

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

В І С Н И К

**Східноукраїнського
національного університету
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**№ 2 (226)
2016**

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Сєвєродонецьк 2016

ВІСНИК

СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

№ 2 (226) 2016

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 КВ № 15607-4079ПР

від 18.08.2009 р.

VISNIK

OF THE VOLODYMYR DAHL EAST
UKRAINIAN NATIONAL UNIVERSITY

№ 2 (226) 2016

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 видань ВАК України (Наказ ВАК № 1328 21.12.2015 р.), (Бюл. ВАК № 5 2010 р.), (Бюл. ВАК № 3 2010 р.), (Бюл. ВАК № 11 2010 р.), (Бюл. ВАК № 7 2011 р.) в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук з технічних, економічних, історичних, хімічних та фізико-математичних 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),
Арлінський Ю.М., докт. фіз.-мат. наук, (заступник
головного редактора),
Михайлюк В.П., докт. іст. наук, (заступник головного
редактора),
Галстян Г.А., докт. хім. наук, (заступник головного
редактора),
Архипов О.Г., докт. техн. наук,
Глікін М.А., докт. техн. наук,
Горбунов М.І., докт. техн. наук,
Кравченко О.П., докт. техн. наук,
Носко П.Л., докт. техн. наук,
Осенін Ю.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,
Чернецька-Білецька Н.Б., докт. техн. наук,

Даніч В.М., докт. екон. наук,
Заблудська І.В., докт. екон. наук,
Козаченко Г.В., докт. екон. наук,
Костирко Л.А., докт. екон. наук,
Надьон Г.О., докт. екон. наук,
Рамазанов С.К., докт. техн. наук, докт. екон. наук,
Чернявська Є.І. докт. екон. наук,
Чиж В.І., докт. екон. наук,
Голубничий П.І., докт. фіз.-мат. наук,
Ємець О.О., докт. фіз.-мат. наук,
Татарченко Г.О., докт. техн. наук,
Філоненко А.Д., докт. фіз.-мат. наук,
Барабаш Ю.В., докт. іст. наук,
Войтович Л.В., докт. іст. наук,
Довжук І.В., докт. іст. наук,
Дьомін О.Б., докт. іст. наук,
Д'яконіхін А.В., канд. іст. наук,
Сапицька О.М., канд. іст. наук,
Сергієнко Ю.Г., докт. іст. наук,
Стяжкіна О.В., докт. іст. наук,
Чернявський Г.Й., докт. іст. наук,
Голосман Є.З., докт. хім. наук,
Кудюков Ю.П., докт. хім. наук,
Новіков В.П., докт. хім. наук,
Кондратов С.О., докт. хім. наук,
Галстян А.Г., 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 № 3 від 30.09.2016 р.)

Матеріали номера друкуються мовою оригіналу.

© Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, 2016
© Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2016

ЗМІСТ

Харламов Ю.А., Полонский Л.Г. ГАЗОТЕРМИЧЕСКОЕ НАПЫЛЕНИЕ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ	5
Соколов В.И., Рассказова Ю.Б. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В МИКРОАЗОРАХ С ГРАНИЧНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ВЯЗКОСТИ	20
Кроль О.С., Лисица С.Н. 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГООПЕРАЦИОННОГО СТАНКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕНДЕРИНГА	26
Кроль О.С., Лисица С.Н. 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ОСНАСТКИ ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕНДЕРИНГА	34
Логунов А.Н. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КЛАССИФИКАЦИИ С ИНТЕРВАЛОМ В ПРОЦЕССЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ПЕРФОРАЦИОННОГО МАРКЕРА	40
Мелконов Г.Л., Никитченко И.В. МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КРУГЛЫХ ПИЛ, ОСНОВАННЫХ НА ТЕРМОМЕТРИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ	44
Мицык А.В. НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ОПЕРАЦИЙ ВИБРООБРАБОТКИ И ОБЛАСТЬ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ИХ ДОСТИЖЕНИЯ	49
Nikolaïenko A.P. INCREASING OF DETAILS SURFACE QUALITY BY VIBRATING PROCESSING	60
Рассказова Ю.Б. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРИВОДА ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ С ОБЪЕМНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ	70
Романченко А. В., Романченко Ю.А. ОБЗОР ПРИСПОСОБЛЕНИЙ ДЛЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ	76
Соколов В.И. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИХ ОБЪЕКТНОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ	86
Соколова Я.В. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ С ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ	90
Таванюк Т.Я. МОДЕЛЮВАННЯ ПРИВОДУ СПЕЦІАЛЬНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ	96
Харламов Ю.А. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КЛАССИФИКАТОР ДЕТАЛЕЙ И ПОВЕРХНОСТЕЙ С ГАЗОТЕРМИЧЕСКИМИ ПОКРЫТИЯМИ	102
Кулышев А. М., Черникова И. Д., Черников Н. Г. ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ НА РАБОТУ ФОТОДЕТЕКТОРОВ	112
Шумакова Т.О., Осипов В.І. РОЗРОБКА МЕТОДУ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИРОБНИЦТВА АБРАЗИВНИХ ГРАНУЛ І ПРИСТРОЮ ДЛЯ ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЇ	124

CONTENTS

Kharlamov Yu.A., Polonsky L.G. THERMAL SPRAYING. CURRENT STATUS AND FURTHER DEVELOPMENT.....	5
Sokolov V.I., Rasskazova Yu.B. MODELING OF FLUID FLOW IN MICROGAPS WITH THE BOUNDARY CHANGE OF VISCOSITY	20
Krol O., Lysytsa S. 3D-MODELLING MULTYOPERATION TOOL USING RENDERING	26
Krol O., Lysytsa S. 3D-MODELLING INSTRUMENTAL EQUIPMENT MULTYOPERATION TOOL USING RENDERING	34
Logunov A.N. CLASSIFICATION WITH THE INTERVAL USE IN PERFORATION MARKER RECOGNITION	40
Melkonov H.L., Nikitchenko I.V. METHOD FORECASTING PERFORMANCE OF ROUND SAWS ON THE BASIS OF THERMOMETER CONTROL	44
Mitsyk A.V. SCIENTIFIC BASIS FOR DETERMINING THE CRITERIA AND MATHEMATICAL SIMULATION OF VIBRATION TREATMENT OPERATIONS AND THE FIELD OF RATIONALE PARAMETERS OF TECHNOLOGICAL PROCESS TO ACHIEVE THEM	49
Ніколаєнко А.П. ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ВІБРАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ.....	60
Rasskazova Yu.B. MATHEMATICAL MODEL OF A HYDRAULIC DRIVE OF ROTARY MOTION VOLUME CONTROL	70
Romanchenko A. V., Romanchenko J.A. REVIEW OF DEVICES FOR VIBRATION TREATMENT SUPPORT OPERATIONS.	76
Sokolov V.I. MODELING OF GAS DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE VENTILATION SYSTEMS BASED ON THEIR OBJECT-ORIENTED DECOMPOSITION.....	86
Sokolova Ya.V. AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF ENGINEERING EQUIPMENT WITH ELECTRO-HYDRAULIC DRIVE	90
Tavanyuk T.Ya. MATHEMATICAL MODELING OF SERVO DRIVES	96
Kharlamov Y.A. TECHNOLOGICAL CLASSIFICATION OF THERMAL SPRAYED PARTS AND SURFACES.....	102
Kulyshch A. M., Chernikova I. D., Chernikov N. G. INFLUENCE CONTITION OF THE SURFACE SEMICONDUCTOR TO WORK OF PHOTODETECTOR	112
Shumakova T., Osipov V. DEVELOPMENT OF METHODS FOR COMPUTER-AIDED MANUFACTURING OF ABRASIVE GRAINS AND A DEVICE FOR ITS IMPLEMENTATION	124
Sherstiuk O.L. CRITERIA, ELEMENTS AND KINDS OF ASSURANCE OF USERS OF FINANCIAL INFORMATION	124

УДК 621. 793. 71

ГАЗОТЕРМИЧЕСКОЕ НАПЫЛЕНИЕ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Харламов Ю.А., Полонский Л.Г.

THERMAL SPRAYING. CURRENT STATUS AND FURTHER DEVELOPMENT

Kharlamov Yu.A., Polonsky L.G.

