может равняться 10...30 %. Отметим, что вблизи пределов влияние затухания турбулентности и влияние теплопотерь сравниваются, и численные модели, учитывающие оба фактора [14] и только взаимодействие ПД со стенками канала [17,18], дают приблизительно одинаковые результаты.

Аналитически существование и основные свойства предельной детонации были предсказаны Я. Б. Зельдовичем [12]. Полагая, что трение и теплоотвод влияют на процесс одинаково, он ограничился рассмотрением только теплоотвода. С помощью предположения об экспоненциальной зависимости скорости химического тепловыделения от температуры и условия роста температуры за УВ им было получено ограничение на мощность теплоотвода и дана оценка длины зоны реакции, экспоненциально зависящей от температуры непосредственно за фронтом УВ. Была установлена двузначная подковообразная зависимость скорости детонации от диаметра трубы, и близко к реальности оценен дефицит скорости детонации. Но анализ показывает, что влияние трения и влияние теплоотвода на градиент температуры газа за УВ противоположны по знаку, причем температура за УВ под совместным воздействием трения и теплоотвода всегда растет [14]. Тем не менее модель [12] дает правильные результаты.

Понятие минимального размера канала, в котором может распространяться детонация, как характеристики смеси при фиксированных начальных условиях несколько условно. Потери энергии на трение и теплоотвод зависят от формы канала и шероховатости его стенок. Правильнее было бы говорить о предельном значении отношения гидравлического диаметра канала к коэффициенту сопротивления. Следует различать

шероховатость стенки и систему отдельных препятствий, соизмеримых с размером ячейки многофронтной детонации. Последние, благодаря турбулизации потока и локальному повышению температуры в отраженных волнах, могут не препятствовать, а, наоборот, способствовать распространению детонации. Также некорректно говорить о концентрационных пределах детонации. Любая смесь с экзотермической реакцией способна детонировать в каналах достаточно большого размера (принцип Харитона [19]) при достаточно большой энергии инициирования.

В реальности предельной может быть спиновая, галопирующая или низкоскоростная детонация.

Термодинамически детонация – самый эффективный способ прямого сжигания горючего. Именно поэтому в настоящее время активно разрабатываются научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по использованию управляемой детонации в энергетических установках, технологических горелках и других устройствах и технологиях. При успешном решении проблемы циклической детонации воздушных смесей обычных топлив (природный или попутный газ, угольные частицы, мазут и др.) ожидается значительная экономия горючего вследствие более высокой термодинамической эффективности детонационного горения и низкого выхода вредных веществ (ввиду очень малой продолжительности детонационного цикла) [5].

Энергетика и двигателестроение

Совершенствование современных авиационных двигателей и энергетических машин традиционных схем подошло к своему технологическому пределу. Тяга воздушно-реактивного двигателя выше, чем выше давление в камере сгорания и температура соответственно. Давление в камере сгорания можно увеличить, подняв температуру горения, а также подавая окислитель под возможно большим давлением. Это ведет к необходимости использования все более дорогостоящих жаростойких материалов, а также к увеличению массы и стоимости компрессоров. Другой способ увеличения давления в камере сгорания – увеличение скорости сгорания смеси. По своей термодинамической эффективности наиболее привлекательным режимом быстрого горения является детонация. Поэтому одним из основных прорывных направлений является разработка непрерывно-детонационных и ротационно-детонационных двигателей.

Силовые установки летательных аппаратов (ЛА). Вопрос об использовании детонационного горения в реактивных двигателях впервые поставлен Я. Б. Зельдовичем еще в 1940 г. [20,21]. По его оценкам прямоточные воздушно-реактивные двигатели (ПВРД), использующие детонационное сгорание топлива, должны иметь максимально возможную термодинамическую эффективность. По

сравнению с ПВРД на обычном горении двигатель на детонации в идеале обеспечит топливную экономичность до 30% при числе Маха полета 2,5 и до 20% при числе Маха 3, что позволит значительно увеличить дальность полета аппарата с таким двигателем или заменить значительную часть топлива на полезную нагрузку. Другое принципиальное отличие детонационного ПВРД от ПВРД на обычном горении – его способность создавать реактивную тягу при низких скоростях полета вплоть до самостоятельного старта без разгонных устройств.

Одна из возможных схем организации детонационного цикла в сверхзвуковом летательном аппарате включает диффузор, механический клапан, связку детонационных труб и общее сопло. Трубы периодически заполняются топливно-воздушной смесью. Смесью периодически сгорает в бегущих детонационных волнах, а горячие продукты детонации выбрасываются с высокой скоростью в окружающее пространство через сопло, создавая реактивную тягу [20].

Существуют аналогичные схемы организации детонационного цикла без механических клапанов, т. е. в конструкции двигателя вообще отсутствуют подвижные элементы. Конструктивно такой двигатель – импульсный детонационный двигатель (ИДД) – прост, а его тягу можно практически неограниченно увеличивать, повышая количество детонационных труб. Кроме того, изменяя подачу топлива в трубы можно управлять вектором тяги без применения поворотных рулей.

Импульсные детонационные двигатели весьма привлекательны и по своим потенциальным тяговым характеристикам: они перекрывают широкий диапазон скоростей полета от 0 до числа Маха 4 – 5, обеспечивая почти постоянный удельный импульс по топливу на уровне 2000 – 2500 сек при работе на углеводородном горючем. При числе Маха полета выше 3 импульсный детонационный двигатель становится эффективнее не только ПВРД, но и турбореактивного двигателя [20].

Основные приложения таких двигателей – дешевые средства доставки боеприпасов, силовые установки для самолетов-мишеней и беспилотных летательных аппаратов, а также крылатых ракет. В перспективе они могут использоваться и для форсирования тяги пилотируемых летательных аппаратов.

Для создания ИДД нет фундаментальных ограничений, однако есть эксплуатационные: чтобы успешно конкурировать с существующими аналогами такой двигатель должен работать на штатном авиационном керосине без активных добавок, использовать минимальную энергию зажигания детонации, быть компактным и легким. Однако, для инициирования детонации керосино-воздушной смеси в трубе с помощью известных классических способов требуются либо огромные энергии зажигания, либо очень длинные трубы, что

неприемлемо для силовых установок летательных аппаратов. Поэтому решается фундаментальная задача – найти новые способы инициирования детонации, которые позволят значительно уменьшить энергию инициирования детонации, значительно сократить длину и время перехода горения в детонацию. Сейчас удастся получить периодическую детонацию керосино-воздушной смеси на длине 1,5 м при зажигании обычной автомобильной искрой. Энергия зажигания детонации понизилась более чем в 10000 раз, одновременно длина трубы уменьшилась более чем в 10 раз.

Потенциальные преимущества термодинамического цикла детонационных двигателей вызвали огромное множество исследовательских работ в этом направлении. Ведущие позиции по разработке детонационных двигателей занимает специализированный центр SeattleAerosciencesCenter (SAC), выкупленный в 2001 г. компанией PrattandWhitney у фирмы AdroitSystems. Большая часть работ центра финансируется BBC и NASA из бюджета межведомственной программы IntegratedHighPayoffRocketPropulsionTechnologyProgram (IHPRPTP), направленной на создание новых технологий для реактивных двигателей различных типов. Кроме компании PrattandWhitney в работах принимают участие Исследовательский центр UnitedTechnologiesResearchCenter (UTRC) и фирма BoeingPhantomWorks.

Проекты по детонационному горению в США включены в программу разработок перспективных двигателей IHPTET [22]. В кооперацию входят практически все исследовательские центры, работающие в области двигателестроения, многие научные центры и университеты: ASI, NPS, NRL, APRI, MURI, Stanford, USAF RL, NASA Glenn, DARPA-GE C&RD, CombustionDynamicsLtd, DefenseResearchEstablishments, SuffieldandValcartier, UniversitedePoitiers, UniversityofTexasatArlington, McGillUniversity, PennsylvaniaStateUniversity, PrincetonUniversity.

Большой объем работы по клапанным детонационным двигателям выполнен в Институте химической физики РАН (ИХФ)[23]. В России над этой проблемой работают следующие университеты и институты Российской Академии наук (РАН): ЦИАМ им. П.И. Баранова, ИХФ, Институтмашинovedения РАН, Объединенный институт высоких температур РАН, Новосибирский институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева (ИГиЛ), ИТГИМ им. С.А. Христиановича, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, МГУ, Московский государственный авиационный институт, Новосибирский государственный университет, Чебоксарский государственный университет, Саратовский государственный университет и др.

В зависимости от скорости распространения детонационной волны в системе координат, связанной с двигателем, различают стационарную детонацию (stationarydetonation), ротационную детонацию (rotatingdetonation), когда детонация является стационарной во вращающейся системе координат, нестационарную детонацию (transientdetonation) и пульсирующую детонацию (pulsatingdetonation). Соответственно, могут быть созданы детонационные двигатели с непрерывной детонацией (CDE), ротационно-детонационные двигатели (RDE) и импульсно-детонационные двигатели (PDE) [3,22,23].

Основными направлениями развития детонационных двигателей по данным многочисленных публикаций являются:

1. Классический клапанный импульсный детонационный двигатель.

2. Многотрубный PDE. В таких двигателях частота работы отдельной трубы остается низкой, но за счет чередования импульсов в разных трубах пытаются получить приемлемые удельные характеристики.

3. PDE с высокочастотным резонатором, предварительно активированная топливная смесь подается в резонатор, в котором происходит фокусировка волн сжатия с образованием перескаковой детонационной волны.

4. Детонационный ЖРД с вытеснительной подачей топлива.

5. Организация детонационного горения в стационарной системе ударных волн (CDE) или в периодически перемещающейся ударной волне (CPDE).

6. Ротационный детонационный двигатель Николса.

7. Ротационный двигатель Б.В. Войцеховского.

Энергетические установки на детонации природного газа. Эксплуатационные требования по весу, геометрическим размерам и рабочей частоте ИДД относятся, главным образом, к силовым установкам ЛА. Для стационарных же энергетических установок эти требования не являются определяющими и, следовательно, технологический прорыв в этом направлении следует ожидать в ближайшее время. Наиболее привлекательное направление работ – организация циклической детонации смесей природного газа с воздухом. В настоящее время в ИХФ РАН и МИФИ (ГУ) активно ведутся работы по организации импульсного детонационного сжигания природного газа с использованием новых комбинированных средств инициирования детонации. Успех на этом пути сулит существенную экономию природного газа и позволит значительно повысить эффективность работы энергетического оборудования, в частности, силовых установок газоперекачивающих агрегатов (ГПА) для магистральных газопроводов. Последнее приложение особенно важно ввиду острой

необходимости снижения собственного потребления природного газа газотранспортными компаниями. Разумеется, замена жаровых труб в газотурбинных установках ГПА на детонационные потребует дополнительных вложений (разработка устройств, сглаживающих импульсные ударные нагрузки на элементы турбин, и др.), однако экономический эффект, ожидаемый от новой технологии, несомненно, перекроет все сопутствующие затраты [20].

Силовые установки надводных и подводных аппаратов и транспортных средств различного назначения.

Предложен способ создания гидрореактивной тяги путем периодического вытеснения забортной воды из водовода под действием расширяющихся продуктов детонации горючей смеси, в котором заборная вода, поступающая в проточный водовод, барботируется газом с образованием сжимаемой двухфазной пузырьковой среды, а при взаимодействии детонационной волны с пузырьковой средой в эту среду проникает ударная волна, вовлекающая ее в движение, так что вытеснение среды через выходное сечение водовода вызвано не только действием расширяющихся продуктов детонации горючей смеси, но и действием ударной волны. Соответствующий водометный импульсный детонационный двигатель представляет собой водовод (профилированную трубу с водозаборным устройством и соплом, погруженную в воду) с введенной в него импульсно-детонационной трубкой. Импульсно-детонационная трубка предназначена для генерации коротких, но очень интенсивных периодических импульсов давления в виде ударных волн, выходящих в водовод и выбрасывающих забортную воду из водовода через сопло. Двигатель может содержать несколько камер сгорания, причем в каждой камере сгорания установлены источники зажигания и форсунки подачи топлива, окислителя и продувочного газа, а на выходе из камер сгорания последовательно установлены ускоритель пламени, детонационная труба с выпускными окнами, оборудованными клапаном, причем каждая детонационная труба присоединена к проточному водоводу, снабженному общим водозаборником, а также аэраторами и/или кавитаторами. Преимущества импульсно-детонационного горения обеспечивают минимальные потери динамического напора воды, обусловленного движением надводного или подводного аппарата [24,25].

Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую. Известны методы прямого и непрямого (машинного) преобразования тепловой энергии в электрическую. Высокую эффективность прямого преобразования тепловой энергии способны обеспечить магнитогидродинамические генераторы (МГД-генераторы). Для ионизации продуктов сгорания необходимо поддерживать температуру на уровне 10 000 К, при использовании

легкоионизирующих присадок температура может быть снижена в 4-4,5 раза. Перспективным является использование детонационного МГД-генератора со сверхвысокой скоростью высвобождения химической энергии. В детонационном цикле температура продуктов сгорания составляет 4 000 К и более, а скорость их движения является сверхзвуковой. Мощность, приходящаяся на единицу объема детонационной камеры (удельная мощность), на 2 порядка выше, чем камеры ракетного двигателя. Исследованиями детонационных систем занимаются в корпорациях GeneralElectric, Boeing, в исследовательских центрах NASA, BBC США, в компаниях AerojetRocketdyne, Pratt&Whitney и др. В ближайшие годы на крейсерах ВМС США планируется замена газотурбинных электрогенераторов на детонационные установки [26]. В [27] запатентованы способ прямого преобразования энергии импульсного детонационного сгорания топлива в электрическую энергию и генератор переменного тока для его реализации,

В детонационных газотурбогенераторах для производства электроэнергии используется турбина. Поскольку в стационарных установках высокая частота детонационных импульсов не входит в число обязательных требований, детонационная камера может быть выполнена в форме спирали, что делает ее более компактной. В спиральной камере легче обеспечить переход от дефлаграционного режима сжигания топливной смеси к детонационному. Также возможно использовать многокамерную детонационную установку с интегрированным эжекторным соплом [26]. Введение в конструкцию детонационного газотурбогенератора эжектора позволяет уменьшить вредное воздействие пульсирующего потока продуктов детонации на элементы турбины и ослабить параметры детонационной волны. Инжектирование воды в ДК и эжектирование воздуха в сопле дает прибавку к массе и увеличивает импульс истекающей реактивной струи, снижает температуру газов перед турбиной и демпфирует ударную волну. В [28] предложено использовать подводную турбину.

Другие энергосберегающие технологии импульсно-детонационного горения. Особенности импульсного детонационного горения можно использовать для многих других приложений. Например, в импульсных горелках, совмещающих ударное воздействие с воздействием высокоскоростной струей горячих продуктов детонации. Указанные выше факторы (импульсное ударное и конвективно-тепловое воздействие) будут в перспективе использоваться для дробления и газификации тяжелых фракций нефти и угля, а также бытовых и промышленных отходов, для дробления горных пород и льда и т. д. Ведутся работы по применению импульсной детонации природного газа для сжигания промышленных и

бытовых отходов, созданию импульсных детонационных горелок на природном газе для водонагревательных котлов тепловых электростанций [20].

Синтез и производство материалов

Удельные энергозатраты при детонационной обработке материалов заведомо ниже, чем, например, при плазменной; низкий уровень теплотеряет дает определенные преимущества и при сопоставлении с другими методами воздействия. Высокая концентрация энергии и возможность резко сбросить температуру и давление газа через заданный промежуток времени – дополнительные плюсы ударно-детонационных технологий синтеза и обработки материалов. Использование в технологиях обработки и получения материалов детонации конденсированных ВВ (тротил, гексоген и т.п.) осуществляется достаточно широко [1], исследования в этом направлении с целью достижения химических и фазовых превращений, а также повышения дисперсности получаемых продуктов продолжаются и дают обнадеживающие результаты [1].

Однако, проведение превращений с помощью газовой детонации, более предпочтительно: проще решается проблема производительности оборудования; параметры газовой детонации значительно «мягче», чем при использовании конденсированных ВВ (так, типичные давления в плоскости Чепмена-Жуге отличаются более чем на три порядка), следовательно и рабочий ресурс технологического оборудования при использовании газовых горючих смесей будет выше.

Газовая детонация перспективна для проведения химических и фазовых превращений (в том числе – изменения агрегатного состояния), а также для повышения дисперсности веществ и материалов. Ранее уже рассматривались применения для получения аморфных материалов и восстановления оксидов [2].

Детонационный синтез по способу [30] применяют для получения высокодисперсного порошка цирконат-титаната свинца (ЦТС или PZT), широко используемого для производства радиокомпонентов на основе электронной керамики. При детонационной обработке многокомпонентного раствора солей циркония, титана и свинца волна в сильно детонирующей горючей смеси распространяется по системе со взвешенными каплями раствора, поток продуктов горения ($v = 1$ км/с) распыляет их до микрокапель, при последующем испарении которых ($T = 3500$ К) образуются высокодисперсные частицы солей, разлагающихся при указанных температурах до оксидов [29].

С помощью детонации газовых смесей можно синтезировать частично стабилизированный диоксид циркония (ЧСДЦ), являющийся уникальным теплозащитным материалом конструкционной керамики, применяемым,

например, для покрытия сопел ракетных двигателей [31]. При температурном воздействии чистый диоксид циркония претерпевает обратимые фазовые превращения (участвуют три его кристаллические модификации [32]), сопровождающиеся изменением объема и, как следствие, появлением остаточных напряжений и трещинообразованием. Добавление, например, оксида иттрия расширяет область стабильности кубической кристаллографической формы ZrO_2 от точки плавления до комнатной температуры. Основным методом получения порошков ЧСДЦ является его совместное осаждение с легирующим оксидом из растворов оксихлоридов, либо распылительная сушка с последующим отжигом. Существенно, что для стабилизации кубической фазы ZrO_2 легирующий оксид должен образовывать с ним твердый раствор. При детонационном методе синтеза, добавляя стабилизатор в виде однотипного с оксидом циркония соединения в раствор, обрабатывая (как и при синтезе PZT) его взвешенные капли высокоскоростным и высокотемпературным потоком продуктов детонации, можно получить тонкодисперсный порошок твердого раствора заданного химического состава.

Получение покрытий

Детонационно-газовое напыление. Процессы и оборудование для детонационно-газового напыления остаются наиболее широко применяемой областью практического использования газовой детонации [2,4,6,7,31] и являются темой самостоятельного обзора. Однако появляются новые нетрадиционные области применения процессов напыления.

Балансировка абразивных кругов. В лаборатории наноструктурированных покрытий СамГТУ разработана высокоэффективная технология балансировки абразивных кругов на керамической связке, работающих на повышенных скоростях вращения [33-35]. Технология заключается в уравнивании абразивного инструмента путем напыления корундового покрытия на боковые стороны круга с одновременным их упрочнением. Способ позволяет управлять процессом балансировки не внося существенных изменений в традиционный технологический процесс изготовления и не увеличивая значительно себестоимость изготовления кругов. Высокая (сверхзвуковая) скорость напыляемых частиц (600...1000 м/с) и возможность высокоточного позиционирования деталей во время нанесения покрытия, позволяет осуществить балансировку вращающихся абразивных инструментов с использованием в качестве балансирующего груза порций (навесок) порошкового материала, разогреваемого и разгоняемого энергией взрыва.

Изготовление кумулятивных зарядов. Кумулятивные заряды применяют для перфорации нефте- и газодобывающих скважин [36]. С помощью

напыления получены кумулятивные перфораторы, обладающие повышенной пробивной способностью.

Осаждение покрытий из газовой фазы в потоке продуктов газовой детонации. Процесс образования нитрида титана осуществляется в стволе детонационно-газовой установки [37]. В реакторе происходит смешивание ингредиентов, их нагрев и впрыск в канал ствола детонационной установки, где происходит дальнейший нагрев, необходимый для завершения реакции синтеза, и вместе с продуктами детонации частицы нитрида титана ускоряются к напыляемому образцу. Проведенный элементный анализ на электронно-сканирующем микроскопе показал, что атомные доли титана и азота практически совпадают, что соответствует формуле нитрида титана – TiN.

Струйная обработка продуктами газовой детонации

Ранее уже рассматривалось использование газовой детонации для сверления и дробления горных пород, утилизации автомобильных покрышек с металлическим кордом и очистки технологического оборудования от пылевых отложений [38-41]. Возможно применение газовой детонации для рыхления, например, мерзлого угля и очистки вагонов, для разрушения (дробления) громоздких оболочек, в которые для этого напускается взрывчатая газовая смесь. При частичном разрушении оболочки начинается истечение ПД, и характер дробления зависит от импульса, переданного оболочке ПД до начала разрушения. Метод эффективен для относительно тонких оболочек, для которых статическое разрушающее давление много ниже детонационного. Возможна подобная детонационная переработка полимерных материалов [6,7].

Воздействовать на слой пылевых отложений можно либо непосредственно импульсной струей истекающих из ствола ПД, либо путем создания вибрации металлоконструкций, на которых есть отложения. В последнем случае важен импульс, передаваемый конструкции. Такой процесс был применен также для очистки электрофильтров от пылевых отложений в цементной промышленности [6,7,40,41].

При введении в детонационно-газовую струю абразивных частиц проводят струйно-абразивную обработку поверхностей.