В статье показано, что одним из необходимых условий повышения конкурентоспособности машиностроения является использование методов и средств инженерии поверхности. особый интерес представляют методы газотермического напыления. Рассмотрены основные этапы истории развития этих методов. Интенсивное развитие теории и практики газотермического напыления связано с прогрессом в наукоемких отраслях промышленности. Тогда же наметилась тенденция к проведению наряду с прикладными фундаментальных исследований по газотермическому напылению. Рассмотрены современные газотермические покрытия, их получение и области применения. Кратко рассмотрены основные методы напыления.

Ключевые слова: газотермическое напыление, исследования, история техники, поверхность, покрытия.

1. Введение. Необходимым условием обеспечения конкурентоспособности продукции машиностроения является широкое внедрение технологий обработки поверхности для получения поверхностей деталей машин, стойких к износу, коррозии и старению, придания и сохранения ими трибологических, электрических, оптических, термических и иных функциональных свойств в течение длительного периода эксплуатации. Технологии поверхностной обработки и осаждения покрытий являются составляющими крупного научно-технического направления «инженерия поверхности» [1 – 5]. Технологии покрытий позволяют осаждавать поверхностные слои из материалов со свойствами, совершенно отличающимися от основного материала детали. Различают сухие и «мокрые» процессы осаждения покрытий. С экологической точки зрения предпочтительны сухие методы получения покрытий. Важным параметром методов получения покрытий является диапазон толщин осаждаемых покрытий. Покрытия с толщиной порядка нескольких микрометров называют тонкими, в то время как покрытия с толщиной выше нескольких

десятков микрометров и ниже нескольких миллиметров – толстыми.

Сухие методы осаждения тонких покрытий [1, 3 – 11] основаны на конденсации газовой или паровой фазы, включая химическое осаждение (CVD), физическое осаждение (PVD), или пульсирующее лазерное осаждение (PLD). Получение металлических покрытий PVD и CVD методами появилось в конце XIX века, тогда как технологии получения толстых металлических покрытий появились в начале XX века, в т.ч. методами наплавки и газотермического напыления покрытий (ГТНП).

ГТНП объединяет группу родственных процессов нанесения покрытий из различных материалов с помощью потоков газов, обычно высокотемпературных. Газотермические покрытия (ГТП) улучшают функциональные свойства поверхностей изделий (защита от износа, коррозии, агрессивных и высокотемпературных сред, для ремонта и восстановления деталей). Универсальность технологии ГТНП позволяет использовать ее практически для любых деталей и компонентов изделий машиностроения.

На начальной стадии развития методов ГТНП преимущественно использовалась техника тигельного, газопламенного и электродугового напыления и ее практическое применение достаточно полно рассмотрено в литературе [12 – 14]. Однако в настоящее время широкое промышленное применение получили ряд новых методов ГТНП: плазменное, высокоскоростное газопламенное, холодное газодинамическое и др., существенно расширяются области их применения.

Целью данной статьи является выявление и анализ общих тенденций развития технологии газотермического напыления и ее современного состояния, а также перспектив дальнейшего развития и применения.

2. История создания техники газотермического напыления. Изобретателем, впервые реализовавшим методы газотермического напыления покрытий (ГТНП), является д-р М. Шооп (Max Ulrich Schoop, Цюрих, Швейцария), который на стыке 19-го и 20-го веков с коллегами работал над разработкой оборудования, способного расплавлять и перемещать металлы в виде капель расплава в направлении покрываемой поверхности для осаждения покрытий. На начальной стадии осаждали металлы с низкой температурой плавления (например, олово и свинец) и процесс получил наименование «металлизации» [14, 15]. Первый металлизационный аппарат был изготовлен в 1910 г. В нем расплавленный металл с низкой температурой плавления (свинец, олово и др.) расплавлялся в тигле и подавался в струю горячего воздуха, в которой распылялся на мелкие частицы и переносился на поверхность детали для образования покрытия.

Через несколько лет, получив ряд патентов, д-р М. Шооп с коллегами создали первое термическое распылительное устройство для напыления металлическими проволоками. Эта система была основана на плавлении металлической проволоки в пламени, генерируемом при сгорании смеси горючего с кислородом. Затем расплавленный металл распылялся струей сжатого газа, который переносил металлические капли на поверхность изделия для формирования покрытия. Эта технология в настоящее время известна как газопламенное напыление и явилась основой для разработки более совершенной технологии как, например, высокоскоростное газопламенное напыление (ВГПН) в конце 1970-х годов и создать группу достаточно распространенных методов газотермического напыления, основанную на процессах горения.

Понимая необходимость расширения номенклатуры напыляемых металлов для антикоррозионной защиты, группа д-ра М. Шоопа впервые применила электрическую дугу в качестве источника энергии для металлизации. Электрическая дуга позволила напылять металлы и сплавы с более высокой температурой плавления (например, сталь, цинк и нержавеющей сталь), и инициировала разработку второй группы методов ГТНП, основанной на использовании электрической энергии.

Роль д-ра М. Шоопа в развитии ГТНП хорошо описана в работах Berndt [16] и Knight [17], где проанализированы его основные патенты. В этих патентах, а также в некоторых обзорных статьях M.U. Schoop предвосхитил многие из будущих разработок. В ранних патентах он описал распыление жидких металлов струей сжатого воздуха или инертного газа [18], использование металлических или керамических порошков, нагреваемых пламенем [19], использование проволок и прутков различных материалов в

патенте Morf [20], описал процесс электродугового напыления двумя проволоками [21]. Следует упомянуть, что он признавал важную роль скорости капель и температуры осаждаемого покрытия, таким образом прогнозируя создание высокоскоростных методов напыления (например, высокоскоростного газопламенного и холодного): «При давлении газа 20 атм, например, получают покрытия, плотность и твердость которых выше нормальных значений; при давлении газа только 5 атм плотность и твердость ниже нормальных значений» [18].

На начальной стадии развития ГТНП потребность в покрытиях была незначительной. До 1950-х годов в основном применяли газопламенное напыление. В 1917 г. М. Шоопом был создан проволочный дуговой аппарат, а в 1921 г. – порошковый металлизационный аппарат. Таким образом, фактическая история создания и развития методов ГТНП начинается с первого десятилетия XX века.

После начального периода ГТНП в первой половине двадцатого века с разработкой большого количества изобретений по методам металлизации с использованием процессов сгорания или на основе электричества (дуга), большой прогресс произошел после второй мировой войны в связи с потребностями и развитием аэрокосмической отрасли. В этот период потребовалась техника ГТНП, способная генерировать газовые потоки с более высокой температурой для получения покрытий из тугоплавких материалов (керамики и тугоплавких металлов). Это был период, когда технология ГТНП получила наибольшее развитие как в отношении оборудования, так и материалов, как исходных, так и вспомогательных.

Методы ГТНП, например, газопламенное напыление керамическими прутками, детонационное напыление и плазменное напыление были разработаны в 1940 – 1950-е годы в связи с потребностью получать надежные прочные покрытия деталей, эксплуатируемых при высоких температурах в двигателях. Эти разработки стали возможными в значительной мере благодаря прогрессу в развитии исходных материалов покрытий.

В середине 1950-х годов был разработан первый плазменный пистолет фирмой Thermal Dynamics Corporation, а затем последовали разработки фирм Metco и Plasmadyne, и эти пистолеты явились базой для создания многих новых конструкций, в т.ч. используемых в настоящее время.

Третья группа методов ГТНП разработана в 1980-е годы и относится к методам напыления материалов в твердой фазе. Здесь исходный материал переносится на поверхность изделия для получения покрытия высокоскоростными потоками газа. В напылительных устройствах процессы горения и электрическая энергия могут использоваться для вспомогательных целей,

например, для подогрева газа, порошка, но не для генерирования напылительной струи. Представителем этой третьей группы является так называемое «холодное газодинамическое напыление». Этот метод в последние десятилетия интенсивно изучается, в том числе и в отношении процессов и явлений, определяющих механизм формирования покрытий.

Ряд традиционных методов ГТНП, использующих горение, были адаптированы к принципам холодного напыления и в последние годы появились низкотемпературные методы ГТНП, (например, теплое напыление и высокоскоростное воздушно-топливное). Однако только холодное газодинамическое напыление можно рассматривать как технологию напыления твердыми частицами (без расплавления исходного материала в напылительной струе), поскольку другие методы используют высокотемпературные продукты сгорания. Целью холодного напыления является, главным образом, нанесение металлических покрытий без изменения микроструктуры исходного материала и, таким образом, сохранение низкой степени окисления и первоначальной структуры и свойств исходного материала.

В настоящее время известно много методов ГТНП, но к основным, широко применяемым в промышленности, относятся [5, 17, 22]: высокоскоростное кислородно-топливное (ВГКН), детонационное (ДН), плазменное на открытом воздухе (ПН), плазменное в вакууме (ВПН), плазменное при низком давлении (ПННД), холодное газодинамическое (ХН), высокоскоростное воздушно-топливное (ВГВН) и теплое напыление (ТН).

3. Внедрение методов ГТНП в наукоемкие отрасли промышленности. После начального периода истории ГТНП, относящегося к первой половине 20-го века и связанного с патентованием многих изобретений по технике металлизации с использованием процессов горения или электрической дуги, существенное развитие ГТНП получило после второй мировой войны в связи с резким и поступательным развитием аэрокосмической промышленности. В этот период возросла потребность в технике ГТНП, способной генерировать пламена и газовые потоки с более высокой температурой для нанесения покрытий из тугоплавких материалов (керамики и тугоплавких металлов). Это был период, когда техника ГТНП получила наибольшее развитие как в отношении оборудования, так и материалов (как материалов покрытий, так и вспомогательных). Такие методы ГТНП, как газопламенное напыление керамическими прутками, детонационное и плазменное появились в 1940-е – 1950-е годы для удовлетворения запросов промышленности на получение надежных прочных покрытий для

высокотемпературной защиты деталей в двигателях. Эти достижения стали возможными в большей степени благодаря прогрессу в исходных материалах покрытий (порошков и проволоки).

Продажи оборудования и исходных материалов ГТНП и доля отраслей промышленности, использующих технику ГТНП, увеличивались экспоненциально после 1950-х годов параллельно с разработкой новых видов оборудования, материалов и технологий и проведением исследований в индустриально развитых странах мира. К тому же, создание и использование диагностических средств (например, наблюдение за отдельными частицами в полете), оптимизация параметров напыления, моделирование, нанотехнологии и вопросы экологии внесли существенный вклад в развитие ГТНП.

В настоящее время основными наукоемкими отраслями промышленности, широко применяющими технологии ГТНП, являются такие как аэрокосмическая, турбиностроение, автомобильная, биомедицинская, нефтегазовая, судостроение, обрабатывающая, текстильная, металлообрабатывающая и др. Это связано с возможностями методов ГТНП получать покрытия для защиты от износа, для восстановления размеров и ремонта, теплоизоляции, повышения стойкости к коррозии и окислению, обеспечения самосмазываемости, биосовместимости и пр. Новые разработки как исходных материалов, так и методов и технологий, еще больше расширяют возможности ГТНП для новых применений и освоения новых рынков.

4. Развитие научных исследований в сфере ГТНП. Широкое промышленное применение ГТНП получило только в 1960-е. На это время приходится переход к завершению начального этапа развития методов ГТНП, на котором разработка технологических процессов осуществлялась эмпирическим путем. Почти до 1980-х разработка технологии ГТНП [15, 23] осуществлялась методом проб и ошибок, обычно в следующей последовательности: 1) варьирование операционных параметров напыления для порошка с частицами данной морфологии и дисперсионного состава для различных методов ГТНП; 2) определение свойств полученных покрытий и оценка их эксплуатационных свойств при использовании в специфических условиях. Эта процедура повторяется до получения требуемых параметров покрытий и фиксации соответствующего набора операционных параметров ГТНП [24]. Этот подход позволял разрабатывать эффективные покрытия и получать достаточно надежные с высокой повторяемостью при изготовлении изделий с покрытиями, а также контролировать макроскопические параметры процесса напыления, исходные материалы (морфологию частиц и

дисперсионный состав), и согласовывать эти параметры между различными рабочими местами и участками. Однако существенными недостатками такого подхода являются: высокая трудоемкость, большие затраты ресурсов и длительность периода разработки.

В конце 1980-х и в 1990-х г.г. появилось два новых подхода:

1. Разработка и использование коммерчески доступных компьютеризованных систем напыления, что позволило непрерывно отслеживать в реальном времени основные макроскопические параметры процесса на рабочем месте напыления, такие как напряжение дуги, расход транспортирующего порошок газа для используемого инжектора в заданной позиции, температуру и расход охлаждающей воды, определение места утечки воды и пр. Компьютеры на панели управления также обеспечивают мониторинг старения системы напыления, например, эрозию электродов плазмотрона, вызывающей снижение напряжения дуги, которое может автоматически корректироваться путем увеличения расхода плазмообразующего газа для подъема напряжения обратно до начального установленного значения.

2. Развитие фундаментальных представлений о теплофизических и динамических процессах при ГТНП и совершенствование техники лабораторных экспериментов и методов измерения параметров процесса ГТНП и его отдельных стадий [27 – 40]:

- генерация напылительных высоко-температурных и – скоростных газовых струй и определение их параметров;
- плавление и распыление исходных материалов компактной формы, ускорение и перенос образующихся частиц;
- ввод частиц порошка в напылительные газовые струи, их ускорение и нагрев;
- распределение температуры и скорости напыляемых частиц в газовых струях;
- распределение траекторий частиц в напылительных струях и влияние расхода транспортирующего газа на эти траектории;
- распределение скорости и температуры частиц при ударе с подложкой;
- взаимодействие частиц порошка с поверхностью детали (деформирование частиц и подложки, схватывание взаимодействующих материалов, формирование структуры покрытия);
- теплообмен и напряженно-деформированное состояние в системе «покрытие-подложка».

Обобщению результатов исследований в области теории и практики методов ГТНП во многом способствовало регулярное проведение Международных и национальных конференций по газотермическому напылению [41 – 44 и др.], а также организация и издание специализированного

международного журнала по технологии газотермического напыления «Journal of Thermal Spray Technology» с 1992 г. Однако много результатов исследований по ГТНП публикуется в других международных и отечественных научно-технических журналах, например, «Автоматическая сварка» (ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины), «Порошковая металлургия» (ИПМ НАН Украины), «Физико-химическая механика материалов» (Львов, НАН Украины), «Физика и химия обработки материалов», «Сварочное производство», «Упрочняющие технологии и покрытия», «Surface & Coatings Technology», «Applied Surface Science», «Science and Technology of Advanced Materials» и многих других.

Современные системы автоматизированного проектирования позволяют при минимальных затратах времени и материальных средств изучать и исследовать процессы ГТНП. Поэтому разработка математических и программных средств для компьютерного моделирования ГТНП получила широкое распространение. Программные средства разработаны для комплексного моделирования процессов плазменного, высокоскоростного газоплазменного, электродугового, детонационного и др. методов напыления [45 – 47]. Использование экспериментальных измерений и расчетов по моделям обеспечивает постепенный переход от метода проб и ошибок к научному подходу, постепенно трансформируя воспроизведение и управление реальными процессами ГТНП от ремесла к научно обоснованным решениям.

В течение начального периода много усилий уделялось стандартизации средств для определения свойств покрытий и контроля эксплуатационных свойств покрытий в заданных условиях.

В конце 1990-х были разработаны менее совершенные, но достаточно простые и надежные датчики, работоспособные в жестких условиях процессов ГТНП [48, 49]. Интенсивные исследования взаимосвязей между параметрами частиц в полете и свойствами покрытий [49 – 52] привело к более глубокому пониманию механизмов формирования покрытий и соответствующего улучшению технологической воспроизводимости и надежности покрытий [52]. Однако выявление связей операционных параметров ГТНП со свойствами покрытий еще далеко от завершения [52].

В 1990-е дальнейшее развитие ГТНП стимулировало разработку сенсоров для лабораторных исследований, которые стали основой для разработки датчиков, менее сложных, проще и надежнее, способные работать в жестких условиях кабин для напыления [23, 53]. Параллельно были разработаны коммерчески доступные компьютеризованные системы, обеспечивающие непрерывный контроль в реальном времени

макроскопических параметров в процессе напыления в кабинах. Стандартизация средств для контроля качества покрытий, разработка компьютеризированных систем контроля процесса напыления, панелей контроля и датчиков существенно повысило воспроизводимость и надежность ГТП.