При участии автора разработаны способы шаржирования поверхностей и дробления сверхтвердых материалов [2,42,43].

Обработка с помощью детонационной волны льносодержащих материалов (льносоломки) позволяет выделить до 70% технического волокна; при этом костра отделяется в виде мелкодисперсного порошка, показатели превышают нормативные требования, а удельные энергозатраты на обработку материала ниже, чем при традиционных методах и составляют 10 МДж/кг [29].

Разрушающее воздействие объемной детонации

Объемный взрыв (детонация) имеет место при образовании аэрозольной смеси летучих газообразных, жидких или твердых (порошковых взвесей) веществ с достаточно высокой калорийностью, которые воспламеняются случайно или с помощью детонаторов (в боеприпасах объемного взрыва) [44]. При этом в определенных условиях, зависящих в первую очередь от концентрации веществ в воздухе (в частности, углеводородных топлив), а также от ряда физико-химических свойств и сложных газодинамических процессов перемешивания и горения, в подобном топливно-воздушном облаке может возникнуть детонационный процесс в виде взрыва, вызывающего значительные разрушения. Основным поражающим фактором боеприпасов объемного взрыва является избыточное давление во фронте ударной волны, которое при возникновении детонации в топливно-воздушном облаке достигает в его центре около 30 кг/см^2 , а в зоне детонации за несколько десятков микросекунд развивается температура $2500\text{--}3000^\circ\text{C}$. По своим параметрам (длительность затухания внутри и вне облака) избыточное давление боеприпаса объемного взрыва превосходит давление во фронте ударной волны, создаваемой обычными ВВ. Топливо-воздушная смесь способна проникать в негерметичные объемы и формироваться по профилю рельефа местности, от поражающего воздействия боеприпасов объемного взрыва не защищают ни складки местности, ни полевые оборонительные сооружения.

Это оружие является средством поражения неукрытой и слабозащищенной живой силы, боевой техники на открытой местности, фортификационных и оборонительных сооружений, проделывания проходов в минных заграждениях, расчистки и подготовки временных площадок для десантирования и посадки вертолетов, разрушения зданий и подавления опорных пунктов при ведении уличных боев в городе, борьбы с противокорабельными ракетами и надводными кораблями, уничтожения растительности и посевов сельскохозяйственных культур и т. д.

Для решения задачи разминирования минных полей объемным взрывом используют детонационно-способную смесь в струе отработанных газов силовой установки бронетанковой техники [45-50]. Данный способ разминирования по сравнению с наиболее дешевым ручным способом обладает преимуществом по целому ряду основных показателей, таких как стоимость и производительность разминирования, степень безопасности при выполнении работ по разминированию. Например, по стоимости разминирования 1 м² минно-взрывного заграждения способ разминирования с применением бронетанковой техники является менее затратным в

5 раз, а по производительности превосходит ручной способ более чем в 100 раз.

Для инициирования детонации в неограниченном пространстве увеличивают интенсивность ударной волны в процессе её выхода из детонационной трубы за счет электродинамического ускорения газо-плазменного потока за фронтом волны [51].

Воздействие газовой детонации в ограниченном объеме

Посредством детонации газовых смесей возможно *повышение проницаемости* (создание разветвленной сети трещин) зоны продуктивного нефтяного пласта [29,52,53], нефтеотдача которого затруднена или полностью прекратилась из-за высокой вязкости нефти (в Беларуси по этой причине законсервировано более тысячи, т.е. около 2/3 всех скважин, при этом из недр извлечено только 25 - 30 % нефти, содержащейся в пласте).

Для восстановления дебита технологических скважин путем разрушения и диспергирования кольматирующих отложений, препятствующих притоку воды в скважины, разработан способ обработки скважин газовой детонацией, который отличается простотой, доступностью, низкой стоимостью [55].

Утилизация боеприпасов. Заряд твердого взрывчатого вещества дробят воздействием ударной волны, которую получают детонацией горючей газовой смеси, окружающей боеприпас [56].

Возбуждение упругих волн в земной коре

В сейсморазведке установки газовой детонации используют для возбуждения упругих колебаний с поверхности земли за счет взрыва газовой смеси в замкнутых, способных к расширению объемах взрывных устройств. Газовзрывная смесь заполняет цилиндр с подвижной нижней стенкой — поршнем или диафрагмой. Такой цилиндр прижимают к поверхности автомашины, на которой смонтирован источник. В заданный момент времени по команде с сейсмостанции газ поджигают и происходит его взрывообразное сгорание, при котором объем газа резко возрастает. Газ под большим давлением резко давит на поршень или мембрану и, поскольку движение цилиндра вверх затруднено инертной массой автомобиля, давление передается на грунт в место его контакта с рабочим органом газовзрывного источника. Известны также установки газовой детонации, в которых продукты детонации выбрасываются в воду, возбуждая в ней упругую волну. Источники сейсмических колебаний используются при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых, инженерно-геологических и гидроакустических исследованиях [57,58].

Для создания многократно повторяющихся импульсных сейсмических сигналов предназначено устройство [59]. Устройство содержит скважину, пакер, установленный в скважине, через который проходят дренажная труба, топливная магистраль и

линия передачи детонации. Скважина пробурена в плотные горные породы ниже зоны малых скоростей, где установлен пакер. Он ограничивает рабочий объем скважины между ним и концом дренажной трубы. Этот объем заполнен воздухом по линии передачи детонации. При этом топливная магистраль имеет ресивер с газом (пропан, метан) для образования его стехиометрической смеси с воздухом в рабочем объеме скважины и детонации этой смеси с ее распространением вдоль скважины и излучением поперечных сейсмических волн. При распространении детонационной волны вдоль участка скважины, заполненного газовой смесью, в массив горной породы излучаются, в основном, поперечные сейсмические волны. После окончания детонации производят продувку рабочего объема воздухом, после чего цикл повторяется. Минимальная длительность полного цикла составляет около 10 с. Устройство может быть также использовано для вибровоздействия на коллекторы углеводородов с целью повышения продуктивности пластов и дебита скважин.

Термоимпульсная камерная обработка

Термоимпульсная обработка в закрытых камерах с использованием газовой детонации является также достаточно широко применяемым в производстве процессом.

Удаление заусенцев. Одной из трудоемких операций в машиностроении является удаление заусенцев, возникающих на металлических деталях при механической обработке [2,6,7]. В 1970 году был разработан метод, который стал альтернативой малоэффективному ручному способу удалению заусенцев и первоначально был известен как термоэнергетический метод снятия заусенцев (ТЭМ) [60]. Этот уникальный метод позволил обрабатывать глухие и пересекающиеся отверстия одновременно с внешней поверхностью детали. Так как при очистке не используются никакие абразивные элементы, размеры детали не изменяются. Применение охлаждаемых камер сгорания и малое время обработки предотвращают нагревание детали более чем на 150 °С (за исключением слишком тонких элементов), что не изменяет внутреннюю структуру материала детали. Удаляемые элементы не должны быть расположены в каком-либо конкретном направлении, так как газовая смесь окружает их со всех сторон.

Исторически процесс термоэнергетического удаления заусенцев был впервые использован в литейной промышленности и при обработке деталей и агрегатов гидравлических систем. В вопросах, связанных с гидравликой, делался акцент на гарантии удаления самых маленьких, самых неудобных заусенцев, которые, скорее всего, оторвутся во время эксплуатации. Таким образом, идея заключалась в следующем: если заусенец не оторвался при взрыве он не оторвется в эксплуатации. Количество удаленных заусенцев

зависит от количества тепла, материала и формы заусенцев.

Начальный этап развития термоимпульсной технологии рассмотрен в работах [2,6,7]. Список отраслей, которые пользуются ТЭМ, ежегодно растет. ТЭМ используется для очистки от заусенцев и микрочастиц широкого диапазона деталей, особенно при наличии в них ликвидов на внутренних поверхностях пересекающихся каналов, на резьбах и прочих зонах, где провести качественную очистку с помощью более традиционных методов невозможно или невыгодно.

Детали помещают в герметичную высокопрочную камеру, в которую под давлением нескольких десятков атмосфер газовую водородно-кислородную или углеводородно-кислородную смесь с повышенным содержанием кислорода. Газовая смесь полностью заполняет все пространство в камере и обрабатываемых деталей (включая глухие отверстия, пересечения длинных тонких каналов и т.п.). Далее горючая смесь воспламеняется от искры, которая создает тепловые волны температурой до 3500 К в зависимости от используемого горючего. В течение нескольких миллисекунд топливо выгорает. Так как большинство заусенцев обладает высоким соотношением площади поверхности к массе, они не могут передавать тепло в массив детали достаточно быстро, чтобы предотвратить их оплавление, выгорание или испарение (в зависимости от режима обработки) и будут продолжать разрушаться, пока тепло не начнет передаваться непосредственно в деталь. К этому времени все заусенцы, сколы и загрязняющие вещества будут удалены. Удаление заусенцев идет не под воздействием динамического напора ПД, а за счет их плавления. В этом процессе детонация служит для ускорения сжигания топлива и интенсификации теплообмена. Интенсивная передача тепла от продуктов детонации к заусенцу и детали происходит, когда газ движется относительно детали с высокими скоростями. Если к моменту прогрева основания заусенца толщиной 0,2...0,4 мм до температуры плавления скорость вынужденной конвекции достаточна для разрушения образовавшейся капли, то происходит удаление заусенца с образованием скругления. Процесс регулируется подбором начального давления. Окисление заусенца продуктами детонации приводит к снижению необходимого давления. Не следует одновременно помещать в камеру крупные и мелкие детали из-за возможности полного сгорания последних. При не очень высоких давлениях возможна даже импульсная термообработка пластмасс.

Несмотря на различия возможных механизмов удаления заусенцев (оплавление, сгорание, хрупкое скалывание), обработка в основном происходит в результате интенсивного теплового воздействия на удаляемые элементы за счет возникновения ударных волн [61,62].

На современном этапе развиваются метод развивается в двух направлениях: в виде термохимического и термоимпульсного методов.

При термохимической обработке удаление заусенцев на кромках происходит за счет инициации их сгорания в обедненной топливной смеси, т.е. за счет повышения содержания окислителя. Для обеспечения процесса термохимической очистки необходимо обеспечить в камере избыток кислорода, достаточный для обгорания наибольших по размеру заусенцев на детали. В процессе горения заусенцы преобразовываются в оксиды обрабатываемого металла. Оксиды оседают на элементы детали в виде отдельных порошкообразных остатков. Поэтому всякий раз, когда необходимо снять заусенцы при помощи термохимического метода, нужно рассмотреть необходимость очистки от окислов и возможные методы ее реализации. Это должно быть частью производственной стратегии, особенно когда стоимость очистки от окислов соизмерима со стоимостью удаления заусенцев. На сегодняшний момент термохимический метод более распространен и реализован в установках таких фирм как BOSCH, ExtrudeHone, ATL.

При термоимпульсном методе обработка происходит за счет быстрого воздействия на удаляемый элемент интенсивного теплового потока, вызывающего их оплавление, испарение или срыв с поверхности ударными волнами. Особенностью метода является то, что при термоимпульсной очистке, в отличие от термохимической, часть топливной смеси сгорает в режиме взрыва с резким увеличением скорости горения и давления. Это приводит к образованию ударных волн в камере сгорания с определенным временем их затухания, за которое все заусенцы и микрочастицы успевают нагреться до требуемых для обработки температур как на внешних, так и на внутренних поверхностях.

Термоимпульсная обработка деталей из пластмасс и композиционных материалов распространена в меньшей степени. В то же время застойной обработке по удалению облоя подвергается 85...95% деталей из термопластов, выпускаемых в различных отраслях промышленности. При этом, трудоемкость такой операции может составлять от 10 до 70% общих затрат на изготовление деталей [63]. Широкое применение термоимпульсного оборудования для обработки деталей из пластмасс сдерживается несовершенством методик назначения технологических режимов. В выполненных до настоящего времени исследованиях не рассматривались вопросы, касающиеся особенностей термоимпульсной обработки деталей из полимерных материалов. Для таких материалов характерны низкая температура плавления, что выдвигает повышенные требования к точности назначения времени обработки. Применение форкамерно-факельного поджога является перспективным методом обеспечения

равномерности температуры продуктов сгорания [63], что особенно важно в случае термоимпульсной обработки легкоплавких материалов.

Обработка кромок деталей включает в себя удаление заусенцев, притупление произвольным радиусом, размерное скругление, очистку от технологических загрязнений. Качество отделки кромок и поверхностей прецизионных деталей влияет на эксплуатационные характеристики гидротопливных агрегатов: станков, двигателей внутреннего сгорания, аэрокосмической и другой техники. Особое место занимает обработка кромок режущего инструмента и кромок золотниковых пар, в которых идеальным является радиус, равный нулю.

В настоящее время существуют более ста методов отделки и зачистки кромок и поверхностей деталей. Наиболее перспективным представляется термоимпульсный метод, в основу которого положен импульсный нагрев и плавление удаляемых с деталей элементов (ликвидов) [62]. Источниками тепла могут быть лазерные установки, плазмотроны, высокоэнергетические газовые струи, ТВЧ и т.п. [64,65]. Для этого метода не имеют значения твердость и прочность обрабатываемого материала. Основными факторами, влияющими на процесс плавления ликвидов, являются теплофизические свойства материалов, геометрические размеры, мощность источника тепла и время его действия. Широкое применение получила обработка в продуктах сгорания газовых смесей [66,67], где инструментом является газ. Известны экспериментальные исследования притупления кромок оплавлением на углах от 15 до 90°, в которых показано, что притупить кромку можно только на углах до 60° [66]. В работе [64] приведен численный анализ удаления заусенца в форме клина и установлено, что технологически возможным и целесообразным является способ разрушения заусенца посредством расплавления. Эти результаты хорошо согласуются с выводами других исследователей. В работе [68] приведены результаты исследования нагрева моделей заусенцев в виде неограниченных пластин, длина и ширина которых значительно больше толщины, где установлено, что с увеличением толщины необходимо увеличивать мощность источника тепла. При этом увеличивается температура поверхности детали. Чтобы минимизировать нагрев детали, процесс термоимпульсной обработки осуществляется при наименьшей мощности источника тепла и оптимальном времени нагрева. Установлено, что оно соответствует времени выравнивания температурного поля по толщине неограниченной пластины. Эти результаты положены в основу технологий термоимпульсной очистки и отделки поверхностей и кромок деталей.

Для выбора рациональных технологических режимов и характеристик источника тепла (оборудования) с учетом теплофизических свойств

материалов, наличия тонкостенных элементов детали, химического состава горючей смеси, размеров рабочей камеры и степени ее загрузки полезны аналитические модели

Термоимпульсная обработка детонирующими смесями является наиболее производительным процессом финишной очистки и отделки кромок [69]. Термоимпульсное оборудование серийно выпускается рядом фирм и широко используется в основном для обработки различных деталей из металлов. Термоимпульсная обработка деталей из пластмасс и композиционных материалов распространена в меньшей степени. В то же время зачистной обработке по удалению облоя подвергается 85...95% деталей из термопластов, выпускаемых в различных отраслях промышленности. При этом, трудоемкость такой операции может составлять от 10 до 70% общих затрат на изготовление деталей [69]. Широкое применение термоимпульсного оборудования для обработки деталей из пластмасс сдерживается несовершенством методик назначения технологических режимов.

Очистка поверхностей деталей. Топливные и гидравлические агрегаты летательных аппаратов имеют большое количество различных по конструкции и назначению золотниковых и плунжерных пар. По существу надежность агрегатов определяют наиболее точные элементы конструкции – золотниковые и плунжерные пары. Попадая в зазоры между рабочими поверхностями прецизионных пар, твердые частицы могут вызвать увеличение сил трения, задиры и заклинивание трущихся пар, интенсивный износ или зарастивание зазоров. Причем, чем точнее механизм, тем он чувствительнее к этим частицам [70]. Очистка деталей авиационной техники является обязательным этапом восстановительного ремонта. От ее эффективности во многом зависит послеремонтный ресурс техники. Основными источниками загрязнений поверхности деталей авиационной и военной техники, подлежащие удалению при восстановительных ремонтах являются: микрочастицы, появляющиеся в результате износа в ходе эксплуатации; рабочие среды; пыль в производственных помещениях; предметы, с которыми соприкасаются детали при ремонтных работах и др. [71,72].

При обеспечении чистоты поверхностей деталей и рабочих полостей многих машин их ресурс может быть увеличен в два – три раза. Поэтому интерес к отделочно-очистным технологиям в высокоразвитых в промышленном отношении странах не ослабевает на протяжении последних 20 лет.

Технологические загрязнения неизбежно образуются во время изготовления деталей, сборки, испытаний и эксплуатации изделий. При этом даже оптимизация режимов и применение инновационных способов обработки не может

исключить образование микрозаусенцев на ребрах и микрочастиц на поверхности обрабатываемых деталей.

Технология термоимпульсного удаления заусенцев и очистки поверхности в наибольшей степени удовлетворяет условиям промышленного производства. Инструментом при этом является горячая газовая смесь, а очистка происходит при интенсивном тепловом воздействии продуктов сгорания на деталь. Однако при очистке этим методом тепловому воздействию подвергаются не только ликвиды, но и все остальные поверхности детали, что может приводить к изменениям в структуре материала. Поэтому необходимо обеспечить такие режимы обработки, при которых негативное воздействие тепла на деталь было бы минимальным [73]. Установлено, что неоднородность топливной смеси оказывает существенное влияние на уровень температур продуктов сгорания для деталей, имеющих конструктивные элементы сложной формы. Перепад температур вблизи различных участков обрабатываемых поверхностей может составлять более 1000°C. Для соблюдения условий обработки в этом случае целесообразно использовать наполнение заранее подготовленной смесью.

На этапе производства необходима качественная очистка кромок и поверхностей деталей от заусенцев, микрочастиц и других микроликвидов, которые определяют величину абразивного износа, а для высокоточных механизмов, таких как агрегаты двигателей ЛА, существенно влияют на надежность работы изделия в целом [74,75]. Наиболее перспективными методами очистки поверхностей деталей агрегатов авиационных двигателей являются газодетонационный и лазерный методы. Однако лазерный метод, способный удалять как химические загрязнения, так и микрочастицы, эффективен только для очистки внешних поверхностей деталей. Назначение режимов детонационной очистки на основе экспериментов является практически неразрешимой задачей, поскольку требует учета большого числа факторов.

На основе анализа баланса сил получена оценка для определения минимального диаметра микрочастицы, которая может быть удалена с поверхности детали при прохождении вдоль нее детонационной волны [71]. Полученная оценка относится к случаю отрыва частицы ударной волной, распространяющейся вдоль поверхности. В условиях распространения ударных волн в замкнутой камере волны могут отражаться от поверхности под различными углами, что приводит к образованию вихрей и даже отрыву пограничного слоя. В этих условиях на частицу дополнительно воздействует перепад давлений, вызванный разрежением в вихре [71]. Поэтому сделанная оценка может быть принята в качестве верхней границы качества детонационной очистки.

Сушка материалов. Воздействие детонационных волн на влажное сырье для получения бентонитов позволяет производить его сушку от влажности 15% до 1-2% за времена воздействия 10^{-3} с, при этом высушенный материал представляет собой порошок с размером частиц 10^{-6} – 10^{-5} м [83].

Совершенствование оборудования и автоматизация. Уникальным свойством термоимпульсной обработки детонирующими газовыми смесями является возможность очистки наружных и внутренних поверхностей произвольно сложной формы, присущих элементам гидравлических и топливных систем летательных аппаратов (ЛА). Однако отсутствие автоматизированного оборудования, реализующего данный способ обработки, считается одной из основных проблем, мешающих широкому использованию термоимпульсных технологий очистки в авиационной промышленности [61,75].

Применение аналитической модели для дискретного нагрева при термоимпульсной обработке кромок с учетом отвода тепла в тело детали и дискретного увеличения толщины кромки позволяет решить задачу автоматизации процесса скругления кромок заданным радиусом путем регулирования двух параметров – времени нагрева и мощности источника тепла [62].

Учеными Национального аэрокосмического университета «ХАИ» в конце 80-х годов был разработан и прошел промышленную проверку термоимпульсный способ финишной очистки, который по качеству обработки не уступает лучшим из существующих на сегодня технологиям финишной обработки, а по технологическим возможностям даже превосходит их [74,76]. В ходе многочисленных экспериментальных исследований подтверждена эффективность данного метода и перспективность его развития [70, 77].

В ходе численного моделирования процессов смесеобразования в камерах импульсных машин было показано, что при последовательном наполнении камеры компонентами смеси ее состав крайне неравномерен [78, 79]. Наибольшие отличия от стехиометрического состава наблюдались вблизи конструктивных элементов сложной формы – проточек, глухих отверстий, т.е. элементов, характерных для корпусных деталей агрегатов двигателей ЛА. При наполнении камеры готовой топливной смесью обеспечивается необходимая степень однородности смеси для качественной термоимпульсной очистки всех внутренних поверхностей детали. Для дальнейшего использования при обработке деталей сложной формы следует рекомендовать смесеобразование по схеме совместного наполнения компонентами.