5. Современные газотермические покрытия и их получение. На ранней стадии развития технология ГТН использовалась главным образом для ремонта, восстановления, подгонки, защиты поверхностей от коррозии, эрозии и износа [23, 53]. В 1970-е – 1980-е годы благодаря разработке измерениям в промышленных условиях и моделированию в лабораториях было достигнуто лучшее понимание явлений при ГТНП. Параллельно широкое признание технологии ГТНП в промышленных масштабах привело к началу применения покрытий на компонентах с высокой добавленной стоимостью в аэрокосмической, атомной и др. отраслях промышленности. В конце 1980-х и начале 1990-х г.г. стал доступным широкий ряд промышленных процессов модифицирования поверхности. В этот период газотермические покрытия главным образом развивались в авиационной, автомобильной, машиностроении, полиграфической, целлюлозно-бумажной, стекольной, медицинской и др. отраслях, для защиты от коррозии в различных средах. ГТП применяют для решения широкого диапазона различных функциональных задач: трибологические и износостойкие покрытия, включая износостойкие, антифрикционные, самосмазывающиеся и пр., для защиты от коррозии и окисления, высокотемпературные покрытия, формообразование тонкостенных изделий из тугоплавких и других материалов со специальными свойствами, покрытия со специальными электрическими и оптическими свойствами, для экранирования от электромагнитных излучений, электрической изоляции, герметизирующие и уплотнительные, для биомедицинских применений, в производстве сверхпроводящей керамики, компонентов с контролируемым коэффициентом термического расширения, магнитные покрытия, топливные элементы, для замены «мокрых» процессов, например, гальванического хромирования, декоративные покрытия и многие др.

На современном этапе известно большое количество разнообразных процессов и технологий получения как покрытий, так и материалов, доступных на рынке. Методы ГТНП отличаются между собой качественными и количественными показателями свойств газотермических покрытий, диапазоном их толщины и точностью, условиями формирования покрытий, например, температуры поверхности изделия в процессе осаждения, составом и структурой получаемых покрытий.

Универсальность и высокая гибкость методов ГТНП достигается благодаря широкому ряду технологий и оборудования, доступных на рынке, а также проведению непрерывных разработок и исследований, возможности напыления большого разнообразия материалов, в т.ч. композиционных, а также большому разнообразию известных и перспективных областей применения.

Выбор покрытий и процессов ГТН для заданных условий эксплуатации определяется техническими и экономическими требованиями. Выбор и конструирование покрытий часто на практике фактически затрудняется тем, что поверхности детали нуждаются в обеспечении не одного, а нескольких функциональных требований, например, одновременной стойкости к износу и коррозии, электрической или термической изоляции. В таких случаях применяют многофункциональные покрытия. В средах. Различные доступные процессы ГТНП в основном дополняют друг друга и не конкурируют между собой и взаимное перекрытие их областей применения не очень широко. Для выбора метода напыления важно знать преимущества и недостатки каждого из методов ГТНП и сделать правильный выбор метода для конкретного применения. В ряде случаев решающее значение приобретают экономические факторы.

Основные виды техники ГТНП, их характеристики, напыляемые материалы, свойства и применение покрытий рассматривалось в работах [15, 22].

5.1. Образование газотермических покрытий. Развитие методов ГТНП непосредственно связано с изучением физико-химических явлений, сопутствующих образованию покрытий, и механизмов, ответственных за формирование их свойств. Процесс образования ГТП заключается в тонком распылении исходного материала (в случае его компактного состояния) на мелкие частицы, нагреве частиц до расплавленного или пластичного состояния и перемещении их до соударения с поверхностью изделия. Нагретые и ускоренные частицы соударяются с поверхностью подложки, расплющиваются и образуют тонкие частицы (сплэты), схватывающиеся с поверхностью детали. Сплэты в итоге охлаждаются и последовательным наращиванием друг на друга образуют покрытие со слоистой структурой. Структура, механические, теплофизические и иные свойства покрытий, прочность сцепления их с основным материалом определяются структурой и свойствами исходного материала покрытия и превращениями в нем в рабочей среде и в процессе соударения частиц с поверхностью детали, в том числе контактного взаимодействия материалов.

Формируемые ГТП, как правило, имеют неомогенную структуру, так как применяемые

исходные материалы (обычно порошок), с распределением частиц по размерам, могут иметь различные фазы с различным химическим составом. Распыляемый исходный материал (проволока) также образует частицы с отличающимися размерами. Это ведет к различию скорости и температуры частиц при соударении с поверхностью детали и, следовательно, к их различному физическому состоянию (расплавленному, полу-расплавленному или твердому). Окончательная структура покрытия может содержать поры вследствие плохого анкерного сцепления частиц различного размера, или насыщения газами, образования сплэтов различного размера, сплэтов с различной фазовой микроструктурой, образованием при ГТНП новых фаз (например, оксидов) и трещины, образующиеся вследствие аккумуляции напряжений. К тому же слоистая структура ГТП приводит к анизотропии свойств в продольном и поперечном направлениях.

Газотермическому напылению подвергаются практически любые материалы, которые не разлагаются при высоких температурах (вблизи температуры плавления). Фактически все виды материалов, полимеры, металлы и керамика (и их комбинации) могут напыляться при правильном выборе техники газотермического напыления и операционных параметров ГТНП. До настоящего времени имеются ограничения по напылению керамик, не имеющих постоянной температуры плавления (например, карбид и нитрид кремния), вследствие их возможности сублимировать или разлагаться в процессе напыления на воздухе. Эти ограничения недавно были обойдены разработкой новой технологии для защиты керамических порошков при ГТНП. Эта технология позволяет ГТН керамик, не имеющих постоянной температуры плавления, путем защиты каждой индивидуальной керамической частицы нанослоем материала, выполняющего роль теплового барьера [53].

5.2. Материалы современных газотермических покрытий. В табл. 1 представлены наиболее типичные материалы, используемые для газотермического напыления и основные области их применения. Выбор надлежащего материала для определенных применений является трудной задачей и требует соответствующих профессиональных знаний и квалификации и знание материалов. Не только химические, механические и физические свойства материалов являются основными факторами, влияющими на работоспособность покрытий, но важны также характеристики исходных материалов. Поэтому, во многих случаях, управление микроструктурой и свойствами покрытий является ноу-хау разработчиков и обладателей соответствующих технологий.

Таблица 1
Типичные газотермически напыляемые материалы и области их применения

Материал покрытия	Максимальная рабочая температура, °C	Области применения
Al	400	Коррозионная стойкость
Zn	250	
Ni	500	
Mo	320	Пары скольжения
Al-Mg	200	Коррозионная стойкость
Нерж.сталь	~500	Коррозионная стойкость, износ
Co-Al ₂ O ₃ и Cr ₂ O ₃	~1000	Стойкость к окислению и износу
CoMoSi (Трибалой)	~1000	Износостойкость при скольжении
NiAl, NiCr	950	Подслои, ремонт
Ni-графит	950	Поверхности скольжения
MCrAlY (M=Fe, Co, Ni)	~1000	Стойкость к коррозии и окислению
Бронза	<200	Износостойкость при скольжении
TiB ₂ , ZrB ₂		Износостойкость
TiC, Cr ₃ C ₂ , NbC, TaC, WC	400-500	
WC-TiC	800	
TaC-NbC	800	
Cr ₃ C ₂ -NiCr	800	Коррозия, износ, скольжение
WC-Co	500	Износостойкость при скольжении
Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , ZrO ₂	>1000	Износостойкость, тепловой барьер
AlO ₃ -TiO ₂ , Al ₂ O ₃ -MgO	>1000	
Cr ₂ O ₃ -TiO ₂ , Cr ₂ O ₃	>1000	
ZrO ₂ -MgO, ZrO ₂ -CaO, ZrO ₂ -SiO ₂	>1000	

5.3. Методы газотермического напыления.

Существует много различных видов оборудования и процессов для газотермического напыления. Достаточно подробный обзор приведен в работах [15, 22]. В табл. 2 обобщены основные методы ГТН и их некоторые характеристики, а также получаемых покрытий.

5.3.1. Газопламенное напыление.

Газопламенное напыление (ГПН) является одним из простейших среди современных методов ГТНП. Это дешевый и удобный в управлении метод, использующий исходные материалы различной формы и состояния: порошки, прутки, проволоку и др. Впервые разработан в 1910-е годы, но затем многократно усовершенствован. Источником энергии является пламя сгорания смеси горючего (ацетилен, пропан, водород) с кислородом. Подача напыляемого материала может быть осевой или радиальной в зависимости от типа пистолета.

Таблица 2
Сравнительные характеристики методов
газотермического напыления

Метод ГТНП (рабочие газы)	Параметры газовой струи (Т, °C/V, м/с)	Мощность газовой струи, кВт	Напыля- емый материал, T _{max} , °C/V _р , м/с	Покры- тие: Порис- тость,% / Толщи- на, мкм
Газопламенное (кислород, ацетилен, пропан, водород)	3500 / 80-100	20	2500 / 50-100	10-15; 0 (для само- флюсую- щихся сплавов) / 100-2500 мкм
Электроду- говое (воздух, азот, аргон)	>6000 / 50-100	5...10	>3800 / 50...150	10-20 / 100-2000 мкм
Детонационное (кислород, ацетилен, водород, пропан, бутан)	>4000 / >2500	—	- / 750... 1000	<2 / 100...400
Высокоскоростное газопламенное (кислород, природный газ, этилен, пропилен, пропан, керосин, водород)	2500-3000 / 500-2000	150-300	3300 / 200... 1000	<2 / 50...2000
Плазменное напыление на открытом воздухе (аргон, гелий, водород, азот, смеси)	10000... 15000 / 300...1000	40...200	>3800 / 50... 100	5...10 / 100...1500
Холодное напыление	0...700 (предва- рительный нагрев) / 300...1200	—	250 / 500	<5 / 250...600

Основные операционные параметры ГПН: дистанция напыления 120 – 250 мм; напыление на открытом воздухе; максимальная температура поверхности детали 250 °C (и до 1000 °C при оплавлении покрытий горелкой покрытий из самофлюсующихся сплавов).

5.3.2. Детонационно-газовое напыление. Этот метод ГТНП впервые разработан американской фирмой Union Carbide (сейчас Praxair) в связи с необходимостью получения плотных покрытий с высокой прочностью сцепления с основой. Эта техника напоминает газопламенное напыление, поскольку в качестве источника энергии использует процесс сгорания горючей смеси. Процесс независимо разработан в бывшем СССР, главным образом в Украине [54 – 57]. Однако сгорание происходит в длинном стволе (450-1350 мм), где исходный материал (порошок) нагревается продуктами сгорания. Сгорание происходит в

детонационном режиме, поэтому это циклический процесс. Классические детонационные пушки выполняют 1-15 циклов напыления (выстрелов) в секунду, но недавно разработаны детонационные системы, выполняющие до 100 циклов в сек [58].

Основные параметры процесса: дистанция напыления 100 – 300 мм; напыление на открытом воздухе; размер частиц порошка в диапазоне 5 – 60 мкм.

5.3.3. Высокоскоростное газопламенное напыление (ВГПН). Впервые метод ВГПН разработан фирмой Union Carbide в середине 1950-х годов.

Широкому распространению метода способствовало успешное создание в конце 1970-х, начале 1980-х годов системы Jet Kote. Она подобна детонационной системе, поскольку сгорание происходит в камере под давлением и частицы ускоряются в стволе.

Однако в отличие от детонационно-газовых пушек устройство ВГПН работает в непрерывном режиме сгорания, что обеспечивает его более высокую производительность. Этот метод стал ведущим в наукоемких отраслях для напыления керметных (керамико-металлических, таких как WC-Co) материалов. Этот метод использует исходные материалы в виде порошков, которые подаются в напылительную струю соосно или радиально в зависимости от типа пистолета. Газы подаются в камеру сгорания под давлением (0,3 – 0,4 МПа). Продукты сгорания затем ускоряются в стволе до сверхзвуковых скоростей пламени. Порошок, вводимый в ствол транспортирующим газом (азотом или аргонном) ускоряется до очень высоких скоростей.

Основные параметры процесса: дистанция напыления в диапазоне 150 – 300 мм, напыление на открытом воздухе; размер частиц порошка 5 – 45 мкм.

5.3.4. Электродуговое напыление. Технология электродугового напыления (ЭДН) первоначально изобретена и запатентована д-ром Шоопом в 1910-е годы и приобрела вновь повышенный интерес после 1960-х годов. В этом методе используют электрическую дугу, инициируемую между двумя расходуемыми электродными проволоками, непрерывно подаваемыми в распылительный пистолет. Электрическая дуга, горящая между двумя концами проволок, расплавляет их, а высокоскоростная воздушная струя распыляет их и переносит расплавленные частицы металла на поверхность изделия, образуя покрытие. Расход сжатого воздуха составляет от 0,8 до 1,8 м³/мин. Термический КПД ЭДН значительно выше, чем у других методов ГТНП.

Основные параметры процесса: дистанция напыления в диапазоне 50-170 мм; напыление на открытом воздухе, в контролируемой атмосфере или в вакууме электропроводных материалов (например, Zn, Al, Mo и NiCr-сплавов) или порошковых

проволок, содержащих керамические фазы, таких как карбид вольфрама (WC). Пористость покрытий может быть улучшена после-напылительной обработкой.

5.3.5. Плазменное напыление. Плазменное напыление заключается в использовании для нагрева и ускорения исходного материала ионизированного газа (или смесей газов). Для ионизации газов и получения термической плазмы и плазменных дуг используют электрические поля. Плазменной струей частицы исходного материала нагреваются и перемещаются на поверхность изделия. В плазматронах плазменный факел генерируется анодом (медь или графит) и катодом (торированный вольфрам). Электрический дуговой разряд, генерируемый между анодом и катодом, ионизирует газ, который расширяется в атмосфере, образуя струю. Исходный материал (порошок) подается в струю, ускоряя частицы и перемещая их в направлении поверхности изделия.

Основные параметры процесса: дистанция напыления в диапазоне 60 – 130 мм; напыление на открытом воздухе (ПН), в контролируемой атмосфере или в вакууме; размер частиц порошка в диапазоне 20-90 мкм. Температура поверхности изделия должна поддерживаться низкой (100 – 200 °C) при напылении керамических материалов во избежание остаточных напряжений в покрытиях. Последующая после напыления обработка может быть использована для улучшения плотности покрытий (отжиг, лазерная обработка).

5.3.6. Холодное напыление. Разработанный в конце 1980-х годов этот метод ГТНП предназначен для получения покрытий путем использования высокой кинетической энергии частиц без их расплавления в процессе напыления. Это осуществляется с помощью струй, формируемых без участия горения и ионизации газов. Газ или смесь газов, используемые при ХН, сжимаются до 3,5 МПа и нагреваются до 700 °C. Этот нагретый газ затем вводится в сопло Лаваля, где расширяется до сверхзвуковых скоростей. Порошок исходного материала подается в сопло и частицы ускоряются при температуре значительно ниже их точки плавления. Температура газа и расход порошка оптимизированы для получения благоприятной микроструктуры покрытия. Состав, температура и давление газа являются параметрами, управляющими свойствами покрытий и варьируются в зависимости от типа исходного материала.

Основные параметры процесса: дистанция напыления в диапазоне 10 – 50 мм; напыление на открытом воздухе; исходный порошок с размером частиц в диапазоне 5 – 20 мкм. Критериями пригодности порошка для ХН являются способность частиц пластически деформироваться и (или) иметь низкую температуру плавления.