Одной из основных проблем, которые мешают широкому использованию термоимпульсных технологий очистки в промышленности, является отсутствие автоматизированного оборудования,

реализующего данный способ [81]. В то же время, анализ показывает, что для создания такого оборудования созданы необходимые предпосылки – накоплен большой объем экспериментальных результатов, созданы и экспериментально проверены теоретические модели процесса термоимпульсной очистки, накоплен опыт разработки компонентов систем энергообеспечения и регулирования термоимпульсных машин.

При очистке деталей термоимпульсным методом тепловому воздействию подвергаются как удаляемые элементы, так и вся деталь, поэтому необходимо обеспечить плавление удаляемых элементов и при этом исключить необратимые изменения как в материале, так и в конструкции деталей [82].

Термомеханическая импульсная обработка

Листовая штамповка. Начальный опыт применения газовой детонации для листовой штамповки рассмотрен в работах [2,6,7]. В детонационном устройстве по а.с. № 574888 (СССР) матрица установлена в бассейне с передающей средой. Разработан способ листовой штамповки, когда на заготовку воздействуют детонационными импульсами и подвергают факельно-пламенному нагреву для последующей деформации с помощью одного или нескольких импульсов газовой или гетерогенной детонации топливной смеси [84]. При этом управляют частотой, интенсивностью и длительностью импульсов. Штамповку осуществляют с помощью устройства, содержащего камеру сгорания, системы подачи топлива, окислителя, инициирования, детонационную трубу и матрицу. К камере сгорания с одной стороны присоединены системы подачи топлива, окислителя, продувочного газа и смесительное устройство, а с другой стороны последовательно присоединены ускоритель пламени, сменная детонационная труба и сменный выходной насадок, образующие единый газодинамический тракт, соединенный с вентилируемым шумопоглощающим контейнером. В контейнере на некотором расстоянии от насадка размещена заготовка и подвижная сменная матрица. Устройство может работать как в импульсно-детонационном режиме, так и в режиме факельно-пламенного нагрева заготовки перед детонационной штамповкой.

Формование бетонных изделий. Ударно-волновая газодинамическая установка для формования бетонных объектов с пустотами используется в производстве строительных материалов, при формировании структуры бетонов и растворов на минеральных вяжущих веществах и др. Установка состоит из внешней ограждающей конструкции, внутренней формы-пустотообразователя, размещаемого в бетонной смеси, снабженных детонационными камерами. Детонационные камеры внутренней формы-пустотообразователя образованы пространством между внутренней трубой

пустотообразователя и его эластичной оболочкой, внешние детонационные камеры образованы пространством между опорной и резонансной плитами, соединенными упругими элементами, например пружинами. Детонационные камеры внутренней формы-пустотообразователя выполнены из условия обеспечения периода цикла больше времени релаксации смеси, который соответствует для жестких бетонных смесей частоте цикла в пределах 0,5-20,0 Гц, внешние детонационные камеры установлены из условия обеспечения периода цикла меньше времени релаксации смеси, который соответствует для жестких бетонных смесей частоте цикла более 50 Гц [85].

Уплотнение пористой массы. Повышение эффективности уплотнения пористой массы в газовом баллоне достигается однократным воздействием на нее импульсы повышенного давления детонационной волны газообразного ацетилена [86]. Импульс давления детонационной волны формируется в установке, содержащей ударную трубу с инициирующим взрывной распад ацетилена устройством. Для заполнения баллона и ударной трубы ацетиленом, вакуумирования и контроля ударная труба снабжена соответствующими газовыми коммуникациями, запорной арматурой и приборами. На первоначально неуплотненную пористую массу в баллоне воздействуют взрывным импульсом такой формы, чтобы давление было как можно больше, а время действия как можно меньше. При этом зерна пористой массы уплотняются друг с другом, но разрушиться не успевают, так как действие волны кратковременно. В качестве рабочего взрывного газа предпочтительно использовать ацетилен по следующим причинам: форма импульса взрывного давления (большая амплитуда и высокая частота) предпочтительна для уплотнения пористой массы; ацетилен способен к взрывному распаду, в том числе и к детонации, в чистом виде без добавок каких-либо других газов-окислителей. Это упрощает установку, облегчает ее эксплуатацию, повышает надежность и безопасность работы; мощность взрыва, необходимая для требуемого уплотнения пористой массы, достигается при невысоких начальных давлениях ацетилена.

Измельчение и плавление снежно-ледяной массы. Разработаны способ и устройство, в которых измельчение и плавление снежно-ледяной массы происходит благодаря периодическому воздействию ударных волн, а также высокоскоростных, струй горячих продуктов импульсно-детонационного горения топливной смеси, и может быть использовано для быстрой утилизации снежно-ледяной массы [87]. Снежно-ледяная масса нагревается через стенки трубы, горячими газами, а также полученной в процессе плавления горячей водой, она одновременно измельчается и плавится под действием ударных волн и высокоскоростных струй горячих продуктов детонации, причем

ударные волны и высокоскоростные струи горячих продуктов детонации периодически генерируются в трубе с топливной смесью благодаря переходу горения в детонацию; при этом кроме измельчения и расплавления снежно-ледяной массы ударные волны и высокоскоростные струи горячих продуктов детонации вовлекают в движение фрагменты снежно-ледяной массы и горячую талую воду, полученную в процессе плавления, а также приводят к образованию водяной пелены и брызг, проникающих в снежно-ледяную массу, что в целом обеспечивает плавление снежно-ледяной массы без ее предварительной подготовки и без использования предварительно поданной подогретой воды. Это позволяет использовать в полной мере преимущества импульсно-детонационного горения, заключающиеся в более высокой термодинамической эффективности, в более высокой температуре продуктов детонации, в комбинированном тепловом и механическом (ударно-волновом) воздействии на расплавляемую среду, а также в снижении эмиссии экологически вредных веществ.

Метание тел

Ускорение компактных тел. При движении «снаряда» в заполненной взрывчатой газовой смесью трубе со скоростью, превышающей D_{CL} , смесь будет сгорать в системе отраженных косых ударных и детонационных волн, возникающих в кольцевом зазоре между «снарядом» и стенкой трубы. Можно так подобрать форму и размеры «снаряда», что он будет разгоняться (концепция прямого ускорителя – RamAccelerator). Расчеты показали, что в 12-метровой трубе диаметром 38 мм, заполненной водородно-воздушной смесью под давлением 25 атм, «снаряд» массой 70 г можно разогнать до скорости 4 км/с. При скорости 3,2 км/с головная баллистическая волна является ударной, а отраженная от стенок – детонационной. При повышении скорости головная волна становится детонационной и тяга исчезает. В экспериментах [6,7] получена скорость снаряда 2,1 км/с, ненамного превышающая скорость детонации.

Возможен разгон тел продуктами газовой детонации и по обычной пушечной схеме. В экспериментах [6,7] вращающийся стальной диск диаметром 0,5 м и толщиной 6 мм ускорялся при детонации смеси $4H_2+O_2$ ($D_{CL} \cong 3,2$ км/с) до скорости 3,5 км/с на длине 60 м.

Метание тушащих веществ. Весьма актуальна проблема метания огнетушащих веществ различной массы с высокой производительностью и эффективностью на заданные расстояния с целью дистанционного тушения крупных пожаров. В работе [88] разработана установка метания тушащих веществ в контейнерах на основе газовой детонации, в которой повышение энергоэффективности и дальности метания обеспечивается за счет более высокого давления в рабочей камере и снижения времени теплоотдачи при детонационном сгорании

газового заряда в сравнении с установками, где реализуется медленный процесс дефлаграционного сгорания газового заряда.

Безыгольные инъекции применяются для того, чтобы уменьшить боль и снизить повреждение тканей. Вытеснение дозы жидкости происходит под действием на поршень газа под давлением или пружины. Эффективность метода тем выше, чем больше скорость нарастания давления на поршень. В связи с этим возникли предложения использовать для безыгольных инъекций энергию микровзрыва твердого взрывчатого вещества (ВВ) [89] для ускорения микрокапсул лекарственных препаратов при введении их в эпидермис. Заряд ВВ заключается в трубку, на конце которой помещается контейнер с лекарством, отделенный от трубки металлической мембраной. При взрыве ВВ мембрана прогибается, лекарство выбрасывается через отверстие в торце трубки и образует тонкую струйку. Измеренная скорость струйки составляет 100 м/с, что достаточно для осуществления безболезненной безыгольной инъекции [89]. Недостатком подобного метода является необходимость использования твердого взрывчатого вещества, продукты сгорания которого токсичны. В данной работе исследована возможность замены твердого ВВ в аппаратах, предназначенных для безыгольных инъекций на водородовоздушные смеси, продуктами сгорания которых является вода, что позволит значительно расширить область применения данной методики. Для этого необходимо создать устройство, передающее энергию продуктов газовой детонации лекарственному веществу, чтобы создать такой же крутой фронт давления, как при взрыве твердого ВВ.

Для компактности устройства для безыгольных инъекций необходимо, чтобы преддетонационное расстояние было как можно меньшим.

Проведенное исследование показало, что энергия детонационной волны в водородовоздушной смеси может передаваться жидкости и разгонять ее до скорости порядка 70 м/с, при этом наблюдается проникновение струйки жидкости в модельную среду на расстояние 15 мм. Использование газовой детонации позволит заменить менее эффективные источники энергии для ускорения лекарственных препаратов в аппаратах, предназначенных для безыгольных инъекций, на газовые смеси, что позволит упростить, удешевить устройства для безыгольных инъекций и избежать выбросов ядовитых продуктов сгорания твердых топлив.

Иницирование горения и взрыва ВВ

В научных исследованиях и технике широко применяется иницирование взрыва труднодетонирующих газовых, гетерогенных и конденсированных ВВ посредством ДВ, сформированной в узкой трубке, заполненной легкодетонирующей газовой смесью. Трубку можно не закрывать мембраной. Тогда легкодетонирующую смесь можно инжектировать к электродам

непосредственно перед подачей инициирующего импульса. Переход ДВ по смеси из трубки в объем является хорошо известным способом возбуждения сферической и цилиндрической детонации. Газовой детонацией можно возбудить УВ «со сшитой контактной поверхностью», что значительно удлиняет «пробку» постоянных параметров за УВ. Данный эффект можно использовать в импульсных газодинамических лазерах. ДВ, распространяющаяся по газовой смеси, способна при определенных условиях возбудить детонацию в заряде насыпного взрывчатого вещества [90-92].

Пересжатая ДВ обеспечивает надежное инициирование промышленного детонатора, употребляемого в горном деле [90-92]. Обычная электрическая схема, используемая при одновременном подрыве большого количества разнесенных зарядов, кроме опасности несанкционированного срабатывания от блуждающих электрических наводок обладает еще одним опасным свойством - при отказе какого-либо детонатора заряд оказывается в снаряженном состоянии (электродетонатор + заряд взрывчатого вещества в сборке). Это диктует необходимость обязательного устранения угрозы его срабатывания при последующих производственных операциях. Если электродетонаторы заменить газовыми, объединенными гибкой, например, полихлорвиниловой трубкой в единую протяженную и разветвленную сеть, то после заполнения системы взрывчатой газовой смесью и инициирования детонации волна, распространяясь вдоль магистралей, взорвет все заряды. При многократных испытаниях последовательной сети длиной 1 км, содержащей около сотни зарядов, не было зарегистрировано ни одного отказа. Если же какой-либо газовый детонатор откажет, то обезвредить его можно продувкой магистрали азотом или воздухом. Это эквивалентно устранению детонатора и обеспечивает безопасность при дальнейшей работе с этим зарядом.

Выводы. Газовая детонация как источник энергии постепенно расширяет области практического применения. Кроме освоенных в промышленности детонационно-газового напыления и термоимпульсной обработки в ближайшее время следует ожидать внедрения пульсирующих детонационных двигателей и энергетических установок.

Для использования всех потенциальных возможностей газовой детонации необходима разработка методик инженерных расчетов и совершенствование теории физико-химических явлений, сопровождающих ее развитие и распространение.

Л и т е р а т у р а

1. Селиванов, В. В., Взрывные технологии: учебник для вузов / В. В. Селиванов, И. Ф. Кобылкин, С. А. Новиков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 519 с.
2. Харламов, Ю. А., Детонационно-газовые процессы в промышленности / Ю. А. Харламов, Н. А. Будагьянц; Восточноукр. гос. ун-т. - Луганск: Изд-во ВУГУ, 1998. – 223 с.
3. Pulsedetonationpropulsion: challenges, currentstatus, andfutureperspective / G.D. Roya, S.M. Frolov, A.A. Borisov, D.W. Netzer // ProgressinEnergyandCombustionScience, 30 (2004). – P. 545–672.
4. Шоршоров М.Х., Харламов Ю.А. Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий. – М.: Наука, 1978. – 224 с.
5. Фролов С.М. Наука о горении и проблемы современной энергетики // Рос.хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева), 2008, т. LII, № 6. – С.129-134.
6. Николаев Ю.А., Васильев А.А., Ульяницкий В.Ю. Газовая детонация и ее применение в технике и технологиях // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 4. С. 22-54.
7. Баженова Т.В., Голуб В.В. Использование газовой детонации в управляемом частотном режиме // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 4. С. 3-21.
8. Войцеховский Б. В., Митрофанов В. В., Топчийн М. Е. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.
9. Детонационные волны в конденсированных средах / А. Н. Дремин, С. Д. Савров, В. А. Трофимов, К. К. Шведов. М.: Наука, 1970.
10. Щелкин К.И., Трошин Я.К. Газодинамика горения. — М.: Изд-во АН СССР.- 1963.-256 с.
11. Нетлетон М. Детонация в газах: Пер. с англ.- М.: Мир, 1989. – 280 с.
12. Зельдович Я. Б., Компанеев А. С. Теория детонации. М.: Гостехиздат, 1955.
13. Николаев Ю. А., Топчийн М. Е. Расчет равновесных течений в детонационных волнах газах // Физика горения и взрыва. 1977. Т. 13, №3. С. 393-404.
14. Николаев Ю. А., Гапонов О. П. О пределах детонации в газах // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 3. С. 139-145.
15. Васильев А. А. О геометрических пределах распространения газовой детонации // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18, № 2. С. 132-136.
16. Манжалей В. И. Пределы низкоскоростной детонации газовых смесей // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 3. С. 89-96.
17. Фролов С. М., Гельфанд Б. Е. О предельном диаметре распространения газовой детонации в трубах // Докл. АН СССР. 1990. Т. 312, № 5. С. 1177-1180.
18. Агафонов Г. Л., Фролов С. М. Расчет пределов детонации газовых водородсодержащих смесей // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 1. С. 92-100.
19. Харитон Ю. Б. О детонационной способности взрывчатых веществ // Вопросы теории взрывчатых веществ. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1947. № 1. С. 7-28.
20. Фролов С. М. Импульсное детонационное горение: новое поколение энергетических установок // Интеграл. 2008. № 3(41). С. 44—45.
21. Зельдович Я. Б. К вопросу об энергетическом использовании детонационного горения // Журнал технической физики. – 1940. – Т.10. – Вып. 17. – С. 1453.
22. Булат П.В., Денисенко П.В., Волков К.Н. Тенденции разработки детонационных двигателей для высокоскоростных воздушно-космических летательных аппаратов и проблема тройных

- конфигураций ударных волн. Часть I - Исследования детонационных двигателей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 1. - С. 1-21.
23. Фролов С.М. Импульсные детонационные двигатели. М.: Торус Пресс, 2006. 592 с.
 24. <http://www.google.com.pg/patents/WO2015099552A1?cl=ru&hl=ru>
 25. <https://www.kommersant.ru/doc/3283615>
 26. Сосновская А.В. Детонационно-эжекторный электрогенератор // Матеріали ІІ-ї Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Актуальні проблеми сучасної енергетики». – Херсон: ХНТУ, 2017. – С.95-96.
 27. Способ прямого преобразования энергии импульсного детонационного сгорания топлива в электрическую энергию и генератор переменного тока для его реализации. Патент РФ № 2418968.
 28. http://adam-armen.ru/article8/s8_rus.html
 29. Сычевский В.А., Борисов Е.В., Миронов В.Н. Использование численного моделирования для выбора параметров газовых течений в ударно-детонационных технологиях // V Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer. May 24-28, Minsk, 2004.
 30. Борисов Е.В., Яглов В.Н., Бабушкин О.С. Способ получения порошков тугоплавких оксидов. А.с. 1649738 (СССР).
 31. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.Н. Ардатовская. – Киев: Наукова думка, 1987. - 544 с.
 32. Букаемский А.А. Нанопорошок диоксида циркония. Взрывной метод получения и свойства // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37, № 4. С. 129-134.
 33. Воронин В.Н. Технология балансировки абразивных кругов, используемых для шлифования пар трения методами детонационного напыления // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 18, № 4(2), 2016. – С.237-241.
 34. Детонационные технологии балансировки и упрочнения абразивных кругов / М.В. Ненашев, Д.А. Деморецкий, И.Д. Ибатуллин, С.Г. Ганигин, А.Н. Журавлев, Р.Г. Гришин, А.С. Дьяконов, В.Н. Воронин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т.14. №1(2). С.409-412.
 35. Воронин В.Н., Ибатуллин И.Д. Технология упрочнения и балансировки абразивных кругов [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. 2014. №2. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2372>.
 36. Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело», 2012, № 4
 37. Система нанесения покрытий осаждением из газовой фазы в потоке продуктов газовой детонации / С.Ю. Ганигин, А.Ю., Мурзин, О.Ю. Глазунова, П.К. Кондратенко, М.В. Ненашев, И.В. Нечаев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, том 16, № 1(2), 2014. – С.385-389.
 38. Разрушение горного массива машинами взрывоимпульсного действия. М.: Наука, 1974. – 230 с.
 39. Взрывоимпульсное разрушение горных пород. – М.: Наука, 1979. – 212 с.
 40. Методы наружной очистки котлов-утилизаторов / Я.М. Щелоков, Э.М. Телегин, В.Н. Подымов, В.И. Гасников. – Казань: изд-во КГУ, 1974. – 213 с.
 41. Щелоков Я.М., Аввакумов А.М., Сазыкин Ю.К. Очистка поверхностей нагрева котлов-утилизаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.
 42. А.с. № 674886 (СССР). Способ изготовления алмазно-абразивного инструмента / В.В. Пименов, Н.Д. Сусликова, Н.И. Корнилов, Ю.А. Харламов и др.
 43. А.с. № 669531 (СССР). Способ дробления сверхтвердого трещиноватого материала / В.В. Пименов, Н.Д. Сусликова, Н.И. Корнилов, Ю.А. Харламов и др.
 44. <http://otvaga2004.ru/kaleydoskop/kaleydoskop-ammo/boepripasy-obyomnogo-vzryva/>
 45. Стаховский О.В. Иницирование детонации в неограниченном объеме // Механіка та машинобудування, 2009, № 1. – С.174-181.
 46. Сиротенко А.М., Довбня А.М., Стаховський О.В., Коритченко К.В. Застосування бронетанкової техніки для розмінування мінних полів об'ємним вибухом // Механіка та машинобудування. – 2006. - №1. – С.178-188.
 47. Сиротенко А.Н., Довбня А.Н., Стаховський О.В., Коритченко К.В. Создание детонационно-способной смеси в газовой струе с приложением для разминирования минных полей // Механіка та машинобудування. – 2006. - №1. – С.166-177.
 48. Патент України на винахід № 78083 від 21.02.2005 МПК7: F41H11/12 Спосіб розмінування мінних вибухових загороджень / Сиротенко А.М., Янчик О.Г., Стаховський О.В., Коритченко К.В., Ларин О.Ю.
 49. Серпухов А.В., Сиротенко А.Н., Стаховський О.В., Коритченко К.В. Технические средства разминирования минных полей взрывным способом // Механіка та машинобудування, Харків: ХПІ. – 2007. - №1. – С.48-55.
 50. Серпухов О.В. Спеціальне обладнання до бронетанкової техніки для розширення колійних проходів у мінних вибухових загородженнях // Системи обробки інформації, Харків: ХУПС. – 2008.
 51. Стаховський О.В., Коритченко К.В., Угрюмов М.Л., Скоб Ю.А. Способ иницирования детонации в неограниченном пространстве // Системи обробки інформації: збірник наукових праць. – Харків: Харківський університет повітряних сил імені Івана Кожедуба, 2008. – Випуск 2 (69). – С. 105 – 107.
 52. Борисов Е.В. и др. Способ обработки призабойной зоны пласта. А.с. 1405384 (СССР).
 53. Борисов Е.В. Способ обработки призабойной зоны пласта. А.с. 1595069 (СССР).
 54. Снитка Н.П., Норов Ж.А., Норов А.Ю. Методы восстановления производительности водозаборных технологических скважин // Горный вестник Узбекистана, 2015, №1(60). – С.6-8.
 55. Способ утилизации боеприпасов. Патент РФ 2137089.
 56. Геофизические методы исследований / В.К. Хмелевской, Ю.И. Горбачев, А.В. Калинин, М.Г. Попов, Н.И. Селиверстов, В.А. Шевнин. - Петропавловск-Камчатский: изд-во КГПУ, 2004, 232 с.
 57. Установка газовой детонации. А.с. 603929 (СССР).
 58. Костюченко В.Н., Кочарян Г.Г., Свинцов И.С. Устройство для многократного создания сейсмических волн в массиве горных пород. Патент РФ № 2199660.
 59. Трифонов О. В. Современное состояние технологии и оборудования для очистки от заусенцев детонирующими газовыми смесями и направления их совершенствования / О. В. Трифонов // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. - 2013. - Вып. 1. - С. 115-121.