6. Рынок газотермического напыления. Согласно обзора, опубликованного в 2013 г. [59],

объем рынка ГТНП в аэрокосмической и автомобильной промышленности и в производстве промышленных турбин занимают 75 % общего рынка ГТНП, который оценочно составляет 6,5 млрд. долл. США, из которых 77 % приходится на покрытия и услуги, 19 % на материалы и 4 % на оборудование. По отдельным сегментам: около 60 % общего рынка принадлежат турбостроению, 15 % – автомобильной промышленности, и остальные 25 % распределены между большим количеством других отраслей. Ожидается, что турбостроение будет ведущей в развитии технологии ГТНП в последующие годы. Большинство этих рынков (две третьих) находится в Европе, на Ближнем Востоке и в Северной Америке. Однако наибольшие темпы роста наблюдались в Азии [60] и ожидаются в Южной Африке в связи с ростом промышленного производства в этих странах. Однако, и другие отрасли и рынки, как, например, нефтегазовая, целлюлозно-бумажная, металлообрабатывающая и биомедицинская, могут получить преимущества при использовании газотермических покрытий и выдвинуть запросы для новых разработок в технологии и применении ГТНП. Например, ХН и технологии напыления суспензиями и растворами представляют интерес для этих отраслей.

Однако имеется большой потенциал как в отраслях, в которых ГТНП уже интенсивно внедряется, так и в тех, где сейчас применение ГТН незначительно. К потенциальным рынкам относятся следующие [61]:

- Материалы для электронных приборов и других изделий электронной техники, таких как датчики, электропроводки, антенны, накопители энергии и др. Преимуществами термического и холодного напыления являются: широкая номенклатура материалов, которые могут осаждаться на изделия различной формы, отсутствие в необходимости последующей после напыления обработки, высокая скорость осаждения, и проведение процессов осаждения в контролируемой среде.

- автомобильная промышленность: удовлетворение экологических требований, уменьшение трения, износа и расхода смазочных масел, повышение работоспособности ДВС и других агрегатов, создание и применение теплозащитных покрытий, покрытий со специальными функциональными свойствами и др.

- стационарные и вторично стационарно используемые авиационные турбины: более совершенные конструкции и составы теплозащитных покрытий, работоспособных при более высоких температурах, с более высоким сроком службы и в различных средах, парах воды и повышенной стойкости к эрозии, повышение эффективности осаждения покрытий, повышение роботизации и компьютеризации технологических систем ГТНПи пр.

– создание износо- и коррозионно- стойких покрытий с улучшенными эксплуатационными свойствами, особенно для экстремальных условий (температура, давление и окружающая среда), на основе фундаментальных исследований для лучшего понимания и управления процессами формирования покрытий.

– распространение и широкое внедрение современных разработок в сфере ГТНП в нефтегазовой, целлюлозно-бумажной, металлообрабатывающей, биомедицинской и др. отраслях.

Некоторые из применений современной техники ГТНП в аэрокосмической, автомобильной промышленности и турбостроении рассмотрены в [15]. Отличительной особенностью этих применений является общая тенденция преимущественного использования классических методов ГТНП – газопламенного и плазменного. В аэрокосмической промышленности и турбостроении плазменное напыление применяют для многих деталей, поскольку наиболее распространены керамические покрытия. Однако, на многие детали самолетов и турбин напыляют также металлы и керметы. Распространенными покрытиями в этих трех сегментах рынка являются теплозащитные, износостойкие, уплотнительные.

Наиболее распространенными в ведущих отраслях являются следующие типы покрытий:

1. Теплозащитные: $ZrO_2-Y_2O_3$ (YSZ- частично стабилизированный диоксид циркония); $ZrO_2-25CeO_2-Y_2O_3$; CeO_2-YSZ ; $CaTiO_3$. В качестве подслоя для лучшего сцепления используется $MCrAlY$ ($M = Co, Ni$).

В аэрокосмической промышленности их применяют на деталях турбин; в автомобильной – на головках поршней, крышках цилиндров, клапанах, выпускных каналах, коллекторах, турбокомпрессорах, опорных дисках тормозов; в турбостроении – для облицовки камер сгорания, на переходных кольцах, отражательных щитках, топливных форсунках.

2. Уплотнительные (на сопрягаемых поверхностях):

(а) Ni -графит; $MCrAlY$ ($M = Co, Ni$) – В аэрокосмической промышленности применяют для напыления вращающихся деталей турбин; в турбостроении – корпусов компрессора.

(б) Полиэстер; $NiAl$ – полиэстер; Al ; бронза; баббит; $AlSi$ с полиэстером; полиимид и BN – в турбостроении – корпуса компрессоров.

3. Стойкие к окислению и коррозии:

(а) $MCrAlY$ ($M = Co, Ni$); $NiCrMo$; $Co-Cr-Si-Mo$.

В аэрокосмической промышленности применяют на деталях двигателей; в турбостроении – секции компрессора, пропускающие влагу и хлориды, и турбин, контактирующие с топливом; в судостроении – нерасходуемые защитные покрытия.

(б) Al ; Zn ; $Zn-Al$: в автомобильной промышленности – система выпуска; в судостроении – катодная защита.

4. Износостойкие и восстановительные:

(а) $WC-Co$, $WC-CoCr$ и $WC-Ni$. В аэрокосмической промышленности – детали гидравлических систем; восстановление и ремонт изношенных и корродированных деталей; в автомобильной – предохранение гильз цилиндров от схватывания; в турбостроении – вращающиеся валы; в судостроении – эрозия и коррозия водяных турбин.

(б) $Ni-Al$, $CuNiIn$. В аэрокосмической промышленности – подслои покрытий; антифреттинговые свойства и управление зазорами.

(в) Cr_3C_2-NiCr . В аэрокосмической промышленности – уплотнения при высоких температурах; в турбостроении – высокотемпературные детали секций турбин.

(г) $Co-Cr-Si-Mo$ в турбостроении – детали компрессора.

(д) $NiCr$, $NiCrMo$, $NiMoAl$, сплавы 625 и 718 - в автомобильной – восстановление коленчатых валов; в турбостроении - наращивание и ремонт.

(е) Mo – в автомобильной – защита от капельной эрозии поршней; от заедания в гильзах цилиндров.

Кроме технологических ограничений, присущих методам ГТНП, имеется ряд других критических факторов, препятствующих росту рынка ГТНП [59]: (1) подготовка квалифицированных кадров и привлечение молодых специалистов; (2) создание типовых технологических процессов ГТНП для различных условий производства; (3) повышение роли профессиональных и торговых ассоциаций в сфере ГТНП; (4) сокращение времени на трансфер новых технологий ГТНП; (5) уменьшение капитальных и текущих затрат при внедрении ГТНП в промышленное производство; (6) решение проблем экологии, охраны труда.

7. Перспективные тенденции и применения.

В течение последнего десятилетия интенсивно растет интерес к получению «толстых» мелкозернистых и наноструктурных покрытий на больших поверхностях. Процессы осаждения покрытий из паровой фазы – (CVD, плазмо-активированное CVD (PE-CVD), PVD, EB-PVD, и др.) позволяют осаждать наноструктурные покрытия, однако толщина покрытий едва выше нескольких микрон, за исключением EB-PVD процесса. Каждое направление, ГТНП и осаждение из паровой фазы, имеют различные преимущества, и если их объединить, это может привести к созданию нового вида покрытий. Поэтому фирма Sulzer Metco разработала новый процесс, комбинирующий плазменное напыление с физическим осаждением из паровой фазы [62]. Этот новый метод использует высокоомощный плазматрон (180 кВт – 3000 А, расход газа до 200 л/мин), работающий при

давлении ниже 1 кПа. При таком низком давлении плазменная струя достигает по длине более чем 2 м до 0,4 м в диаметре. Покрытия, получаемые этим методом, могут иметь микроструктуру, подобную покрытиям при EB-PVD (столбчатая структура и практически беспористые), когда используют низкий расход порошка, адаптированные условия напыления и большую дистанцию напыления [62]. Поэтому свойства покрытий, получаемых PS-PVD, лучше, чем у покрытий PVD и плазменных, а покрытия могут быть получены на более крупных деталях и более сложной формы.

Традиционным плазменным напылением (на открытом воздухе) легко получить покрытия с толщиной от 50 мкм до нескольких мм, но без реальной наноструктуры после плавления частиц в плазменной струе. Этим объясняется интерес к различным методам напыления и исходным материалам, разработанным в последнее десятилетие для получения полностью или частично наноструктурных покрытий:

- Напыление толстых композиций металлических стекол на основе железа (состоящих из семи и более легирующих элементов) с низкими критическими скоростями охлаждения (104 К/с) для формирования металлических стекол [63]. После термообработки при температуре выше точки кристаллизации (568 °С, которая меньше половины температуры плавления), покрытия кристаллизуются в многофазную нанокompозитную микроструктуру. Покрытия можно получить плазменным методом, ВГПН, ЭДМ (порошковыми проволоками). Благодаря высокой твердости при сравнении с традиционными металлическими сплавами аморфные и нанокompозитные покрытия имеют очень хорошие характеристики стойкости к износу и коррозии. Некоторые композиции покрытий также проявляют стойкость к износу и коррозии, превосходящие нержавеющую сталь при таких же условиях [53, 63].

- Напыление, плазменное или ВГПН, агломерированных наноструктурных керамических частиц [64] с тщательным контролем температуры и распределения по размерам частиц в напылительной струе для поддержания частиц в полурасплавленном состоянии. Это приводит к бимодальным структурам, в которых механическое поведение зависит от плотности наноразмерных зон. Покрытия, полученные по таким технологиям, более вязкие, чем традиционные [64, 65]. Холодное напыление или наноструктурных материалов с наноразмерными зернами или агломератами, полученными из микро – и наночастиц или только из наночастиц. Однако напыляемые частицы должны быть достаточно пластичными [66 – 68].

- Плазменное напыление суспензий (СПН) и растворов прекурсоров (РПН) позволяют получить тонко структурированные слои с толщиной от нескольких микрометров до нескольких сотен микрометров [65]. Эти технологии, по существу,

разработаны для керамики, которые кажутся обещающими для производства плотных или с контролируемой пористостью покрытий и функционально градиентных слоев. Покрытия обладают очень интересными особенностями, особенно намного лучшей вязкостью по сравнению с традиционными покрытиями благодаря их более тонкой структуре. Тем не менее, получение покрытий из суспензий и растворов, инжектируемых в горячие газы, более сложно (выбор растворителя, диспергаторы, прекурсоры и пр.), из-за фрагментации жидкости, и необходимости управления испарением [65]. Фактически, не доступны средства диагностики для измерения в полете капель размером менее 4–5 мкм, которые могли бы обеспечить лучшее понимание протекающих при напылении явлений. Должны быть сконструированы новые плазменные пистолеты для напыления суспензиями и растворами. Таким образом, необходимо отметить, что СПН и РПН сейчас в таком состоянии, как и традиционное напыление в 1980-е и в начале 1990-х годов. СПН и РПН, в последнее десятилетие были предметом многочисленных публикаций в международных обзорах материалах конференций. Более того, еще в [69] отмечалось «чтобы способствовать индустриальной реализации, необходимо срочно уделить больше внимание перспективным исследовательским работам – сертифицировать газотермическое напыление жидкими исходными материалами на более ориентированные технологические маршруты по областям применения и более убедительно представлять результаты исследований и разработок. Технологии напыления суспензиями и растворами существенно отличаются от классических методов напыления и новые индустриальные стандарты должны характеризовать подготовку суспензий и растворов, хранение, подачу, а также пригодность и хранение сырья (то есть ультратонких порошков, растворителей, добавок и пр.)».

Аэрокосмическая промышленность является наиболее разносторонней в отношении использования последних разработок в газотермическом напылении, как, например, плазменное напыление в контролируемой атмосфере (плазменное напыление при низком давлении (LPPS) и плазменное напыление в вакууме (VPS)) и HVOF. Автомобильная и другие отрасли, как, например, биомедицинская и судостроение нуждаются в новых материалах и разработках, поскольку они до сих пор быстро развиваются вследствие необходимости уменьшения потребления горючего. В этом отношении выбор покрытий, обеспечивающих меньший износ и трение, коррозию и окисление; повышение твердости и увеличение рабочей температуры, является существенным. Современные материалы покрытий и технологии делают возможным

достижение этих целей, но улучшения все еще необходимы для придания покрытиям новых полезных свойств, как, например, экологическая совместимость, высокая эффективность использования топлива, пониженная стоимость, уменьшенный вес, уменьшение технического обслуживания и повышенная прочность.

Развитие новых технологий ГТНП, покрытий и материалов будет определенно открывать возможности для новых рынков, где ГТНП до сих пор еще имеют незначительный бизнес-сегмент. Например, аэрокосмическая промышленность, возобновляемые и альтернативные источники энергии, полупроводниковая, металлургическая и судостроительные отрасли являются потенциально растущими сферами, поскольку они несомненно представляют растущие рынки как в новых и развивающихся, так и в промышленно развитых странах. Увеличение технико-экономической значимости ГТН основывается на росте знаний, материалов и технологий. Таким образом, прогресс в технологии ГТН возможен и необходим.

Технология ГТНП имеет также большой потенциал для дальнейшего развития за пределами существующих границ применений и рынков, поскольку имеется много отраслей за пределами традиционных рынков ГТНП, которые осведомлены о преимуществах ГТНП, но не рискуют войти в них. Эти ограничения можно обойти только прогрессом как в промышленности, так и в исследованиях ГТНП. Расширение ГТНП имеет место в настоящее время благодаря развитию материалов и оборудования, средств диагностики, а также исследования процессов.

Имеются возможности для разработки новых исходных материалов, поскольку они расширяют возможности рынка. Кроме того, прогресс в создании новых процессов откроет возможности для новых видов покрытий и, следовательно, новых применений. Совсем недавно, искусственные нейронные сети и генетические алгоритмы были предложены для контроля и регулирования операционных параметров ГТНП [70].

8. Выводы. Этап освоения технологии газотермического напыления покрытий (плазменного и газопламенного) наукоемкими отраслями, прежде всего в аэрокосмической и ядерной промышленности, в 1960-е годы стимулировал проведение в дальнейшем интенсивных исследований и разработок. Однако теория и практика ГТНП развивались в основном по пути обоснования термических механизмов формирования покрытий. В последующие годы наметился постепенный переход к высокоскоростным методам напыления. Технология газотермического напыления пополнилась такими новыми методами, как детонационное, высокоскоростное газопламенное в 1980-е годы и холодное напыление в конце 1990-х годов. В 1970-е годы проведены работы по

существенному совершенствованию электродугового проволочного напыления.

Более глубокое понимание процессов и явлений, сопровождающих формирование газотермических покрытий, открывают возможности конструирования их новых конструкций и составов для разнообразных условий эксплуатации.

Л и т е р а т у р а

1. Хокинг М. Металлические и керамические покрытия: Получение, свойства и применение / Хокинг М., Васантакри В., Сидки П. – М.: Мир, 2000. – 518 с.
2. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П.А. Витязь, В.С. Ивашко, А.Ф. Ильющенко [и др.] – Минск: Беларуская навука, 1998. – 583 с.
3. ASM Handbook Volume 5: Surface Engineering. – Ohio: ASM International, 1994 – P. 1056.
4. Cartier M. / 2003. Handbook of Surface Treatments and Coatings / Cartier M., Polak T.A., Wilcox G.D. – N-Y: ASME Press, 2003. – P. 412.
5. Ющенко К.А. Інженерія поверхні / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, В.М. Корж. – Київ: Наук.думка. 2007. – 559 с.
6. Dobkin D.M. Principles of Chemical Vapor Deposition / Dobkin D.M., Zuraw M.K. - NY: Springer, 2003.
7. Glocker, D.A., Shah, S.I. / Handbook of Thin Film Process Technology, 2 vol. set. / Glocker, D.A., Shah, S.I. - Bristol: Institute of Physics, - 2002.
8. Mahan J.E. / Physical Vapor Deposition of Thin Films / Mahan J.E. Hoboken: John Wiley & Sons. – 2000.
9. Erkens, G. / Plasma-Assisted Surface Coating Processes, Methods, Systems and Applications. Sulzer Metco / Erkens, G., Vetter, J., McEuler, J., auf dem Brinke, T., Fromme, M., Mohnfeld, A. Munich: SÜddeutscher Verlag onpact GmbH. – 2011.
10. Frey, H., / Handbook of Thin Film Technology / Frey, H., Khan, H.R. // NY: Springer, – P. 550.
11. Gladish G. / Physics of Laser Materials Processing: Theory and Experiment. Springer Series in Materials Science, Book 146 / Gladish G.G., Smurov I. // NY: Springer, 2011.
12. Полонський Л.Г. / Техніка напылення газотермічних покриттів (машинна стадія розвитку) / Полонський Л.Г. // Житомир: ЖДТУ, 2004. – 266 с.
13. Кречмар Э. / Напыление металлов, керамики и пластмасс / Кречмар Э. // М.: Машиностроение, 1966. – 432 с.
14. Hermanek, F.J. / What is Thermal Spray? For the International Thermal Spray Association (ITSA) / Hermanek, F.J. // Online: www.thermalspray.org, 2014.
15. Handbook of Thermal Spray Technology, edited by J.R. Davis // Ohio: ASM International. – 2004. – P. 347.
16. Berndt C.C. The origin of thermal spray literature / Berndt C.C. / Proceedings of the international thermal spray conference, Singapore // Ohio: ASM International, 2001. – P. 1351–1360.
17. Knight R. Thermal spray: past, present and future / Knight R. / Proceedings of the international symposium on plasma chemistry // Toronto: ASME, 2005.
18. Patent 5,712 UK, Improvements in or connected with the coating of surfaces with metal, applicable also for soldering or uniting metals and other materials / Schoop M.U. 1910.