60. Моделирование теплообмена при затухании ударных волн в замкнутой камере / С. И. Планковский, О. В. Шипуль, О. В. Трифонов, Е. С. Палазюк, В. Л. Малашенко // *Авиационно-космическая техника и технология*, 2014, № 1. – С.104-109.
61. Моделирование процесса оплавления заусенцев при термоимпульсной обработке детонирующими смесями / С. И. Планковский, А.В. Гайдачук, О. В. Шипуль, Е. С. Палазюк // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – № 3 (100). – С. 4-11.
62. Расчет тепловых потоков при термоимпульсной обработке с форкамерно-факельным поджогом / О.В. Шипуль, Е.В. Цегельник, В.Л. Малашенко, С.А. Красовский // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии* № 62, 2013. – С.89-97.
63. Пак Н.И. Численное моделирование процесса термического удаления заусенцев концентрированным потоком энергии / Н. И Пак, С.А. Шкинунов // *Обработка материалов импульсными нагрузками*. – Новосибирск, 1990. – С. 168–175.
64. Манжалей В.И. Затухания ударных волн и теплопередачи телам после детонации газа в камере / В.И. Манжалей - Новосибирск, 1989. – С. 123-132.
65. Отработка технологических режимов удаления заусенцев с деталей из алюминиевых сплавов газоимпульсным методом: Отчет, Инв. №02830007717. – Новосибирск. – 1982. – 103 с.
66. Лосев А.В. Повышение эффективности зачистки деталей пневматических и гидротопливных систем при использовании термоимпульсного метода: дис. ...канд. техн. наук: 05. 02. 08.А.В. Лосев. – Х., 1995. – 210 с.
67. Фадеев В.А. Обеспечение промышленной чистоты изделий машиностроения в производстве с использованием термоимпульсного метода / В.А. Фадеев, А.В. Лосев, О. А. Лосева // *Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – НТУ "ХПИ", Х., 2006. – Вып. 70. – С. 516 – 512.*
68. Расчет тепловых потоков при термоимпульсной обработке с форкамерно-факельным поджогом / О.В. Шипуль, Е.В. Цегельник, В.Л. Малашенко, С.А. Красовский // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии* № 62, 2013. – С.89-97.
69. Жданов О.А. Термоімпульсна технологія очистки поверхонь деталей агрегатів авіаційних двигунів. Автореф....ктн. – ХАИ, 2003. – 19 с.
70. Аналитическая модель удаления микрочастиц детонирующими газовыми смесями при очистке деталей ГТД / И. Б. Кузнецов, В. П. Божко, Е. В. Цегельник, Д. А. Брега // *Авиационно-космическая техника и технология*, 122 2016, № 8(135). – С.122-127.
71. Планковский С.И., Шипуль О.В. Проблемы развития методов финишной отделки и очистки интенсивными тепловыми потоками // *Пробл. машиностроения*, 2011, Т. 14, № 2. – С.72-82.
72. Моделирование термоимпульсной обработки с учетом неоднородности топливной смеси / С.И. Планковский, О.В. Шипуль, О.В. Трифонов, О.С. Борисова // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*, № 46, 2010. – С.75-87.
73. Gillespie L. *Deburring and edging finishing handbook* / L. Gillespie. – New York City: Industrial Press, 1999. – 404 p.
74. Назначение режимов обработки для автоматизированных термоимпульсных установок в условиях информационно-интегрированного производства [Текст] / С. И. Планковский, О. В. Шипуль, В. Л. Малашенко, В. Г. Козлов // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. научных трудов «ХАИ»*. – Вып. 45. – Х., 2012. – С. 67-77.
75. Современное состояние и перспективы развития технологий финишной отделки прецизионных деталей летательных аппаратов / С.И. Планковский, А.В. Лосев, О.В. Шипуль, О.С. Борисова // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 2 (69). – С. 39-47.
76. Лосев А.В. Повышение эффективности зачистки деталей пневматических и гидротопливных систем при использовании термоимпульсного метода: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08; защищена 14.05.1995; утв. 07.10.1995 / Лосев Алексей Васильевич. – Х., 1995. – 210 с.
77. Мазниченко С.А. Об особенностях смесеобразования в тепловых приводах импульсного оборудования / С.А. Мазниченко, С.И. Планковский, О.С.Борисова // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 7 (44). – С. 45-52.
78. Моделирование термоимпульсной обработки с учетом неоднородности топливной смеси / С.И. Планковский, О.В. Шипуль, О.В.Трифонов, О.С. Борисова // *Открытые информационные компьютерные технологии*. – 2010. – №3. – С. 37-47.
79. Математическое моделирование горения топливной смеси в камерах термоимпульсных машин с учетом перехода сгорания в детонационный режим / С.И. Планковский, О.В. Трифонов, О.В. Шипуль, В.Г. Козлов // *Авиационно-космическая техника и технология*, 2012, № 1 (88). – С.5-9.
80. Назначение режимов обработки для автоматизированных термоимпульсных установок в условиях информационно-интегрированного производства / С.И. Планковский, О.В. Шипуль, В.Л. Малашенко, В. Г. Козлов // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии* № 56, 2012. – С.67-77.
81. Методика расчета тепловых потоков при термоимпульсной обработке детонирующими газовыми смесями / С. И. Планковский, О. В. Шипуль, Е. С. Палазюк, С. А. Красовский // *Авиационно-космическая техника и технология*, 18 2014, № 6 (113). – С.17-23.
82. Борисов Е.В., Мартынов О.Г., Миронов В.Н. Обезвреживание глины в детонирующих газовых смесях // *Тепло- и массоперенос-97*. Минск: ИТМО, 1997. С.69-73.
83. Способ детонационной штамповки и устройство для его реализации. Межд. патент WO 2016/ 060582 A1.
84. Ударно-волновая газодинамическая установка для формирования бетонных объектов с пустотами. Патент РФ 2169073.
85. Способ уплотнения пористой массы в газовом баллоне и установка для его осуществления. Патент РФ № 2079769.
86. Способ измельчения и плавления снежно-ледяной массы и устройство для его реализации. Межд. патент WO 2015/099553 A1.
87. Сакун А.В., Хилько Ю.В., Корытченко К.В. Численное моделирование внутрибаллистических процессов в газодетонационной установке метания тушащих веществ // *Проблемы пожарной безопасности*.

- Сборник научных трудов. Выпуск 36, 2014. – С.208-217.
88. Применение детонации водородовоздушной смеси в устройствах для безыгольной инъекции / В. В. Голуб, Т. В. Баженова, Д. И. Бакланов, К. В. Иванов, М. С. Кривокорытов // Теплофизика высоких температур, 2013, том 51, выпуск 1, С.147–150.
 89. Лукьянчиков Л. А. Системы инициирования на вторичных взрывчатых веществах // Прикладная механика и техническая физика. 2000. Т. 41, № 5. – С.48-61.
 90. Григорьев В. В., Лукьянчиков Л. А., Пруэлл Э. Р. Поджигание частиц тэна волной газовой детонации // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, № 2. С. 133–138.
 91. Андреев В. В., Лукьянчиков Л. А., Митрофанов В. В., Тесленко В. С. Возбуждение детонации порошковых ВВ взрывом газовых смесей // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16, № 4. С. 153–155.
 92. Кроль О.С., Шевченко С.В., Соколов В.І. Проектування металорізальних верстатів у середовищі АРМWinMachine. – Луганськ: ЧНУ ім. В. Даля. – 2011. – 388 с.
 93. Соколов В.І., Кроль О.С., Спіфанова О.В. Гідравліка. – Северодонецьк: ЧНУ ім. В. Даля. – 2017. – 160 с.
 94. Кроль О.С., Шумакова Т.О., Соколов В.І. Проектування зуборізних інструментів за допомогою системи КОМПАС. – Луганськ: ЧНУ ім. В. Даля. – 2013. – 142 с.
 12. Zel'dovich Ya. B., Kompaneets AS Theory of detonation. Moscow: Gostekhizdat, 1955.
 13. Nikolaev Yu. A., Topchiyan M. Ye. Calculation of equilibrium flows in detonation waves in gases // Physics of combustion and explosion. 1977. Vol. 13, No. 3. P. 393-404.
 14. Nikolaev Yu. A., Gaponov OP On the limits of detonation in gases // Physics of Combustion and Explosion. 1995. T. 31, No. 3. P. 139-145.
 15. AA Vasiliev, Geometric limits of the propagation of gas detonation, Fiz., Combustion and Explosion. 1982. Vol. 18, No. 2. P. 132-136.
 16. V.I Mangaleley, Limits of low-velocity detonation of gas mixtures, Fiz., Combustion and Explosion. 1999. Vol. 35, No. 3. P. 89-96.
 17. Frolov, SM and Gel'fand, BE, On the limiting diameter of the propagation of gas detonation in pipes, Dokl. AN SSSR. 1990. T. 312, No. 5. P. 1177-1180.
 18. Agafonov GL, Frolov SM Calculation of the limits of detonation of gas hydrogen-containing mixtures // Physics of Combustion and Explosion. 1994. Vol. 30, No. 1. P. 92-100.
 19. Khariton Yu. B. About the detonation ability of explosives. // Questions of the theory of explosives. M.; L.: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1947. No. 1. P. 7-28.
 20. Frolov, SM, Impulse detonation combustion: a new generation of power plants, Integral. 2008. № 3 (41). Pp. 44-45.
 21. Zel'dovich Ya. B. On the question of the energy use of detonation combustion // Journal of Technical Physics. - 1940. - T.10. - Вып. 17. - P. 1453.
 22. Bulat PV, Denisenko P.V., Volkov K.N. Trends in the development of detonation engines for high-speed aerospace aircraft and the problem of triple shock wave configurations. Part I - Studies of detonation engines // Scientific and Technical Herald of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2016. T. 16. № 1. - P. 1-21.
 23. Frolov S.M. Pulse detonation engines. Moscow: Torus Press, 2006. 592 p.
 24. <http://www.google.com.pg/patents/WO2015099552A1?cl=ru&hl=ru>
 25. <https://www.kommersant.ru/doc/3283615>
 26. Sosnovskaya A.V. Detonation-ejector electrogenerator // Materiali II-i All-Ukrainian scientific-practical conference-students, aspirants and young adults "Actual problems of the future energy". - Kherson: KhNTU, 2017. - P.95-96.
 27. A method for direct conversion of the energy of pulsed detonation combustion of fuel into electrical energy and an alternating current generator for its implementation. Patent of the Russian Federation No. 2418968.
 28. http://adam-armen.ru/article8/s8_rus.html
 29. Sychevsky VA, Borisov EV, Mironov V.N. The use of numerical modeling for the choice of parameters of gas flows in shock-detonation technologies // V Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer. May 24-28, Minsk, 2004.
 30. Borisov EV, Yaglov VN, Babushkin O.S. Method for obtaining powders of refractory oxides. A.S. 1649738 (USSR).
 31. Gasothermic coatings from powder materials: Reference / Yu.S. Borisov, Yu.A. Kharlamov, S.L. Sidorenko, E.N. Ardatovskaya. - Kiev: Naukova Dumka, 1987. - 544 p.
 1. Selivanov, VV, Explosive technologies: a textbook for high schools / V. V. Selivanov, I. F. Kobylkin, S. A. Novikov. - 2 nd ed., Pererab. and additional. - Moscow: Publishing house MSTU. NE Bauman, 2014. - 519 p.
 2. Kharlamov, Yu. A., Detonation-gas processes in industry / Yu. A. Kharlamov, NA Budagyants; East-Ukr. state. un-ty. - Lugansk: Publishing house of VUGU, 1998. - 223 c.
 3. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective / G.D. Roya, S.M. Frolov, A.A. Borisov, D.W. Netzer // Progress in Energy and Combustion Science, 30 (2004). – P. 545–672.
 4. Shorshorov M.H., Kharlamov Yu.A. Physicochemical bases of detonation-gas spraying of coatings. - Moscow: Nauka, 1978. - 224 p.
 5. Frolov S.M. The science of combustion and the problems of modern energy // Ros. chem. f. (Zh.M., D.I. Mendeleev Chemical Society of the Russian Federation), 2008, vol. LII, No. 6. - P.129-134.
 6. Nikolaev Yu.A., Vasilyev AA, Ulyanitsky V.Yu. Gas Detonation and its Application in Engineering and Technology // Physics of Combustion and Explosion. 2003. T. 39, No. 4. P. 22-54.
 7. Bazhenova TV, Golub V.V. Use of gas detonation in controlled frequency mode // Physics of combustion and explosion. 2003. T. 39, No. 4. P. 3-21.
 8. Voitsekhovskiy BV, Mitrofanov VV, Topchiyan ME The structure of the detonation front in gases. Novosibirsk: Publishing house of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1963.
 9. Detonation waves in condensed media / AN Dremine, SD Savrov, VA Trafimov, K. K. Shvedov. M.: Nauka, 1970.
 10. Shchelkin KI, Troshin Ya..K. Gas dynamics of combustion. - Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR. - 1963.-256 p.
 11. Netleton M. Detonation in gases: Trans. with English. - M.: Mir, 1989. 280 p.

References

32. Bukaemsky A.A. Nanopowder of zirconia. Explosive method of obtaining and properties // *Physics of combustion and explosion*. 2001. P. 37, No. 4. P. 129-134.
33. Voronin V.N. Technology of balancing of abrasive wheels used for grinding friction pairs by methods of detonation deposition // *Izvestiya Samara Scientific Center, Russian Academy of Sciences*, vol. 18, No. 4 (2), 2016. - P.237-241.
34. Detonation technologies of balancing and hardening of abrasive wheels / M.V. Nenashev, D.A. Demoretsky, I.D. Ibatullin, S.G. Ganigin, A.N. Zhuravlev, R.G. Grishin, A.S. Dyakonov, V.N. Voronin // *Izvestiya of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2012. T.14. №1 (2).C.409-412.
35. Voronin VN, Ibatullin ID Technology of hardening and balancing of abrasive wheels [Electronic resource] // *Engineering bulletin of the Don*. 2014. №2. URL:<http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2372>.
36. *Electronic Scientific Journal "Oil and Gas Business"*, 2012, No. 4
37. A system for deposition of coatings by deposition from the gas phase in a stream of gas detonation products / S.Yu. Ganigin, A.Yu. Murzin, O.Yu. Glazunov, P.K. Kondratenko, M.V. Nenashev, I.V. Nechaev // *Izvestiya of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, Vol. 16, No. 1 (2), 2014. - P.385-389.
38. *Destruction of the mountain massif by explosion-action machines*. Moscow: Nauka, 1974. - 230 p.
39. *Explosive destruction of rocks*. - Moscow: Nauka, 1979. - 212 p.
40. *Methods of external cleaning of waste-heat boilers* / Ya.M. Shchelokov, E.M. Tegin, V.N. Podymov, V.I. Gasnikov. - Kazan: Publishing House of KSU, 1974. - 213 p.
41. Shchelokov YM, AvvakumovAM, SazykinYu.K. Cleaning of the heating surfaces of waste heat boilers. - Moscow: Energoatomizdat, 1984. - 160 p.
42. Ac. № 674886 (USSR). Method of manufacturing a diamond-abrasive tool / V.V. Pimenov, N.D. Suslikova, N.I. Kornilov, Yu.A. Kharlamov et al.
43. Ac. No. 669531 (USSR). Method of crushing of superhard cracked material. Pimenov, N.D. Suslikova, N.I. Kornilov, Yu.A. Kharlamov et al.
44. <http://otvaga2004.ru/kaleydoskop/kaleydoskop-ammo/boepripasy-obyomnogo-vzryva/>
45. Stakhovsky O.V. Initiation of detonation in an unlimited volume // *Mekhanikatachanobuduvnya*, 2009, No. 1. - P.174-181.
46. Sirotenko AM, Dovbnya AM, Stakhovsky OV, Koritchenko K.V. Застосування бронетанкової техніки для розмінування міних полібоївним вибухом / *Mekhanika that machine-building*. - 2006. - №1. - P.178-188.
47. Sirotenko AN, Dovbnya AN, Stakhovsky OV, Korytchenko KV Creation of a detonation-capable mixture in a gas jet with an application for the demining of minefields. *Mekhanikatachanobuduvnya*. - 2006. - №1. - P.166-177.
48. Patent of Ukraine on the Wine № 78083 dated: 21.02.2005 IPC7: F41H11 / 12 The process of rozmiznuvannyaminnovibuhovihzagorodzhenn / Sirotenko AM, Yanchik OG, Stakhovsky OV, Koritchenko KV, Larin O .YU.
49. Serpukhov AV, Sirotenko AN, Stakhovsky OV, Korytchenko KV Technical means of demining minefields by an explosive method. *Mekhanik ta mashinobuduvannya*, Khar'kov: KhPI. - 2007. - №1. - P.48-55.
50. Serpuhov O.V. Specialnyeobladnannya to armored vehicles for rozshirennakoliynihprohodiv u minnovibuhovihzagorodzhenni // *Sistemiobrobkiinformatsii*, Kharkiv: HUPS. - 2008. - S.
52. Borisov E.V. and others.The method of processing the bottomhole formation zone.A.S. 1405384 (USSR).
53. Borisov E.V. Method of processing bottomhole formation zone.A.S. 1595069 (USSR).
54. Snitka NP, NorovZh.A., NorovA.Yu. Methods for recovering the productivity of water intake technological wells // *GornyVestnik of Uzbekistan*, 2015, No. 1 (60). - C.6-8.
55. Method of disposal of ammunition. Patent of the Russian Federation No. 2137089.
56. Geophysical methods of research / V.K. Khmelevskoy, Yu.I. Gorbachev, A.V. Kalinin, M.G. Popov, N.I. Seliverstov, V.A. Shevvin. - Petropavlovsk-Kamchatsky: publishing house KSPU, 2004, 232 p.
57. Installation of gas detonation. A.S. 603929 (USSR).
58. Kostyuchenko VN, Kocharyan GG, Svintsov IS The device for multiple creation of seismic waves in a massif of rocks. Patent of the Russian Federation No. 2199660.
59. Trifonov, OV, "Current state of technology and equipment for cleaning deburring gas mixtures from burrs and the direction of their improvement," OV Trifonov, in: *Problems of Design and Production of Aircraft Structures*. - 2013. - Issue. 1. - P. 115-121.
60. Modeling of heat transfer in the case of attenuation of shock waves in a closed chamber / SI Plankovskii, OV Shipul, OV Trifonov, ES Palazyuk, VL Malashenko // *Aviation and space technology and technology*, 2014, No. 1. - P.104-109.
61. Simulation of the process of deburring with thermoimpulse treatment of detonating mixtures / SI Plankovskii, A.V. Gaidachuk, OV Shipul, ES Palazyuk // *Aviation and space technology and technology*. - 2013. - No. 3 (100). - P. 4-11.
62. Calculation of heat fluxes during thermoimpulse treatment with prechamber-torch arson / O.V. Shipul, E.V. Tsegelnik, V.L. Malashenko, S.A. Krasovskiy // *Open information and computer integrated technologies* No. 62, 2013. - P.89-97.
63. Pak N.I. Numerical modeling of the process of thermal deburring by concentrated energy flow / N.I. Pak, S.A. Shikunov // *Processing of materials by impulse loads*. - Novosibirsk, 1990. - P. 168-175.
64. Manzheley VI. Damping of shock waves and heat transfer to bodies after detonation of gas in the chamber.Manzheley - Novosibirsk, 1989. - P. 123-132.
65. Elaboration of technological modes of deburring from aluminum alloy parts by gas-pulse method: Report, Inv. №02830007717. - Novosibirsk. - 1982. - 103 p.
66. Losev A.V. Improving the efficiency of stripping of parts of pneumatic and hydro-fuel systems using the thermoimpulse method: dis. ... cand. tech. Sciences: 05. 02. 08.A.V. Losev. - H., 1995. - 210 p.
67. Fadeev VA Providing industrial purity of engineering products in production using the thermoimpulse method / V.A. Fadeev, A.V. Losev, OA Loseva // *Cutting and the tool in technological systems: Intern. scientific-techn. Sat. - NTU "KhPI"*, H., 2006. - Issue. 70. - P. 516 - 512.
68. Calculation of heat fluxes during thermoimpulse treatment with prechamber-torch arson / O.V. Shipul, E.V. Tsegelnik, V.L. Malashenko, S.A. Krasovskiy // *Open information and computer integrated technologies* No. 62, 2013. - P.89-97.

69. Zhdanov OA Thermoimpulse cleaning technologies inverting parts of aggregates in aviatsynnyhdvigniv. Autoref ... act. - KhAI, 2003. - 19 p.
70. Analytical model for the removal of microparticles by detonating gas mixtures during the purification of GTE parts / IB Kuznetsov, VP Bozhko, EV Tsegelnik, DA Brega // Aviation and space technology and technology, 122 2016, No. 8 (135). - P.122-127.
71. Plankovski SI, Shipul O.V. Problems of the Development of Finishing Techniques and Cleaning by Intensive Heat Flows. Probl.machine building, 2011, T. 14, № 2. - P.72-82.
72. Modeling of thermoimpulse treatment taking into account the heterogeneity of the fuel mixture / S.I. Plankovsky, O.V. Shipul, O.V. Trifonov, O.S. Borisov // Open information and computer integrated technologies, No. 46, 2010. - P.75-87.
73. Gillespie L. Deburring and edge finishing handbook / L. Gillespie. - New York City: Industrial Press, 1999. - 404 p.
74. Designation of processing modes for automated thermoimpulse plants in conditions of information-integrated production [Text] / SI Plankovskiy, OV V. Shipul, VL Malashenko, VG Kozlov // Open information and computer integrated technologies : Sat. scientific works "KhAI". - Вып. 45. - H., 2012. - P. 67-77.
75. The current state and prospects for the development of finishing technologies for precision parts of aircrafts / S.I. Plankovsky, A.V. Losev, O.V. Shipul, O.S. Borisova // Aviation and space technology and technology. - 2010. - No. 2 (69). - P. 39-47.
76. Losev A.V. Improving the efficiency of stripping of parts of pneumatic and hydro-fuel systems using the thermoimpulse method: dis. ... cand. tech. Sciences: 05.02.08; is protected on May 14, 1995; ut.10.10.1995 / Losev Alexey Vasilyevich. - H., 1995. - 210 p.
77. Maznichenko S.A. On the features of the mixture formation in thermal drives of pulsed equipment / S.A. Maznychenko, S.I. Plankovsky, OS Borisova // Aviation and space technology and technology. - 2007. - No. 7 (44). - P. 45-52.
78. Modeling of thermoimpulse treatment taking into account the heterogeneity of the fuel mixture / S.I. Plankovsky, O.V. Shipul, OV Trifonov, O.S. Borisov // Open information computer technologies. - 2010. - №3. - P. 37-47.
79. Mathematical modeling of combustion of a fuel mixture in the chambers of thermo-pulsed machines, taking into account the transition of combustion into a detonation regime / S.I. Plankovsky, O.V. Trifonov, O.V. Shipul, V.G. Kozlov // Aviation and Space Technology and Technology, 2012, No. 1 (88). - C.5-9.
80. Purpose of processing modes for automated thermoimpulse plants in the conditions of information-integrated production / S.I. Plankovsky, O.V. Shipul, V.L. Malashenko, VG Kozlov // Open information and computer integrated technologies No. 56, 2012. - P.67-77.
81. A method for calculating heat fluxes in the thermoimpulse treatment with detonating gas mixtures. SI Plankovskii, OV Shipul, ES Palazyuk, SA Krasovskii // Aviation and Space Technology and Technology, 18 2014, No. 6 (113). - P.17-23.
82. Borisov EV, Martynov OG, Mironov VN Dehydration of clay in detonating gas mixtures. Heat and mass transfer-97. Minsk: ITMO, 1997. P.69-73.
83. Detonation stamping method and device for its implementation. Int. patent WO 2016/060582 A1.
84. Shock-wave gas-dynamic installation for the molding of concrete objects with voids. Patent of the Russian Federation No. 2169073.
85. A method for compacting a porous mass in a gas container and an installation for carrying it out. Patent of the Russian Federation No. 2079769.
86. A method for grinding and melting a snow-ice mass and a device for its implementation. Int. patent WO 2015/099553 A1.
87. Sakun AV, Khil'koYu.V., Korytchenko K.V. Numerical simulation of intraballistic processes in a gas detonation installation of quenching substances / / Problems of fire safety. Collection of scientific papers. Issue 36, 2014. - P.208-217.
88. Application of detonation of a hydrogen-air mixture in devices for needleless injection / VV Golub, TV Bazhenova, DI Baklanov, KV Ivanov, MS Krivokorotov // Thermophysics of High Temperatures, 2013, vol. 51, issue 1, C.147-150.
89. Luk'yanchikov LA Systems of initiation on secondary explosives // Applied Mechanics and Technical Physics. 2000. Vol. 41, No. 5. - P.48-61.
90. Grigoryev VV, Lukyanchikov LA, Prueel E. R. Ignition of the particles of the ten by a wave of gas detonation // Physics of Combustion and Explosion. 1997. Vol. 33, No. 2. P. 133-138.
91. Andreev VV, Lukyanchikov LA, Mitrofanov VV, Teslenko VS The excitation of detonation of powder explosives by the explosion of gas mixtures // Physics of combustion and explosion. 1980. V. 16, No. 4. P. 153-155.
92. Krol O., Shevchenko S.V., Sokolov V. Design machine tools in environment APM WinMachine. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2011.
93. SokolovV., KrolO., YepifanovaO. Hydraulics. V. Dahl EUNU, Severodonetsk, 2017.
94. Krol O., Shumakova T., Sokolov V. Design metal cutting instruments by dint of system of KOMPAS. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2013.

Харламов Ю.О. Розвиток детонаційно-газових технологій

Розглянуто особливості газової детонації як джерела енергії. Систематизовані та проаналізовані основні області практичного застосування газової детонації в промисловості, на транспорті і в енергетиці. Показано, що більш висока ефективність згоряння являється в детонаційному режимі обумовлює перспективність розширення сфер застосування газової детонації.

Ключові слова: вибухові речовини, газова детонація, детонаційна хвиля, щодвигун, напілення, пристрій, енергетична установка.

Kharlamov Y.A. Development of gaseous detonation technologies

The features of gas detonation as a source of energy are considered. Systematized and analyzed are the main areas of practical application of gas detonation in industry, transport and energy. It is shown that the higher combustion efficiency of the fuel in the detonation mode determines the prospects for expanding the areas of application of gas detonation.

Key words: explosives, gas detonation, detonation wave, engine, spraying, device, power plant.

Харламов Ю.О. – д.т.н., професор, професор кафедри машинобудування та прикладної механіки Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: yuriy.kharlamov@gmail.com

Рецензент: д.т.н., проф. **Соколов В.І.**

УДК 535.247.4: 535.243

ИССЛЕДОВАНИЕ АДсорбЦИИ ГЕРМАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ ФОТОЭМИССИОННЫМ МЕТОДОМ

Черников Н. Г., Черникова И. Д.

INVESTIGATION OF GERMANY ADSORPTION TO THE SURFACE OF ARSENIDE OF GALLIUM BY PHOTOEMISSION METHOD

Chernskov N. G., Chernikova I. D.

В статье рассмотрено влияние адсорбированных слоёв германия на поверхности монокристаллов арсенида галлия различного типа проводимости фотоэмиссионным методом в сверхвысоком вакууме. Изучены вопросы влияния адсорбированных слоев на электронную структуру подложки, а так же каким образом влияют атомы германия на изменение работы выхода фотоэлектронов из монокристаллов арсенида галлия.

Ключевые слова: полупроводник, поверхность твёрдого тела, фотон, энергия фотонов, адсорбция, подложка, квантовый выход, распределение фотоэлектронов по энергиям, вакуум.

Введение. Арсенид галлия и его поверхностные свойства привлекают большое внимание исследователей в связи с возможностями его широкого применения в технике микро- и нанoeлектроники.

Несмотря на многочисленные исследования поверхности полупроводников, многие вопросы, касающиеся ее свойств и процессов на границе двух фаз, ещё недостаточно выяснены, особенно это касается влияния условий на поверхности на энергетический спектр электронов в кристаллах.

Постановка проблемы. Интерес к этим вопросам непрерывно возрастает не только с научной точки зрения, но и с практической – в связи с развитием полупроводниковой микро- и нанoeлектроники. Развитие таких её разделов, как тонкослойная нанoeлектроника и оптоэлектроника, устройства с МДП структурами и зарядовой связью, холодных катодов и эффективных фотокатодов и др. требуют понимания процессов в приповерхностном слое полупроводника как присвободной поверхности, так и при адсорбции на её поверхность других веществ. Это важно так же для выяснения возможности желаемым образом изменять поверхностные и приповерхностные свойства твёрдых тел.

Из сказанного следует, что адсорбция чужеродных атомов на поверхность монокристаллов GaAs оказывает существенное влияние на фотоэмиссию. Однако ещё недостаточно изучено: влияние покрытий на свойства поверхностного слоя арсенида галлия, на структуру энергетического спектра электронов, не выяснено в какой мере разные покрытия влияют на загиб зон и электронное сродство к электрону, что существенно для выяснения способа уменьшения работы выхода фотоэлектронов. Выбор таких покрытий обусловлен тем, что различные вещества (металлы, диэлектрики, полупроводники) значительно отличаются по своим физико-химическим свойствам, и поэтому наличие их на поверхности твёрдого тела должно оказывать различное влияние как на свойства поверхности полупроводников, так и на структуру зон в приповерхностной области.

Анализ последних исследований и публикаций. Изменяя условия на поверхности, например, нанося чужеродные атомы, можно воздействовать на свойства приповерхностного слоя. Исследования показывают, что адсорбция вещества на подложку твёрдого тела приводит к различным изменениям характеристик поверхности твёрдого тела, таких как работа выхода [1,2], подвижность носителей тока в приповерхностном слое [3], фотоэмиссионные свойства [4-6] и др. Эти изменения происходят как вследствие возникновения электрического слоя поля в слое приповерхностного объёмного заряда, так и изменения электронной структуры твёрдого тела вблизи поверхности.

Изучение поверхности твёрдых тел и ее влияния на физические свойства последних проводятся различными методами: оптическими, дифракцией медленных электронов, эффекта поля, исследования контактной разности потенциалов, методами электронной спектроскопии, а также

методом фотоэмиссии. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки [7]. Однако преимущество метода фотоэмиссии заключается в том, что он позволяет получать большую информацию об энергетическом спектре электронов в полупроводниках и, таким образом, даёт возможность проследить за изменениями этого спектра при изменении условий на поверхности.

Особенно много работ в последнее время посвящено изучению фотоэмиссионным методом влияния адсорбции Cs, Cs-O [8-10] на поверхностные свойства арсенида галлия. Это обусловлено тем, что в этом случае получается эффективный эмиттер с отрицательным электронным сродством к электрону [11-13]. Однако большинство таких исследований носит чисто практический характер и в них не уделяется должного внимания выяснению поверхностных свойств арсенида галлия.

Высокая эффективность фотоэмиссии из сильно легированного цинком GaAs p-типа ($p \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$) при адсорбции Cs-O обусловлена возникающим в этом случае отрицательным сродством к электрону [13], однако высокая эффективность фотоэмиссии наблюдалась и образцов GaAs p-типа со значительно меньшим уровнем легирования германием ($p \approx 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) при такой же обработке поверхности Cs и O [14].

Выделение ранее нерешенных частей общей проблемы, которым посвящается данная статья. Можно предположить, что высокая эффективность фотоэмиссии у образцов GaAs p-типа, легированных германием, могла быть обусловлена либо влиянием германия на объёмные свойства, либо образовавшимися особыми условиями на поверхности арсенида галлия вследствие присутствия там атомов германия.

Постановка задачи. В связи с этим представляет интерес выяснить, как влияет адсорбция атомов германия на фотоэмиссию из образцов монокристаллов арсенида галлия различного типа проводимости.

Цель статьи. Изучению влияния адсорбции атомов германия на свойства приповерхностного слоя арсенида галлия, а также на структуру энергетического спектра электронов использованы методы фотоэмиссии:

а) спектрального распределения квантового выхода фотоэмиссии $Y(h\nu)$;

б) энергетического распределения фотоэлектронов $N(E)$.

Результат исследований. Исследования проводились в нанометрическом сверхвысоковакуумном фотоэлектронном спектрометре [15] на образцах GaAs (как n-типа, так и p-типа) физические параметры которых представлены: – концентрации носителей тока соответственно для каждого использованного образца n-типа: $5 \cdot 10^{15} (\text{см}^{-3})$, $1,24 \cdot 10^{17} (\text{см}^{-3})$, $3,1 \cdot 10^{18} (\text{см}^{-3})$ и p-типа $1,4 \cdot 10^{19} (\text{см}^{-3})$; подвижности образцов соответственно: $4350 (\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{сек})$, $4000 (\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{сек})$, $3200 (\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{сек})$, $42,3 (\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{сек})$;

удельные сопротивления: $1,16 \cdot 10^{-2} (\text{Ом} \cdot \text{см})$, $3,84 \cdot 10^{-3} (\text{Ом} \cdot \text{см})$, $9,47 \cdot 10^{-3} (\text{Ом} \cdot \text{см})$, $4,6 \cdot 10^{-3} (\text{Ом} \cdot \text{см})$. Ориентация плоскостей контролировалась рентгеноструктурным методом, и отклонения от указанного направления не превышало 3° . У каждого из четырех: 1n – (110); 2n – (110); 3n – (111); 4p – (110) исследованных образцов эмитирующие плоскости шлифовались и химически полировались в смеси $1(\text{H}_2\text{O}_2) : 3(\text{H}_2\text{SO}_4) : 1(\text{H}_2\text{O})$.

Все исследования проведены при различных толщинах покрытия германием поверхности арсенида галлия в одинаковых вакуумных условиях ($p = 2 \cdot 10^{-9} \text{ Торр}$), полученные результаты для всех образцов можно было сравнить между собой. Толщина адсорбированного слоя германия определялась по времени напыления из калиброванного источника. Толщина пленки при одном цикле покрытия составляла $\sim 3 \text{ \AA}$ и учитывая размеры атомов германия (радиус атомов германия составляет $\sim 1,32 \text{ \AA}$) можно считать, что образовавшаяся пленка соответствует монослойному покрытию поверхности арсенида галлия германием.

Калибровку источника напыления проводили интерференционным методом Толанского для измерения толщин испаряемых слоев германия.

а) Спектральное распределение квантового выхода электронов из GaAs при покрытии его поверхности германием.

При всех покрытиях измерялось спектральное распределение квантового выхода фотоэмиссии $Y(h\nu)$. Результаты таких измерений для образца 2n представлены на рис. 1. Видно, что при адсорбции германия на поверхность арсенида галлия квантовый выход увеличивается (кривая 2). Максимальный квантовый выход наблюдается при степенях покрытия $\theta = 2$ монослоя. А при степени покрытия уже $\theta = 3$ монослоя квантовый выход начинает уменьшаться.

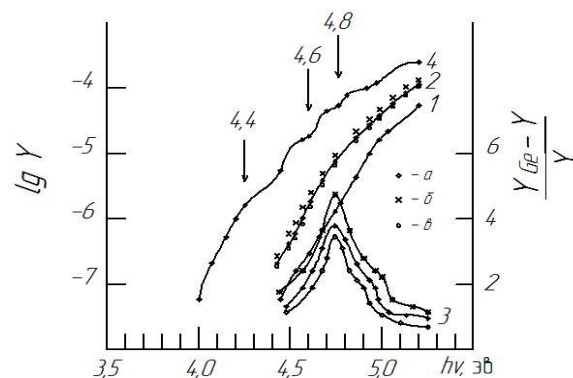


Рис. 1. Спектральное распределение квантового выхода GaAs (образец 2n). 1 – без покрытия Ge; 2 – при покрытии Ge {а) • – 1 монослой; б) x – 2 монослоя; в) * – 3 монослоя}; 4 – спектральное распределение при пократии барием ($\theta = 0,5$ монослоя); 3 – относительное увеличение квантового выхода при покрытии

Структурных особенностей на рассматриваемых кривых не наблюдается, не обнаружено также и заметного изменения длинноволновой границы фотоэмиссии.

Найденное значение порога фотоэмиссии (из экстраполяции $Y^{1/3}$ от $h\nu$) для образца 2п было $h\nu_0 = 4,24$ эВ. Столь незначительным уменьшением фотоэлектронной работы выхода невозможно объяснить наблюдаемое увеличение квантового выхода.

Относительное увеличение квантового выхода $\frac{Y_{Ge-Y}}{Y}$ в зависимости от энергии фотонов (кривые 4, рис. 1.) существенно отличается от соответствующих зависимостей в случае покрытия поверхности GaAsBa и O[16] и имеет избирательный характер. При энергиях фотонов, соответствующим межзонным переходам в ($h\nu = 4,6$ эВ и $h\nu = 4,8$ эВ) наблюдается наибольшее увеличение квантового выхода фотоэмиссии. Такие зависимости имеют место у всех изученных образцов арсенида галлия при покрытии германием.

Избирательное относительное увеличение квантового выхода фотоэмиссии $\frac{Y_{Ge-Y}}{Y}$ при покрытии поверхности GaAs германием показывает, что дипольный механизм уменьшения работы выхода при наличии на поверхности чужеродных атомов в данном случае не имеет места.

При нанесении на покрытые германием поверхности арсенида галлия слоя бария ($\theta = 0,5$ монослоя) появляются структурные особенности (кривая 3, рис. 1) при энергии фотонов: $h\nu = 4,8$ эВ; $h\nu = 4,6$ эВ и $h\nu = 4,4$ эВ, что, как показано [] соответствует оптическим переходам в GaAs. Это позволяет предположить, фотоэмиссия происходит из арсенида галлия.

Для выяснения причины роста квантового выхода $Y(h\nu)$ (кривые 2, рис. 1) при покрытии поверхности арсенида галлия Ge были проведены экспериментальные исследования по изучению распределения фотоэлектронов по энергия у образцов 2п и 4р.

б) Энергетического распределения фотоэлектронов $N(E)$ из GaAs при покрытии его поверхности германием.

Измерения распределения фотоэлектронов по энергиям производилось как для не покрытой, так и для покрытой германием поверхности образцов 2п и 4р (Рис. 2.). Видно, что при всех степенях покрытия θ распределения имеют два максимума, один из которых I соответствует прямому межзонному переходу в арсениде галлия ($E = 4,6$ эВ) и наблюдается также в энергетическом распределении у непокрытого германием образца. Второй максимум II для обоих исследованных образцов расположен на одинаковом энергетическом расстоянии от максимума I. Это энергетическое расстояние меньше энергетического расстояния между максимумами на кривых 4 рис.1. У образца 4р интенсивность максимума II при порывтии

германием $\theta = 2$ значительно больше, чем интенсивность максимума I. У образца 2п различия между интенсивностями максимумов I и II много меньше.

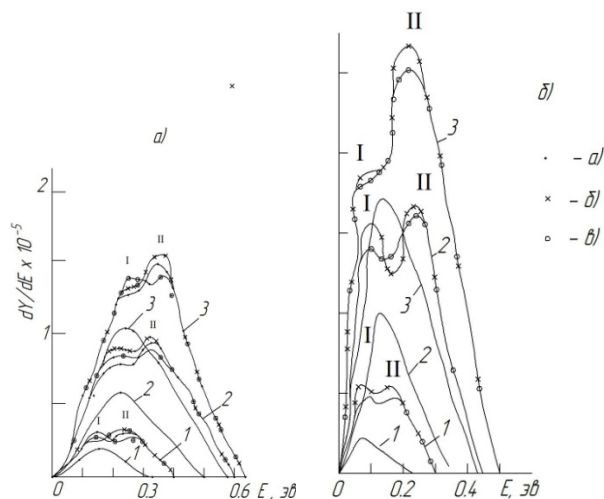


Рис. 2. Распределения фотоэлектронов по энергиям для образцов 2п(а) и 3р(б). Кривые сняты при различных значениях фотонов $h\nu$, эВ: 1 – 4,68; 2 – 4,89; 3 – 4,99 (без покрытия германием), 1' – 4,68; 2' – 4,89; 3' – 4,99 (при пократии германием: {а) • – 1 монослой; б) x – 2 монослоя; в) * – 3 монослоя}

При изменении степени покрытия германием θ интенсивность максимумов I и II изменяется: с увеличением интенсивности максимума II интенсивность максимум I уменьшается. Наибольшая интенсивность максимума II наблюдается при $\theta = 2$ монослоя, но при $\theta = 3$ монослоя интенсивность этого максимума уменьшается, а возрастает интенсивность максимума I.

С изменением энергии $h\nu$ фотонов, как видно из представленных экспериментальных данных (рис. 2.) максимумы I и II смещаются по шкале энергий так, что $\Delta E_{\max} \neq \Delta h\nu$. Это указывает на то, что наблюдаемые электронные переходы являются прямыми. Энергия электронного перехода, соответствующая максимуму II на кривых энергетических распределений, равна 4,7 эВ. Переход с такой энергией для GaAs отсутствует.

Подобного перехода не обнаружено и при исследовании GaAs со сниженной работой выхода посредством нанесения покрытия Ba [17] BaO [18], а также в работах других авторов.

Если допустить, что наблюдаемый переход обусловлен оптическим возбуждением электронов в слое германия, то интенсивность этого перехода, по мере возрастания степени покрытия θ поверхности арсенида галлия германием должна также возрастать. Однако с увеличением степени покрытия θ интенсивность этого электронного перехода уменьшается, как это наблюдается в эксперименте

(рис. 2а и 2б – кривые 3'б и 3'в). Следовательно приписывать этот электронный переход только германию нет оснований.

Авторами в работе [19] было показано значение локального действия электрического поля на локальную электронную структуру твердого тела. Если предположить, что в случае взаимодействия германия с арсенидом галлия происходит аналогичное влияние атомов германия на электронную структуру арсенида галлия, то дополнительный максимум, возможно, и обусловлен таким влиянием.

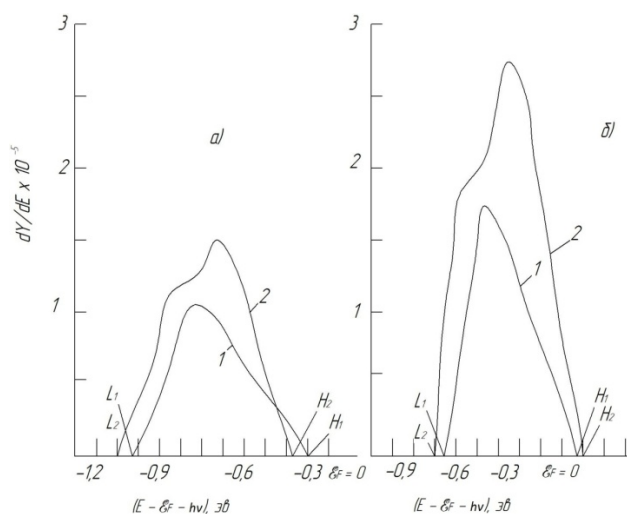


Рис. 3. Смещенные на $h\nu$ энергетические распределения фотоэлектронов из образцов 2n (а) и 4p (б).

Кривые 1 – без покрытия германием; 2 – при покрытии германием. Энергия фотонов $h\nu = 4,99$ эВ

Анализ энергетических распределений, проведенный по методу смещения энергетических распределений на величину энергии фотонов $h\nu$ (рис. 3а. и рис. 3б.), показал, что при адсорбции атомов германия на поверхность монокристаллов арсенида галлия имеет место незначительное уменьшение фотоэлектронной работы выхода. Это уменьшение (рис. 3а.) для образца 2n обусловлено смещением низкоэнергетического края распределения $(E_F - L_2) > (E_F - L_1)$, т.е. обусловлено изменением электронного сродства χ . Для образца 4p наблюдается незначительное смещение высокоэнергетического края ΔH в сторону уровня Ферми E_F , т.е. загиб зон незначительно уменьшается; низкоэнергетический край распределения L_1 смещается так, что $(E_F - L_2) > (E_F - L_1)$, а, следовательно, и для образца GaAs p-

типа при адсорбции на его поверхность германия электронное сродство χ уменьшается.

Энергетические параметры, экспериментально полученные для образцов 2n и 4p из спектральных распределений квантового выхода и энергетических распределений фотоэлектронов, представлены в таблице.

Из представленных в таблице результатов видно, что уменьшение порога фотоэмиссии $h\nu_0$ и термоэлектронной работы выхода ϕ_T у образцов GaAs n-типа при адсорбции атомов Ge на поверхность монокристаллов арсенида галлия обусловлено уменьшением электронного сродства χ . Положение уровня Ферми E_F остается почти без изменения. У образца GaAs p-типа при адсорбции атомов Ge на поверхность монокристаллов арсенида галлия наряду с уменьшением электронного сродства χ , наблюдается незначительное изменение загиба зон ϕ_0 на поверхности электронов GaAs.

Таким образом, причины появления и поведения второго максимума на его поверхность атомов Ge окончательно не выявлена.

Однако наблюдаемое увеличение квантового выхода при энергиях фотонов $h\nu$, соответствующих прямым межзонным переходам в GaAs (рис. 1, кривые 4), и характер поведения максимумов в энергетических распределениях фотоэлектронов при изменении $h\nu$ степени покрытия θ (рис. 2а и 2б.) позволяет предположить, что взаимодействие атомов германия с атомами арсенида галлия приводит к локальному изменению электронной структуры в полупроводнике.

Выводы.

1. Проведено исследование фотоэмиссии из образцов GaAs различного типа проводимости при адсорбции на его поверхность германия. Адсорбция германия на поверхность арсенида галлия приводит к росту квантового выхода $Y(h\nu)$ во всей области изученного спектра энергии фотонов. Этот рост $Y(h\nu)$ невозможно объяснить наблюдаемым уменьшением фотоэлектронной работы выхода ϕ_0 .

Относительное увеличение квантового выхода при покрытии поверхности в GaAs германием носит избирательный характер. Наибольшее относительное увеличение $\frac{Y_{Ge} - Y}{Y}$ наблюдается при энергии фотонов $h\nu$, которая соответствует прямым переходам в GaAs в направлении Σ с энергией 4,6 эВ и переходу $\Gamma_{15v} \rightarrow \Gamma_{15c}$ с энергией 4,8 эВ.

Таблица

№ образца	$h\nu_0$, эВ	ϕ_T , эВ	$(E_F - E_v)_B$, эВ	$(E_F - E_v)_S$, эВ	χ , эВ	ϕ_0 , эВ
2n	4,3	4,13	1,372	0,17	2,90	1,20
2n _{Ge}	4,24	4,06		0,18	2,84	1,19
4p	4,43	4,33	- 0,032	0,10	3,03	- 0,13
4p _{Ge}	4,34	4,23		0,06	2,94	- 0,09

2. В энергетических распределениях фотоэлектронов, наряду с максимумом, соответствующим переходу в GaAs в направлении Σ с энергией 4,6 эВ, наблюдается дополнительный максимум с энергией 4,7 эВ. Этот дополнительный максимум нельзя приписать прямому переходу GaAs, а также переходу в Ge.

3. Изменения термоэлектронной работы выхода ϕ_T при адсорбции германия на поверхность арсенида галлия обусловлено уменьшением электронного сродства χ , а у образца GaAs p-типа при этом наблюдается незначительное уменьшение зон.

4. Взаимодействие германия с арсенидом галлия, возможно, приводит к локальному изменению электронной структуры в GaAs, что, по-видимому, и приводит к появлению дополнительного электронного перехода и стимулирует повышение фотоэмиссии.

В перспективе планируется рассмотреть этот эксперимент более детально с использованием дополнительных оптических методов исследования сути вопроса прямых электронных переходов.

Л и т е р а т у р а

- Ляшенко В. И. Электронные явления на поверхности полупроводников / Ляшенко В. И., Литовченко В. Г., Степко И. И., Стриха В. И., Ляшенко Л. В. – К.: Наукова думка, 1969.–358 с.
- Киселев В. Ф. Поверхностные явления в полупроводниках и диэлектриках / Киселев В. Ф. – М.: Наука, 1971.– 320 с.
- Ржанов А. В. Электронные процессы на поверхности полупроводников /Ржанов А. В. – М.: Наука, 1973. – 268 с.
- Волькенштейн Ф. Ф. Физико-химия поверхности полупроводников/Волькенштейн Ф. Ф. – М.: Наука, 1980.– 345 с.
- J. Scheer, J van Laar The influence of cesium adsorption on surface Fermi level position in gallium arsenide /J. Scheer, J van Laar.– Surf. Sci., 1969, 18 p. 130 – 139.
- G. Q.Gobely, F. G. Allen Photoelectric Properties of Cleaved GaAs, GaSb, InAs and InSb Comparison with Si and Ge / G. Q.Gobely, F. G. Allen – Phys. Rev. 1965. 137. p. A245 – A249.
- Кремков М. В. Корпускулярная низкоэнергетическая диагностика поверхности твердого тела / Кремков М. В. – Академия наук Узбекской ССР. Институт электроники имени У. А. Арифова; Ташкент: изд-во «ФАН» Узбекской ССР, 1986.– с.164.
8. L. W. James, J. L. Mool, Fotoemisiya from GaAs of p-type at adsorption of Cs and O / W. James, J. L. Mool – Phys. Rev., 1969. 183. p 740 – 745.
- Eden R. C., Mool J. L., Spicer W. E. Photoemissive properties of p-type gallium arsenide in the adsorption of cesium and oxygen/ Eden R. C., Mool J. L., Spicer W. E. – Phys. Rev. Lett., 1969.– 18. p 597 – 600.
- J. Scheer, J van Laar Effect of Cesium and Oxygen on the Threshold of Photoemission from the Surface of Gallium Arsenide / J. Scheer, J van Laar – Sol. St. Comm., 1965. 3 p. 189 – 194.
- H. Sonnenberg Photocathodes of gallium arsenide with negative electron affinity / H. Sonnenberg – Appl. Phys. Lett., 1970. 16. p. 245 – 248.
- Fischer T. E. Determination of Semiconductor Surface properties by means of photoelectric emission / Fischer T. E. – North-Holland Publishing Co., Amsterdam, Surface Science, 1969, 13. p. 30 – 52.
- Sommer A. H. Photoemitters with negative electron affinity / Sommer A. H. – J. Appl. Phys., 1972. 42 p. 2158 – 2164/
- Schade H., Nelson H., Kressel H. High efficiency of emission from GaAs photocathodes doped with Ge / Schade H., Nelson H., Kressel H. – Appl. Phys. Lett., 1971. 18. p. 121 – 126.
- Кулышев А. М., Черникова И. Д., Черников Н. Г. Нанометрический корпускулярный фотоэлектронный спектрометр / Кулышев А. М., Черникова И. Д., Черников Н. Г. – Вісник СХУ ім. В. Даля, сб. наук. праць. Северодонецьк: вид-во СХУ ім. В. Даля, №5(222) 2015. – с. 40 – 45.
- Бова А. Р., Волошин М. А., Латиш О. Б. и др. Влияние структурных изменений на поверхности на энергетический спектр электронов в арсениде галлия / Бова А. Р., Волошин М. А., Латиш О. Б., Черникова И. Д., Черников Н. Г. – Вісник СХУ ім. В. Даля, сб. наук. праць. Луганськ: вид-во СХУ ім. В. Даля, №12(154), ч. 2., 2010. – с. 40 – 45.
- Кормилицина Е. В., Черникова И. Д. Фотоэмиссионная спектроскопия из поверхности GaAs / Кормилицина Е. В., Черникова И. Д. – Матеріали XVIII міжнародної науково-техн. конф., м. Северодонецьк 17 – 18 квітня 2015 р., ч. 2.– с. 81 –84.
- Кулышев А. М., Черникова И. Д., Черников Н. Г. Влияние состояния поверхности полупроводников на работу выхода фотодетекторов./ Кулышев А. М., Черникова И. Д., Черников Н. Г. – Вісник СХУ ім. В. Даля, сб. наук. праць. Луганськ: вид-во СХУ ім. В. Даля, №2(226), 2016. – с. 112 – 123.
- Bergstresser T. K., Rubloff S. W. The effect of germanium impurities on the emission properties of p-type gallium arsenide / Bergstresser T. K., Rubloff S. W. – Phys. Rev. Lett., 1973. 30, p. 794 – 799

R e f e r e n c e s

- Lyashenko V. I. Elektronnyye yavleniya na poverkhnosti poluprovodnikov / Lyashenko V. I., Litovchenko V. G., Stepko I. I., Strikha V. I., Lyashenko L. V. – K.: Naukova dumka, 1969.–358 s
- Kiselev V. F. Poverkhnostnyye yavleniya v poluprovodnikakh i dielektrikakh / Kiselev V. F. – M.: Nauka, 1971.– 320 s
- Rzhanov A. V. Elektronnyye protsessy na poverkhnosti poluprovodnikov /Rzhanov A. V. – M.: Nauka, 1973. – 268 s.
- Vol'kenshteyn F. F. Fiziko-khimiya poverkhnosti poluprovodnikov/Vol'kenshteyn F. F. – M.: Nauka, 1980.– 345 s.
- J. Scheer, J van Laar The influence of cesium adsorption on surface Fermi level position in gallium arsenide /J. Scheer, J van Laar.– Surf. Sci., 1969, 18 p. 130 – 139.
- G. Q.Gobely, F. G. Allen Photoelectric Properties of Cleaved GaAs, GaSb, InAs and InSb Comparison with Si and Ge / G. Q.Gobely, F. G. Allen – Phys. Rev. 1965. 137. p. A245 – A249.
- Kremkov M. V. Korpuskulyarnaya nizkoenergeticheskaya diagnostika poverkhnosti tverdogo tela / Kremkov M. V. – Akademiya nauk Uzbekskoy SSR. Institut elektroniki

- imeni U. A Arifova; Tashkent: izd-vo «FAN» Uzbekskoy SSR, 1986.– s.164.
8. L. W. James, J. L. Mool, Fotoemisiya from GaAs of p-type at adsorption of Cs and O / W. James, J. L. Mool – Phys. Rev., 1969. 183. p 740 – 745.
 9. Eden R. C., Mool J. L., Spicer W. E. Photoemissive properties of p-type gallium arsenide in the adsorption of cesium and oxygen/ Eden R. C., Mool J. L., Spicer W. E. – Phys. Rev. Lett., 1969.– 18. p 597 – 600.
 10. J. Scheer, J van Laar Effect of Cesium and Oxygen on the Threshold of Photoemission from the Surface of Gallium Arsenide / J. Scheer, J van Laar – Sol. St. Comm., 1965. 3 p. 189 – 194.
 11. H. Sonnenberg Photocathodes of gallium arsenide with negative electron affinity / H. Sonnenberg - Appl. Phys. Lett., 1970. 16. p. 245 - 248.
 12. Fischer, T. E., Determination of Semiconductor Properties, Fischer, T. E., North-Holland Publishing Co., Emgsterdam, Surface Science, 1969, p. 30 - 52.
 13. Sommer A. H. Photoemitters with negative electron affinity / Sommer A. H. - J. Appl. Phys., 1972. 42 p. 2158 - 2164 /
 14. Schade H., Nelson H., Kressel H. High efficiency of emission from GaAs photocathodes doped with Ge / Schade H., Nelson H., Kressel H. - Appl. Phys. Lett., 1971. 18. p. 121-126.
 15. Kulyshv AM, Chernikova ID, Chernikov NG The nanometric corpuscular photoelectronic spectrometer / Kulyshv AM, Chernikova ID, Chernikov NG - Вісник ЧУ ім. В. Даля, sb. sciences. prac. Сєверодонецьк: view of SNU ім. В. Даля, №5 (222) 2015. - с. 40 - 45.
 16. Bova AR, Voloshin MA, Latish OB, et al. Influence of structural changes on the surface on the energy spectrum of electrons in gallium arsenide / Bova AR, Voloshin MA, Latish O. B., Chernikova I. D., Chernikov N. G. - Вісник ЧУ ім. В. Даля, sb. sciences. prac. Lugans'k: view of SNU ім. В. Даля, №12 (154), ч. 2., 2010. - с. 40 - 45.
 17. Kormilitsina EV, Chernikova ID Photoemission spectroscopy from the GaAs surface / Kormilitsina EV, Chernikova ID - Material of the XVIII international scientific and technical. Conf., м. Сєверодонецьк 17 - 18 квітня 2015 р., ч. 2.- с. 81 -84.
 18. Kulyshv AM, Chernikova ID, Chernikov NG Influence of the state of the surface of semiconductors on the work function of photodetectors. / Kulyshv AM, Chernikova ID, Chernikov NG - Вісник ЧУ ім. В. Даля, sb. sciences. prac. Lugans'k: view of SNU ім. В. Даля, №2 (226), 2016. - с. 112 - 123.
 19. Bergstresser T. K., Rublof S. W. The effect of germanium impurities on the emission properties of p-type gallium arsenide / Bergstresser T. K., Rublof S. W. - Phys. Rev. Lett., 1973. 30, p. 794 – 79.

Н.Г. Черніков, І.Д. Чернікова Дослідження адсорбції германію на поверхню арсеніду галію фотоemisійним методом.

У статті розглянуто вплив адсорбованих шарів германію на поверхні монокристалів арсеніду галію різного типу провідності фотоemisійним методом в надвисокому вакуумі. Вивчено питання впливу адсорбованих шарів на електронну структуру підкладки, а так само яким чином впливають атоми германію на зміну роботи виходу фотоелектронів з монокристалів арсеніду галію: за рахунок електронної спорідненості чи загибун зон.

Ключові слова: напівпровідник, поверхня твердого тіла, фотон, енергія фотонів, адсорбція, підкладка, квантовий вихід, розподіл фотоелектронів по енергіях, вакуум.

N.G. Chernikov, I.D. Chernikova Investigation of adsorption of germanium on the surface of gallium arsenide by the photoemission method.

In the article the influence of adsorbed layers of germanium on the surface of single crystals of gallium arsenide of different types of conductivity by the photoemission method in a superhigh vacuum is considered. The influence of adsorbed layers on the electronic structure of the substrate has been studied, as well as how the germanium atoms influence the change of the work of the output of photoelectrons from gallium arsenide single crystals: due to electron kinship or bending of the zones.

Particular attention was paid to the effect of adsorbed germanium layers on the interband electronic transitions in gallium arsenide single crystals. An additional interband transition, which does not correspond to GaAs, is found.

Key words: semiconductor, solid surface, photon, photon energy, adsorption, substrate, quantum yield, photoelectron distribution by energies, vacuum.

Черніков Микола Григорійович – к.фіз.-мат.н., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк).
chernikov_n_g@ukr.net

Чернікова Ірина Дем'янівна – старший викладач кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк).
chernikova_i_d@ukr.net

Рецензент: д.т.н., проф. **Харламов Ю.О.**

Стаття подана 28.09 2017

УДК 621.9.048

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ

Шумакова Т.А., Николаенко А.П., Романченко А.В., Таванюк Т.Я.

INCREASE OF PERFORMANCE OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF VIBRATION TREATMENT OF DETAILS

Shumakova T.A., Nikolaenko A.P., Romanchenko A.V., Tavanyuk T.Y.

В статье проведен анализ известных классификаторов деталей, подлежащих обработке на станках без жесткой кинематической связи. Приведены рекомендации по выбору параметров процесса вибрационной обработки в зависимости от размеров, формы, материала и исходного качества поверхностей деталей. На основе приведенных рекомендаций разработан технологический процесс обработки сложнопрофильных деталей и приведены рекомендации по выбору рациональной формы инструмента - единичных абразивных гранул.

Ключевые слова: вибрационная обработка, технологический процесс, сложнопрофильная деталь, абразивная гранула, шероховатость поверхности, производительность.

Ведение. На сегодняшний день развитие прогрессивных технологий литья,ковки,штамповки, порошковой металлургии, обработки деталей на токарных и других обрабатывающих центрах дает возможность изготавливать детали весьма сложной конфигурации с минимальными припусками на финишную (отделочную) обработку. В настоящее время существует значительное многообразие методов финишной обработки, таких, например, как: магнитно-абразивная обработка; обработка в среде свободных абразивов; центробежно-ротационная, турбоабразивная и струйно-абразивная обработки. Ярким и одним из наиболее производительных примеров обработки сложнопрофильных деталей в среде свободных абразивов является вибрационная обработка (ВиО) деталей в навал. Данный метод обработки обладает высокой степенью универсальности и широкими технологическими возможностями.

Постановка проблемы. Технология ВиО обеспечивает обработку деталей широкой номенклатуры, таких, например, как: детали машиностроения (рис. 1, а), авиапромышленности и турбиностроения (рис. 1, б); длинномерные детали

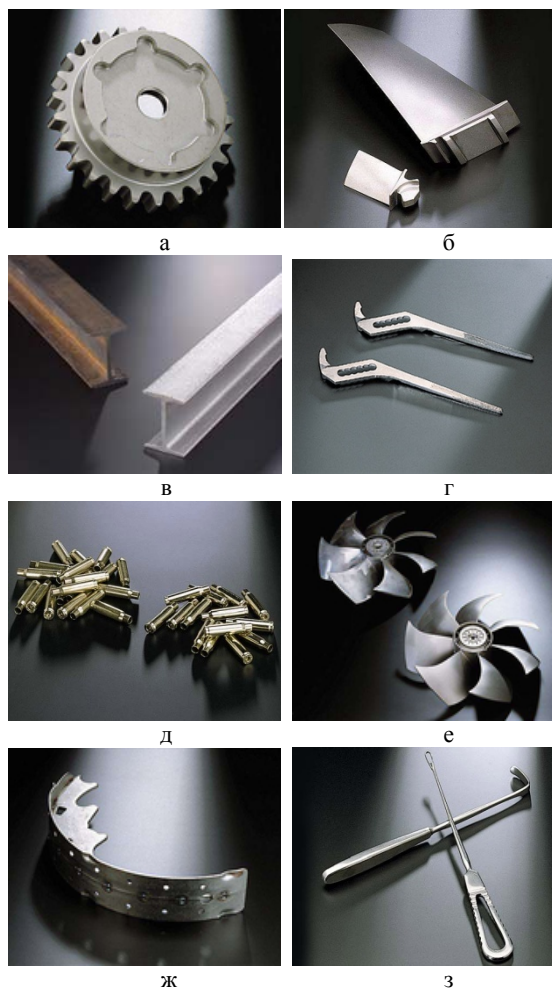


Рис. 1. Примеры деталей, обрабатываемых методом ВиО:

- а – рулевое колесо; б – лопасти турбин; в – двутаптры;
г – заготовки клещей; д – патронные гильзы;
е – крыльчатки турбин; ж – тормозные колодки;
з – хирургические крючки

из профилей и стального листа (рис. 1, в); инструментальная промышленность (рис. 1, г); оружейные детали и патронные гильзы (рис. 1, д); отливки (рис. 1, е); штамповки (рис. 1, ж); хирургический инструмент (рис. 1, з).

На сегодняшний день ВиО позволяет осуществить широкий ряд операций, а именно: снятие заусенцев и удаление острых кромок; шлифование и полирование; подготовка поверхностей деталей под нанесение покрытий; поверхностно пластическое деформирование; стабилизация остаточных напряжений.

Способ обработки состоит в том, что обрабатываемые детали и рабочая среда (состоящая из абразивных гранул и рабочих жидкостей, чаще всего – химически активных растворов) в соответствующей пропорции [1] помещаются в подпружиненный контейнер вибродвижущего станка (рис. 2).

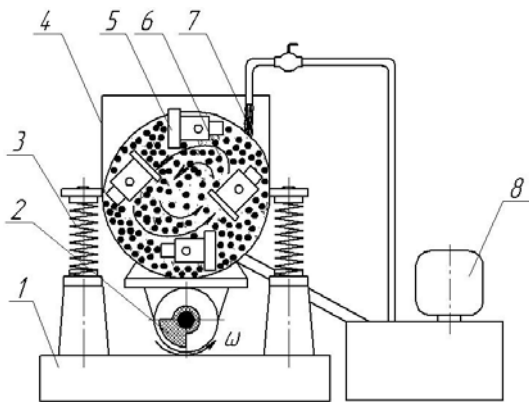


Рис. 2. Схема процесса объемной ВиО, где: 1 – основание; 2 – дебалансный вибровозбудитель; 3 – упругие элементы; 4 – U-образный контейнер; 5 – обрабатываемая деталь; 6 – рабочая среда; 7 – технологическая жидкость; 8 – помпа; 9 – шланг для слива рабочего раствора в бак отстойник; ω – частота колебаний контейнера

Под влиянием колебаний обрабатываемые детали и рабочая среда интенсивно перемещаются. При этом, по мнению авторов [2, 3, 4], наблюдается два основных вида движений рабочей среды: осциллирующее (частота этого движения соответствует частоте колебаний контейнера станка) и циркуляционное (медленное вращение всей среды относительно продольной оси контейнера).

В результате стохастических относительных движений блуждающих абразивных гранул, сопровождающихся ударным взаимодействием абразивных гранул между собой и с обрабатываемыми деталями, протекают процессы, с одной стороны, съема с деталей металла и его окислов и формирование нового поверхностного слоя, а с другой стороны, наблюдается износ абразивных гранул на протяжении всего времени обработки [3, 4].

Съем металла и его окислов происходит, как уже указывалось выше, в результате последовательного нанесения на поверхность

обрабатываемых деталей множества микроударов гранулами рабочей среды при их соударении с деталями и при их взаимном проскальзывании под воздействием силовых импульсов, передаваемых рабочей среде от вибровозбудителя вибродвижущего станка [5]. В результате этого на поверхности детали образуются бороздки, а при прямых соударениях гранул и детали – лунки, совокупность которых и определяет объем снимаемого металла, микрорельеф и физико-механические свойства поверхности [3, 4, 5].

Перспективность и эффективность данного метода обработки деталей без жесткой кинематической связи внавал доказывает необходимость его дальнейшего исследования.

Анализ исследований и публикаций. Один из путей повышения производительности технологических процессов ВиО – деление обрабатываемых деталей, на классификационные группы. Данное деление осуществляется на основе классификационных признаков, что в дальнейшем позволяет обрабатывать схожие детали по единым групповым технологическим процессам.

Авторами работы [6] в качестве классификационных признаков для деталей общемашиностроительных предприятий были выделены следующие: геометрическая форма детали; конструктивная характеристика отдельных элементов детали; взаимное расположение элементов детали; параметрический признак; наименование детали; выполняемая деталью функция. Данный классификатор позволяет при составлении групповых технологических процессов классифицировать обрабатываемые детали по ряду признаков с определением их класса, подкласса, группы и вида. Положительной чертой данного классификатора является то, что с его помощью можно получить полную характеристику формы обрабатываемой детали (классификатор разделен на множество этапов), что существенно облегчает создание типовых технологических процессов, но не способствует выбору оборудования и инструмента, в том числе без жесткой кинематической связи, применяемого при ВиО деталей.

Существует ряд работ [1, 4, 5, 7, 8], в которых авторы приводят классификаторы деталей, подвергаемых обработке на станках без жесткой кинематической связи, в частности и для ВиО. Из анализа этих работ видно, что многие авторы все детали подвергаемые ВиО разделяют по следующим признакам: размер, форма, масса, материал, жесткость, исходное состояние поверхностей, детали и количество одновременно обрабатываемых деталей. Рассмотрим каждый из перечисленных признаков подробнее.

Размер детали. Так авторы работы [1] выделяют следующие группы: до 40 мм; от 40 до 90 мм; от 90 до 180 мм; свыше 180 мм. Т.е. авторы не рассматривали обработку деталей менее 40 мм (мелкие детали) и более 180 мм (крупногабаритные

детали), что значительно сократило диапазон возможностей ВиО. Однако, авторы [7] приводят другую классификацию, в основу которой положено разделение на две группы - мелкие детали (от 0 до 20 мм) и крупные (от 20 до 640 мм). При этом каждая из групп подразделена на подгруппы. Так первая группа включает в себя: 1-ю подгруппу с размерами деталей от 0 до 2,5 мм; 2-ю подгруппу - от 2,5 до 5 мм; 3-ю подгруппу - от 5 до 10 мм; 4-ю подгруппу - от 10 до 20 мм. Вторая группа разбивается на 5 подгрупп: от 20 до 40 мм; от 40 до 80 мм; от 80 до 160 мм; от 160 до 320 мм; от 320 до 640 мм. Достоинством данной классификации является то, что она более подробно рассматривает мелкие детали (до 40 мм), которые составляют значительную часть от общего объема деталей, подвергаемых ВиО. В работе [8] проведен ряд исследований по обработке крупногабаритных изделий. Автором [8] было предложено разделение деталей на группы по габаритным размерам: длина (500-1200 мм), ширина (150-500 мм), толщина (5-150 мм), однако в работе не приведены результаты исследований учитывающих массу и физико-механические характеристики обрабатываемых изделий.

Масса детали. По результатам исследований, приведенным в [5] вибрационным методом обрабатывают детали массой от 50 до 3000 г. Авторы работы [1] предлагают следующую разбивку деталей на группы согласно их массы:

- 1-я группа - до 50 гр.;
- 2-я группа - от 50 до 250 гр.;
- 3-я группа - от 250 до 750 гр.;
- 4-я группа - от 750 до 1500 гр.;
- 5-я группа - от 1500 до 3000 гр. и далее.

Форма детали. Как известно, форма деталей определяет движение общей массы загрузки и равномерность обработки ее поверхностей [5]. Так как детали малой жесткости могут быть в процессе обработки деформированы, а детали особо сложной формы могут сцепляться друг с другом, образуя общий ком, детали могут иметь затененные места, щели, отверстия, пазы в результате доступ абразивных гранул затруднен, и такие детали обрабатываются хуже, чем детали с открытыми поверхностями. В результате при разработке классификации с разбивкой деталей на группы и учетом всех перечисленных выше особенностей, согласно [5] было получено следующее:

1-я группа - детали простой геометрической формы, образованные сочетанием цилиндрических и призматических поверхностей, с радиусом сопряжений до 10 мм;

2-я группа - детали с затененными местами в виде углов, ниш, карманов и т.п., к которым доступ абразивных гранул затруднен, но возможен при выполнении определенных условий, например, при уменьшении грануляции гранул или при использовании абразивных гранул с наличием

большого количества выступающих частей, например, гранул в форме П6 [9] или П12 [10];

3-я группа - детали сложной формы с криволинейными поверхностями, внутренними полостями, отверстиями, пазами, требующими обработки при практически невозможном доступе абразивных гранул к обрабатываемым поверхностям.

Недостатком такой классификации изделий, является отсутствие взаимосвязи между технологией ВиОи физико-механическими свойствами материала детали. Также отсутствует информация о количестве технологических переходов, которые, с учетом исходного и требуемого состояния поверхности, необходимо выполнить для достижения необходимого качества поверхностей деталей.

В работе [4] при разработке классификатора деталей, подвергаемых ВиО была осуществлена попытка связать такие признаки как: форма поверхностей, жесткость и масса обрабатываемых деталей. В результате автором [4] была предложена следующая классификация:

1-я группа - детали простой формы с обработкой по наружной поверхности и детали с отверстиями, пазами и полостями, не подлежащими обработке;

2-я группа - детали с отверстиями, пазами и полостями, требующими обработки;

3-я группа - тонкостенные детали и детали сложной формы.

Каждая из указанных групп разбита на четыре размерные подгруппы.

- крупные детали – с наибольшим габаритным размером от 100 до 300 мм и массой до 5 кг – подгруппа К;

- средние детали - с наибольшим габаритным размером от 30 до 100 мм и массой до 1 кг – подгруппа С;

- мелкие детали - с наибольшим габаритным размером от 10 до 30 мм и массой до 200 г – подгруппа М;

- очень мелкие детали - с наибольшим габаритным размером от 10 мм и имеющие любую массу – подгруппа ОМ.

Данная классификация достаточно удобна и в отличие от вышеперечисленных наиболее применима в производственной практике, однако не учитывает материала деталей и исходного состояния поверхностей заготовок, подвергаемых ВиО.

Исходное состояние поверхностей. Одним из факторов, влияющих на процесс ВиО, является исходное состояние поверхностного слоя заготовки, которое непосредственно зависит от вида предшествующей обработки (литье, горячая штамповка, холодная штамповка, обработка резанием, шлифование, прессование и др.). Вид предшествующей операции влияет на прочность, величину и характер ликвидов, а, следовательно, и трудоемкость их удаления. Исходное состояние

поверхносного слоя заготовки определяет вид и количество необходимых для выполнения операции ВиО переходов и режимы их выполнения. Данному вопросу уделено значительное внимание в работах [1, 3, 5, 7, 8], и в данной статье он не рассматривается.

Материал детали. Одним из факторов, влияющих на ВиО, является материал детали, от которого зависит вид применяемых при обработке абразивных гранул (зернистость абразивной составляющей и вид связки).

Свободными абразивами обрабатываются любые заготовки, полученные всеми видами литья (в землю, в кокиль, оболочку, под давлением), ковкой, объемной и листовой штамповкой, детали после лезвийной обработки и т.д., выполненные из:

- всех марок сталей, в том числе нержавеющей;
- всех цветных металлов и их сплавов;
- керамики;
- пластмасс;
- твердых сплавов и тугоплавких металлов;
- камня;
- стекла;
- дерева.

Приведенная автором [7] классификация материалов деталей, обрабатываемых методами отделочно-зачистной обработки, достаточно широко рассматривает данный вопрос. При этом автор [7] приводит следующие рекомендации по выбору инструмента:

1. Абразивные гранулы должны были обладать высокой прочностью, твердостью и износостойкостью.

2. Для обеспечения чистоты обрабатываемых поверхностей зернистость абразивных гранул не должна превышать 3-5, т.е. качество получаемых после ВиО поверхностей должно соответствовать требованиям, предъявляемым к шлифовальным и полировальным поверхностям.

Наилучшим материалом, отвечающим этим требованиям, по мнению [7], являлись абразивные гранулы из боя шарошлифовальных кругов зернистостью 3-5 и твердостью связки ВТ-ЧТ-2. Однако данные рекомендации не применимы для обработки сложнопрофильных деталей, поскольку гранулы данной формы не имеют выступающих поверхностей и не могут контактировать с поверхностями уступов, пазов и затемненными местами деталей. Кроме этого, нет рекомендаций по принятию технологических решений по выбору того или иного вида инструмента для ВиО в зависимости от материала деталей, и поэтому данные рекомендации не получили применения в производственной практике.

Из анализа приведенных выше классификаторов деталей, подвергаемых ВиО, можно сделать вывод, что к сожалению ни в одной из работ нет рекомендаций по применению данных классификаторов в производственной практике.

Также ни в одной из работ не прослеживается взаимосвязь между признаками, характеризующими обрабатываемые детали и решением технологических задач рационального выбора оборудования, оснастки, абразивных гранул, химически активного раствора, времени и режимов обработки.

Целью исследования является повышение производительности технологических процессов вибрационной обработки сложнопрофильных деталей. Для решения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выявить взаимосвязь между признаками, характеризующими детали обрабатываемые вибрационным методом, и параметрами вибрационного процесса.

2. Разработать рекомендаций по принятию технологических решений по выбору оборудования, оснастки, инструмента, времени и режимов обработки деталей.

3. Рассмотреть, на примере обработки различных по форме массе, исходному состоянию поверхностей и материалу деталей, возможность использования предложенного классификатора и рекомендаций при написании группового технологического процесса вибрационной обработки.

Результаты исследования. При написании индивидуальных и групповых технологических процессов ВиО деталей инженер-технолог сталкивается с решением ряда задач, таких, например, как выбор модели станка, вида технологической оснастки, инструмента, режимов обработки. Рекомендации по решению этих задач и принятию рациональных технологических решений, позволяющих достичь повышения производительности процессов ВиО приведены ниже.

1. Выбор оборудования. Модель вибрационного станка выбирается в зависимости от размера с количества одновременно обрабатываемых деталей. В промышленности наиболее распространены станки с U-образной (объемом от 0,1 л до 6650 л) и тороэдажной (от 5 л до 250 л) формой контейнера. Классификация, компании производители и характеристики наиболее распространенных станков подробно описаны в [11]. Так для обработки мелких деталей размером от 0 до 40 мм отдают предпочтение станкам, с объемом контейнера до 20 л моделей: Vibrochimica (Италия) MINOX 19 (объем контейнера 19 л) [13], WALTHER TROWAL (Германия) TFM 49/21 (15 л) [14]; RÖSLER (Германия) 180/530 TE-30 PU, 180/600 TE-30 PU с объемом контейнера 15 л 230/530 TE-30 PU, объемом 20 л [15].

Для обработки деталей средних размеров от 40 до 120 мм станкам с объемом контейнера до 100 л моделей: Vibrochimica MINOX 40 и VB 122 (объем контейнера 40 л и 65 л, соответственно), VBR 122 (65 л), VBR 125 (80 л) [13];

WALTHERTROWALTFM 58/32 (42 л), TFM 83/37 (80 л)[14]; RÖSLER 300/600 TE-15 (30) PU (65 л).

Для крупных и особо крупных деталей станки объемом от 100 до 3500 л. Наиболее распространенными среди них являются станки:

- Vibrochimisсерии VBi VBR, объем контейнера от 100 до 970 л[13];

- WALTHERTROWAL серий TFM [14] и TMV[16] объем контейнера от 165 до 3300 л;

- RÖSLER серий TS-Ди TE, объем контейнера от 115 до 2600 л [15].

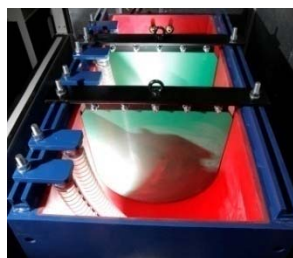
В отдельную группу можно выделить станки для обработки длинномерных и громоздких деталей, загружаемых в вибрационный станок не одновременно, а по очереди, и при обработке не соударяющихся друг с другом для предотвращения их повреждений. Примером таких станков являются фирмы: Vibrochimisсерии VBL с объемом контейнера от 600 до 1950 л, технические характеристики которых представлены в [16] и RÖSLER серий TS и TU, объемом от 30 до 6650 л [15].

Не зависимо от модели при выборе станка в зависимости от размеров детали необходимо придерживаться следующих рекомендаций[5]:

- рабочий объем загрузки контейнера не должен превышать 3/4 от его общего объема;

- объем деталей не должен превышать 1/3 от рабочего объема контейнера.

2. *Выбор технологической оснастки.* При выборе технологической оснастки для выполнения ВиО необходимо, в первую очередь, учесть такие признаки деталей как: размер, форма и материал деталей. В производственной практике встречаются случаи, когда в контейнере одного вибрационного станка производится одновременная обработка различных по материалу, типоразмеру и форме деталей. В таких случаях во избежание перемешивания деталей различных групп, повреждения мелких деталей более крупными, сцепления друг с другом деталей сложной геометрической формы применяют специальные перегородки, разделяющие объем контейнера на сектора (рис. 3).



а



б

Рис. 3. Пример использования перегородок для разделения рабочей среды в контейнерах вибрационных станков: а – U-образная форма контейнера; б – тороидальная форма контейнера

При обработке мелких плоских деталей, для предотвращения налипания таких деталей на стенки контейнера автором работы [12] было предложено использование в качестве технологического оснащения специальной резиново-абразивной футеровки контейнера.

3. *Выбор инструмента для ВиО деталей.* Как уже указывалось выше, рабочая среда, выступающая в качестве инструмента для ВиО состоит из единичных абразивных гранул и химически активного раствора. На выбор вида рабочей среды наибольшее влияние оказывают: форма, материал, и исходное состояние поверхности и требования, предъявляемые к качеству поверхностей детали после ВиО.

При выборе вида абразивных гранул в зависимости от формы обрабатываемой детали следует:

1. Для обработки деталей простой геометрической формы, образованные сочетанием цилиндрических и призматических поверхностей выбирать гранулы произвольной формы, например, бой шарошлифовальных кругов АН-2, или гранулы в форме шара или "линзы" [17, 18] (рис. 4, а).

2. Для обработки деталей с затененными местами в виде углов, ниш, карманов - гранулы в форме конусов, конусов с радиусами у вершине, цилиндров, скошенных цилиндров, призм [17, 18] (рис. 4, б).

3. Детали сложной формы с криволинейными поверхностями, внутренними полостями, отверстиями, пазами отдавать предпочтение гранулам, имеющим большое количество выступающих частей, например в форме пирамид, пирамид с радиусными гранями, призм с усеченными гранями, скошенной призмы, звездочек или гранулам, имеющим в основании невыпуклый шестиугольник П6 [9] или П12 [10] (рис. 4, в).



а

б



П6



П12

в

Рис. 4. Примеры форм абразивных гранул для обработки: а – деталей простых форм; б – деталей с затененными местами; в – сложнопрофильных деталей

4. Для выполнения операций полирования и упрочнения поверхностного слоя деталей компания WALTHER TROWAL [18] рекомендует использовать стальные гранулы в форме шариков, спутников и валиков, представленные на рисунке 5.



Рис. 5. Пример гранул, используемых для полировки деталей ВиО

При выборе гранул в зависимости от обрабатываемого материала необходимо придерживаться следующих рекомендаций:

1. Для деталей выполненных из стали с сплавов следует отдавать предпочтение гранулам на керамическом и эпоксидном связующем и в зависимости от вида операции (очистка, удаление заусенцев, шлифование) выбирать гранулы с большей или меньшей зернистостью абразивного наполнителя. В данном случае справедливы рекомендации по применению абразивных инструментов для станков с жесткой кинематической связью [19, 22, 23].

2. Для деталей, выполненных из мягких цветных металлов и сплавов, например, алюминия или меди, получаемых литье под давлением правильным будет выбор гранул на основе пластика. Они выбираются в соответствии с требуемыми характеристиками шлифования и желаемой шероховатости поверхности и отличаются друг от друга по цвету и зернистости. Так, например, в каталоге производителя [17, 18]: для более грубых операций очистки и шлифовки производители рекомендуют гранулы черного, коричневого, серого, синего, фиолетового и красного цветов, для средней шлифовки - зеленые, оранжевые, розовые, желтые гранулы, а для тонкого шлифования и полирования - белые и прозрачные гранулы.

Состав химически активного раствора, применяемого для ВиО деталей зависит от материала из которого они изготовлены и от требований, предъявляемых к качеству поверхностного слоя детали после обработки (вид поверхности матовая или глянцевая).

ВиО можно проводить сухим способом или с применением жидкой среды (химически активного раствора). При сухом способе накапливающуюся в контейнере абразивную пыль необходимо периодически удалять механически или продувкой сжатым воздухом. Обработка в жидкой среде [20, 21] облегчает удаление продуктов абразивного износа и уменьшает продолжительность обработки. В случае использования химически активных растворов частота колебаний контейнера должна

быть выше, чем при сухом методе обработки. Раствора в контейнер подают периодически или непрерывно. В последнем случае обеспечивается более высокое качество и интенсивность обработки деталей. Такими жидкостями при обработке стальных деталей являются 2-5%-ный раствор кальцинированной соды, а также смесь следующего состава: мыло - 15 г/л, кальцинированная сода - 5 г/л, олеиновая кислота - 5 г/л [20]. При обработке деталей из цветных металлов автор работы [5] рекомендует применять: кальцинированная сода - 20 г/л, триэтанолламин - 0,1 г/л; олеиновая кислота - 0,3 г/л. Протекающий через контейнер раствор отстаивают и после сепарирования и отделения отходов износа абразивных гранул возвращают в контейнер станка.

Рекомендации по применению готовых растворов для выполнения операций очистки, шлифования и полирования деталей, выполненных из углеродистых и нержавеющей сталей и ее сплавов, а также деталей из меди и сплавов на ее основе, алюминиевый, цинковых и магниевых сплавов приведены в каталогах [17, 18].

4. *Выбор режимов обработки.* Режимы работы станка для ВиО деталей выбираются в зависимости от материала, исходного состояния поверхностей и требований, предъявляемых к качеству поверхностей обрабатываемых деталей. Для углеродистых, легированных и нержавеющей сталей большинство авторов [1, 4, 5, 8, 20] рекомендует применять режимы:

- для операций очистки, удаления окалины, заусенцев и скругления острых кромок амплитуду колебаний контейнера - от 3,5 до 5 мм, частоту колебаний - от 30 до 50 Гц;
- для операций виброшлифования - амплитуду от 1 до 3,5 мм и частоту - от 25 до 34 Гц;
- для вибрационного упрочнения - амплитуду от 3 до 3,2 мм, частоту колебаний - 54-67 Гц;
- для виброполирования - амплитуду от 2,5 до 3,2 мм, частоту колебаний - 54-67 Гц.

Время обработки партии заготовок зависит от исходного состояния поверхности и составляет от 30 мин. до 6 ч (устанавливается опытным путем в зависимости от состояния исходной поверхности и требований к обрабатываемым деталям).

Автор работы [20] для виброупрочнения твердосплавных изделий рекомендует амплитуду колебаний контейнера, равную 2-3 мм и частоту 25 Гц. Время виброабразивной обработки, по мнению автора [20], должно составлять 2-3 ч для сплавов типов ВК6, ВК8 (нижний предел) и ВК15 (верхний предел), продолжительность обработки соответственно равной 3-4 и 1,5-2 ч.

Рассмотрим возможность использования приведенных рекомендаций на примере деталей сложной конфигурации (рис. 6), поступивших на операции очистки, шлифования, удаления заусенцев, округления острых кромок, повышения качества поверхностей.



Рис. 6. Внешний вид исследуемых деталей доВиО:
а – рычаг; б – кронштейн

Исследуемые детали имели сложную геометрическую форму и были выполнены из различных материалов. Характеристики исследуемых деталей приведены в таблице 1. Ко всем деталям, поступившим на операции вибрационной обработки, предъявлялись требования округления острых кромок до $R \geq 0,3$ мм, где R – радиус округления; получения однородных матовых поверхностей деталей; снижения шероховатости поверхности до $Ra = 6,3$ мкм.

Таблица 1

Характеристика исследуемых деталей		
Наименование детали	Материал	Состояние поверхности
Рычаг	Сталь 20	Штамповка
Кронштейн	Латунь ЛС59-1Л	Литье под давлением

Согласно рекомендациям, приведенным выше, исследуемые детали максимальный габаритный размер которых составляет: для рычага - 165 мм, для кронштейна - 300 мм, относятся ко 2-й группе, 4-й подгруппе – крупные детали. По форме – к деталям 3-й группы сложной формы с криволинейными поверхностями, внутренними полостями, отверстиями. При выборе модели станка необходимо учесть возможность свободного циркуляционного



Рис. 7. Внешний вид исследуемых деталей после ВиО:
а – рычаг; б – кронштейн

перемещения деталей в контейнере станки. Обработка всех деталей производилась на станке модели УВИ-25 объемом контейнера 25 л. Для выполнения операции очистки, снятия окалины и округления острых кромок выбраны режимы: амплитуда колебаний 3,5 мм, частота - 50 Гц. Для выполнения операций вибрационного шлифования режимы - амплитуда колебаний 3 мм и частота 34 Гц. Время обработки составило: очистка и удаление окалины - 30 мин., виброшлифование - 60 мин.

При выборе инструмента для ВиО, учитывая сложную геометрическую форму деталей, было отдано предпочтение абразивным гранулам в виде боя шарошлифовальных кругов АН-2, трехгранных призм ПТ-20 и двухсторонних пирамид, в поперечном сечении которых лежит невыпуклый шестиугольник П12 (см. рис. 4, в), имеющих одинаковую зернистость абразивной составляющей (№40) и грануляцию (20 мм). Обработка всех деталей вибрационным методом проводилась с использованием химически активного раствора следующего состава:

Таблиця 2

Операционная карта технологического процесса ВиО деталей "Кронштейн"

Союзавт	Операционная карта типового техпроцесса ВиО	Наименование деталей «Кронштейн»							
Наименование операции	Марка материала	Характеристика деталей							
Виброшлифование	Латунь ЛС59 ГОСТ 15527-70	Габаритные размеры 300×80×80 мм	Масса 1,4 кг						
Оборудование, приспособление	Рабочий раствор								
ВиО-станок мод. УВИ-25, тара для деталей, емкость для осветления	Состав и концентрация рабочего раствора 20 г/л 15 мл/л 30 мл/л		Количество раствора Непрерывно подаваемый раствор						
Сода кальцинированная ГОСТ 5100-85 Триэтанолламин ТУ 6-09-2448-66 Олеиновая кислота ТУ 6-09-3306-66									
Технические условия на детали									
До обработки		После обработки							
1. Детали получены методом штамповки 2. Дефекты поверхности (окалина, риски, забоины, вмятины с глубиной 0,5-0,8 мм, острые кромки размером, не превышающим 0,2 мм) 3. Исходная шероховатость поверхности (без учета выявленных дефектов) соответствует Ra=25 мкм		1. Дефекты поверхности удалены полностью 2. Шероховатость поверхности соответствует Ra=0,63 мкм 3. Поверхность имеет естественный матовый цвет							
№ п/п	Содержание перехода	Инструмент			Условия обработки		Продолжительность перехода, мин		
		Хар-ка рабочей среды	Размеры, мм	Объем загрузки, %	Отношение деталей и среды	Амплитуда, мм	Частота, Гц	Основное время	Вспомо- гательное время
1	Установить режимы вибрации	П12	20	50 - 60	1:8	3	34	1,0	2,0
2	Загрузить абразивные гранулы							0,5	2,0
3	Включить ВиО-станок							2,0	1,0
4	Промыть содержимое контейнера							2,0	2,0
5	Включить подачу в контейнер хим. актив. раствора							60	5,0
6	Загрузить детали в контейнер							0,5	1,0
7	Виброшлифовать							1,0	2,0
8	Отделить детали от гранул							60	5,0
9	Выключить станок							0,5	1,0
10	Проверить внешним осмотром качество обработанных деталей, измерить шероховатость и радиус округления острых кромок						Итого:	60	15

- для обработки рычагов - на один литр воды 35 г триэтанолamina, 1 мл олеиновой кислоты, 30 г кальцинированной соды, 20 г едкого кали;

- для обработки кронштейнов - на один литр воды 2 г соды кальцинированной, 15 мл триэтанолamina, 30 мл олеиновой кислоты.

В процессе обработки химически активный раствор подавался непрерывно.

Пример операционной карты технологического процесса ВиО деталей "Кронштейн" приведен в таблице 2

Через каждые 30 мин. обработки производился контрольный осмотр всех обрабатываемых деталей и измерение шероховатости поверхностей и радиусов округления острых кромок. Внешний вид исследуемых деталей после 90 мин. обработки приведен на рис. 7. Результаты экспериментальных исследований были сведены в таблицу 3.

Таблица 3

Результаты ВиО исследуемых деталей

Наименование детали	АГ	Шероховатость поверхностей, мкм			Радиус округления острых кромок, мм		
		Время обработки, мин			Время обработки, мин		
		30	60	90	30	60	90
Рычаг	АН-2	8,1	7,4	6,5	0,12	0,24	0,3
	ПТ-20	7,9	7,1	6,3	0,16	0,27	0,31
	П12	7,2	6,1	—	0,18	0,3	—
Кронштейн	АН-2	16	9,2	6,3	0,12	0,18	0,27
	ПТ-20	14,4	8,8	5,9	0,13	0,22	0,31
	П12	10,7	6,3	—	0,16	0,3	—

Примечание: АГ - абразивные гранулы

Выводы. Анализируя результаты исследований, приведенные в таблице 3, можно отметить, что производительность процесса ВиО во многом зависит от применяемого инструмента. Для получения требуемого качества обрабатываемых поверхностей в случае обработки деталей в рабочей среде, состоящей из абразивных гранул в форме АН-2 и ПТ-20, понадобилось 90 мин., а в случае обработки в П12 – 60 мин, что на 33% меньше. Обрабатываемые детали имеют большое количество затемненных мест, сложных поверхностей, впадин, выступов, что также влияет на форму выбираемого абразивного инструмента. Как показали длительные экспериментальные исследования, именно абразивные гранулы в форме П12, имеющие рациональное соотношение углов, образующих основание гранулы, достаточное количество ребер, легко проникают в труднодоступные места деталей и при этом, сохраняют свои режущие способности и форму на протяжении длительного времени – вплоть до полного истирания. Абразивные гранулы других исследуемых форм были менее производительны, т.к. в случае использования распространенных на промышленных предприятиях гранул в форме АН-2 и ПТ-20 на поверхностях деталей после обработки

наблюдались необработанные поверхности, а именно – затемненные места. Использование гранул в форме П12 позволило достичь максимального технологического эффекта и повысить производительность процесса по сравнению с АН-2 и ПТ-20 на 42 и 35% соответственно.

Л и т е р а т у р а

1. Бабичев А.П. Справочник инженера-технолога в машиностроении: справочник / А.П. Бабичев, И.М. Чукарина, Т.Н. Рысева, П.Д. Мотренко. – Ростов н/Д: «Феникс», 2005. – 541 с.
2. Блехман И.И. Вибрационное перемещение / И.И. Блехман, Г.Ю. Джанелидзе. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
3. Копылов Ю.Р. Виброударное упрочнение: Монография. – Воронеж: Воронежский институт МВД России, 1999. – 386 с.
4. Объемная вибрационная обработка / И.Е. Бурштейн, В.В. Балицкий, А.Ф. Духовский, М.Я. Дубова, Л.Ш. Гительман, А.М. Стессель, А.Н. Тоцкий / Под ред. И.Е. Бурштейна. – М.: ЭНИМС, 1977. – 108 с.
5. Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах / И.Н. Карташов, М.Е. Шаинский, В.А. Власов, Б.П. Румянцев и др. – К.: Высшая школа, 1975. – 179 с.
6. Иллюстрированный определитель деталей общемашиностроительного применения. Классы 40 и 50 / Под ред. Е.А. Понфилова, Ю.И. Блохина, Л.М. Кулика и др. М.: Издательство стандартов, 1977. – 238 с.
7. Кулаков Ю.М. Отделочно-зачистная обработка деталей / Ю.М. Кулаков, В.А. Хрульков. – М.: Машиностроение, 1979. – 216 с.
8. Мицык А.В. Повышение эффективности обработки крупногабаритных плоскостных изделий активизацией движения рабочей среды в U-образных контейнерах: дис. ... кандидата техн. наук / Мицык Андрей Владимирович. – Харьков, 2008. – 317 с.
9. Патент № 31109 Україна МПК В24В 31/14. Абразивні гранули для вібраційної обробки деталей / Калмиков М.О., Шумакова Т.О., Романченко О.В.; заявник і патентовласник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № U2007 13263; заявл. 28.11.2007; опубл. 25.03.2008, Бюл. №6.
10. Патент № 40383 Україна МПК В24В 31/14. Абразивні гранули для вібраційної обробки деталей / Лубенська Л.М., Шумакова Т.О., Калмиков М.О.; заявник і патентовласник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № U2008 11534; заявл. 25.09.2008; опубл. 10.04.2009, Бюл. №7.
11. Основи вібраційної технології: Навчальний посібник. / Лубенська Л.М., Калмиков М.О., Ясунік С.М. – Луганськ: Вид-во СХУ ім. В. Даля, 2009. – 284 с.
12. Калмиков М. Експериментальна оцінка впливу матеріалу поверхні контейнера на ефективність процесу вібраційного оброблення деталей / Калмиков М., Лубенська Л., Мелконов Г., Романченко О. // Машинознавство. – Львів, 2007. – №3(117). – С.37-40.
13. http://www.shiftcdn.it/vibrochimica/catalog_eng.pdf

14. https://www.walther-trowal.com/fileadmin/user_upload/Produkte/Datenblaetter/tfm_dt_2014_web.pdf
 15. https://de.rosler.com/fileadmin/Files/Prospekte/Gleitschlifftechnik/DE_DE_Trogvibratoren_DE_129.pdf
 16. https://www.walther-trowal.com/fileadmin/user_upload/Produkte/Datenblaetter/tmv_dt_2014_web.pdf
 17. https://us.rosler.com/fileadmin/Files/Prospekte/Gleitschlifftechnik/US_EN_Consumables_US_130.pdf
 18. http://lft.pl/sites/default/files/foldery/ksztaltki_i_plyny_obrobkowe_prospekt_pl.pdf
 19. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / Под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
 20. Вибрации в технике: Справочник: В 6-ти т. – М.: Машиностроение, 1981. – Т.4. Вибрационные процессы и машины / Под ред. Э.Э. Лавендела. – 509 с.
 21. Соколов В.І., Кріль О.С., Єпіфанова О.В. Гідравліка. – Сєвєродонєцьк: ЧНУ ім. В. Даля. – 2017. – 160 с.
 22. Кріль О.С., Шумакова Т.О., Соколов В.І. Проектування зуборізних інструментів за допомогою системи КОМПАС. – Луганськ: ЧНУ ім. В. Даля. – 2013. – 142 с.
 23. Кріль О.С., Шевченко С.В., Соколов В.І. Проектування металорізальних верстатів у середовищі APMWinMachine. – Луганськ: ЧНУ ім. В. Даля. – 2011. – 388 с.
- References**
1. Babichev, A. P. (2010), *Primenenie vibratsionnykh tekhnologiy na operatsiyah otlozheniya-zachistnoy obrabotki detalей (ochistka, moyka, udalenie oblojki i zausencev, obrabotka kromok)* [Use of vibration technology on finishing and stripping operations (cleaning, deflashing and deburring, edge processing)], DGTU, Rostov-on-Don, Russia.
 2. Blekhan, I.I., Dzhanlidze, G.Iu. (1964), *Vibratsionnoe peremeshchenie* [Vibration movement], Nauka, Moskva, Russia.
 3. Kopylov, V.Iu. (1999), *Vibroudarnoe uprochnenie* [Vibroudarnogo hardening], Voronezhskii institut MVD, Voronezh, Russia.
 4. Burshtein, I.E., Balitskii, V.V., Dukhovskii, A.F., Dubova, M.Ia., Gitelman, L.Sh., Stessel, A.M., Totckii A.N. (1977), *Obemnaia vibratsionnaia obrabotka* [Volumetric vibratory processing], ENIMS, Moskva, Russia.
 5. Kartashov, I. N., Shainskij, M. E. and Vlasov, V. A. (1975), *Obrabotka detalей s vobodnymi abrazivami v vibrirujushchih rezervuarah* [Free abrasive treatment of details in vibrating tanks], Vysshajashkola, Kiev, Ukraine.
 6. Ponfilova, E.A., Blokhina, Iu.I., Kulika, L.M. (1977), *Illustrirovannyi opredelitel detalей obshchego mashinostroitel'nogo primeneniia. Klassy 40 i 50* [Illustrated determinant of details of the machine-building application. Classes 40 and 50], Izdatel'stvo standartov, Moskva, Russia.
 7. Kulakov, Iu.M., Khrulkov, V.A. (1979), *Otdelochno-zachistnaia obrabotka detalей* [Finishing and cleaning of parts], Mashinostroenie, Moskva, Russia.
 8. Mitcyk, A.V. (2008), *Povyshenie effektivnosti obrabotki krupnogo baritnykh ploskostnykh izdelii aktivatsiey vzhivleniya rabochisredy v U-obraznykh konteynerakh*: : dis. ... kand. teh. nauk: 05.03.01 [Increasing the efficiency of processing large-sized flat products by activating the movement of the working medium in U-shaped containers] Kharkov, Ukraine.
 9. Kalmikov, M.O., Shumakova, T.O., Romanchenko, O.V. *Abrazivnigranulidliavibratsiinoobrobkideталей* [Abrasive granules for vibrating parts processing], Patent № 31109 Ukraina MPK V24V 31/14, zaivnikipatentovlasnik SkhidnoukraïnskiinatsionalniiuniversitytimeniVolodimira Dalia. – № U2007 13263; zaivl. 28.11.2007; opubl. 25.03.2008, Biul. №6.
 10. Lubenska, L.M., Shumakova, T.O., Kalmikov, M.O. *Abrazivnigranulidliavibratsiinoobrobkideталей* [Abrasive granules for vibrating parts processing], Patent № 40383 Ukraina MPK V24V 31/14, zaivnikipatentovlasnik SkhidnoukraïnskiinatsionalniiuniversitytimeniVolodimira Dalia. – № U2008 11534; zaivl. 25.09.2008; opubl. 10.04.2009, Biul. №7.
 11. Lubenska, L.M., Kalmikov, M.O., Iasunik, S.M. (2009), *Osnovivibratsiinoobrobkideталей: Navchalniiposibnik* [Basicsofvibrationnechnology: Tutorial], Vid-vo SNU im. V. Dalia, Lugansk, Ukraine.
 12. Kalmikov, M., Lubenska, L., Melkonov, G., Romanchenko, O. (2007), *Eksperimentalnaotcinkavplivumaterialupoverkhnikonteyneranaefektivnistprotcesuvibratsiinoobrobkideталей* [Experimentalestimationofinfluenceofthetmaterialofthetainersurfaceontheefficiencyoftheprocessofvibrationprocessingofparts], Mashinostroystvo, №3(117), Lviv, Ukraine.
 13. http://www.shiftcdn.it/vibrochimica/catalog_eng.pdf
 14. https://www.walther-trowal.com/fileadmin/user_upload/Produkte/Datenblaetter/tfm_dt_2014_web.pdf
 15. https://de.rosler.com/fileadmin/Files/Prospekte/Gleitschlifftechnik/DE_DE_Trogvibratoren_DE_129.pdf
 16. https://www.walther-trowal.com/fileadmin/user_upload/Produkte/Datenblaetter/tmv_dt_2014_web.pdf
 17. https://us.rosler.com/fileadmin/Files/Prospekte/Gleitschlifftechnik/US_EN_Consumables_US_130.pdf
 18. http://lft.pl/sites/default/files/foldery/ksztaltki_i_plyny_obrobkowe_prospekt_pl.pdf
 19. Reznikov, A.N. (1977), *Abrazivnaia almaznaia obrabotka materialov: Spravochnik* [Abrasive and Diamond Processing of Materials: A Handbook], Mashinostroenie, Moskva, Russia.
 20. Lavendel, E.E. (1981), *Vibratsii v tekhnike: Spravochnik: V 6-ti t. T.4 Vibratsionnye protsessy i mashiny* [Vibrations in technology: Handbook: In 6 tons. T.4. Vibration processes and machines], Mashinostroenie, Moskva, Russia.
 21. Sokolov V., Krol O., Yepifanova O. *Hydraulics*. V. Dahl EUNU, Severodonetsk, 2017.
 22. Krol O., Shumakova T., Sokolov V. *Design metal cutting instruments by dint of system of KOMPAS*. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2013.
 23. Krol O., Shevchenko S.V., Sokolov V. *Design machine tools in environment APM WinMachine*. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2011.

Шумакова Т.О., Ніколаєнко А.П., Романченко О.В., Таванюк Т.Я. Підвищення продуктивності технологічних процесів вібраційної обробки деталей.

У статті проведено аналіз відомих класифікаторів деталей, що підлягають обробці на верстатах без жорсткого кінематичного зв'язку. Наведено рекомендації щодо вибору параметрів процесу вібраційного обробки в залежності від розмірів, форми, матеріалу та вихідної якості поверхонь деталей. На основі наведених рекомендацій розроблено технологічний процес обробки складнопрофільних деталей та наведено рекомендації щодо вибору раціональної форми інструменту - одиничних абразивних гранул.

Ключові слова: вібраційна обробка, технологічний процес, складнопрофільна деталь, абразивна гранула, шорсткість поверхні, продуктивність.

Shumakova T.A., Nikolaenko A.P., Romanchenko O.V., Tavanyuk T.Y. Increase of performance of technological processes of vibration treatment of details.

Known classifiers of parts that treated in machines without rigid kinematic connection has been analyzed. Recommendations by selection of vibration treatment process parameters depending on the size, shape, material and initial quality of the parts surfaces has been given. On the basis of these recommendations, a technological process for complex parts treatment has been developed and recommendations for choosing a rational tool form - single abrasive media have been made.

Key words: vibration treatment, technological process, complex profile, abrasive granule, surface roughness, productivity.

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

Ніколаєнко Ганна Павлівна – к.т.н., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк).
apnikolaienko@gmail.com

Романченко Олексій Володимирович – к.т.н., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк).
alexvromanchenko@gmail.ru

Таванюк Тетяна Яківна – к.т.н., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк).
ttavanyuk@gmail.com

Рецензент: д.т.н., проф. **Соколов В.І**

Стаття подана 02.10.2017

**ВІСНИК
СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ
№ 7 (237) 2017**

Науковий журнал

Відповідальний за випуск

Соколов В.І.

Оригінал-макет

Могильна О.В.

Статті надруковано в авторській редакції

Підписано до друку 02.11.2017 р.
Формат 60 x 84 1/8. Папір офсетний. Гарнітура Times.
Друк офсетний. Умов. друк. арк. 17,5. Обл.-вид. арк. 18,9.
Наклад 300 прим. Вид. № 3127. Ціна вільна.

Видавництво
Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля

Свідоцтво про реєстрацію: серія ДК № 1620 від 18.12.03 р.

Адреса університета: просп. Центральний 59-А
м. Сєвєродонецьк, 93400, Україна
E-mail: vidavnictvoSNU.ua@gmail.com

Надруковано у типографії Мадрид, ООО
Свідоцтво про реєстрацію: ДК № 4399 від 27.08.2012.
Адреса типографії: вул. Ольминського, 11,
м. Харків, 61024, Україна
e-mail: : info@madrid.in.ua