19. Patent 21,066 UK, An improved process of applying deposits of metal or metallic compound to surfaces / Schoop M.U. 1911.
20. Patent 28,001 UK, A method of producing bodies and coatings of glass and other substances / Morf E. 1912.
21. Patent 1,133,507 US, Apparatus for spraying molten metal and other fusible substances / Schoop M.U. 1915.
22. Pawlowski L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings: 2-nd Ed. / L. Pawlowski // Chichester, England. John Wiley & Sons, Ltd. – 2008. – P. 647.
23. Tucker Jr., C. (Ed.), 2013. ASM Handbook. Thermal Spray Technology Volume 5A. - Ohio: ASM International. P. 412.
24. Friis, M. / Control of thermal spray processes by means of process maps and process windows / Friis, M., Persson, C. // J. Therm. Spray Technol. 2003. 12 (1), - P. 44–52.
25. Кудинов В.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / Кудинов В.В., Бобров Г.В. – М.: Металлургия, 1992. – 432 с.
26. Ильющенко А.Ф. / Формирование газотермических покрытий: теория и практика / А.Ф. Ильющенко, В.А. Оковитый, С.П. Кундас, Б. Форманек // Минск: Бестпринт, 2002. – 480 с.
27. Кудинов В.В. / Плазменные покрытия / Кудинов В.В. // М.: Наука, 1977. – 184 с.
28. Кудинов В.В. / Теплофизика плазменных покрытий / Кудинов В.В., Иванов Е.М. // Физика и химия плазменных металлургических процессов. – М.: Наука, 1985. – С.103-126.
29. Ю.Н. Дубнищев / Оптические методы исследования потоков / Ю.Н. Дубнищев, В.А. Арбузов, П.П. Белоусов, П.Я. Белоусов // Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2003. – 418 с.
30. Гуляев П.Ю. / Физические принципы диагностики в технологиях плазменного напыления / Гуляев П.Ю., Долматов А.В. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 11, №5(2), 2009. – С.381-385.
31. А.А. Овсянников / Диагностика низкотемпературной плазмы / А.А. Овсянников, В.С. Энгельшт, Ю.А. Лебедев [и др.] // Новосибирск: «Наука», 1994. – 485 с.
32. Методы и средства оптической пирометрии // М.: Наука, 1983. – 149 с.
33. M. Doubenskaia Particle-in-flight monitoring in thermal spray processes / M. Doubenskaia, D. Novichenko, A. Sova and D. Pervoushin // Surface and Coatings Technology, 2010, Vol. 205, Issue 4, P. 1092-1095.
34. Fauchais, P. Sensors in spray processes / Fauchais, P., Vardelle, M. // J. Therm. Spray Technol. 2010, 19 (4). – P. 668–694.
35. Fauchais, P. Diagnostics in thermal plasma processing / Fauchais, P., Coudert, J.F., Vardelle, M. / Plasma Diagnostics, vol. 1 // NY: Academic Press, 1989. – P. 349–446.
36. Харламов Ю.А. Детонационно-газовые напылительные струи / Харламов Ю.А. Харламов М.Ю. // Луганск: Восточноукр. нац. ун-т им. В. Даля, 2011. – 260 с.
37. Fauchais P. Diagnostics of thermal spraying plasma jets / Fauchais, P., et al. // J. Therm. Spray Technol. 1992, 1 (2), P. 117–128.
38. Moreau, C. Diagnostics for advanced materials processing by plasma spraying / Moreau, C., Bisson, J.-F., Lima, R.S., Marple, B.R. // Pure Appl. Chem. 2005, 77 (2), P. 443–462.
39. Получение покрытий высокотемпературным распылением. Сб. статей. Под ред Л.К. Дружинина и В.В. Кудинова // М.: Атомиздат, 1973. – 312 с.
40. Thermal Spray Conf. Proceedings. // ASM International.
41. Теория и практика газотермического нанесения покрытий // М.: МВТУ им. М.Э. Баумана. – Материалы: 1 семинара, 1977. XII Всес. конф., 1991.
42. Газотермическое напыление в промышленности: материалы между семинара. – Ленинград: Полиплазма. – 1991. – 104 с.
43. Ильющенко А.Ф. Процессы плазменного нанесения покрытий: теория и практика / А.Ф. Ильющенко, С.П. Кундас, А.П. Достанко и др. // Минск: Научный центр исследований политики и бизнеса «Армита – Маркетинг, Менеджмент», 1999. – 544 с.
44. Достанко А.П. Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники. В 3-х т. Т.1 / А.П. Достанко, С.П. Кундас, М.Н. Босяков [и др.] // Минск: ФУАинформ, 2000. – 424 с.
45. Ильющенко А.Ф. Формирование газотермических покрытий: теория и практика / А.Ф. Ильющенко, В.А. Оковитый, С.П. Кундас, Б. Форманек // Минск: Бестпринт, 2002. – 480 с.
46. Li, C.-J. / Effect of spray particle trajectory on the measurement signal of particle parameters based on thermal radiation / Li, C.-J., Wu, T., Li, C.-X., Sun, B. // J. Therm. Spray Technol. 2003, 12 (1), P. 80–94.
47. Fauchais, P. / Sensors in spray processes / Fauchais, P., Vardelle, M. // J. Therm. Spray Technol., 2010, 19 (4), P. 668–694.
48. Legoux, J.-G. Evaluation of four high velocity thermal spray guns using WC-10% Co-4% Cr cermets / Legoux, J.-G., Arsenault, B., Leblanc, L., Bouyer, V., Moreau, C. // J. Therm. Spray Technol., 2002, 11 (1), P. 86–94.
49. Planche M.P. In-flight characteristics of plasma sprayed alumina particles measurements, modeling, and comparison / Planche, M.P., Bolot, R., Coddet, C. // J. Therm. Spray Technol., 2003, 12 (1), P. 101–111.
50. Sampath, S. Sensing, control, and in situ measurement of coating properties: an integrated approach toward establishing process-property correlations / Sampath, S., Srinivasan, V., Valarezo, A., Vaidya, A., Streibl, T. // J. Therm. Spray Technol., 2009, 18 (2), P. 243–255.
51. Fauchais, P., Thermal Spray Fundamentals / Fauchais, P., Heberlein, J., Boulos, M. // NY: Springer, 2014. – P. 1600.
52. Шоршоров М.Х. Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий / Шоршоров М.Х., Харламов Ю.А. – М.: Наука, 1978. – 224 с.
53. Харламов Ю.А. Детонационно-газовая аппаратура для напыления покрытий / Ю.А. Харламов, М.Х. Шоршоров, Ю.И. Писклов, Б.Л. Рябошапко // М.: Ин-т металлургии им. А.А. Байкова АН СССР, 1980. – 65 с.
54. Зверев А.И. Детонационное напыление покрытий / Зверев А.И., Шаривкер С.Ю., Астахов Е.А. // Л.: Судостроение, 1979. – 232 с.
55. Харламов Ю.А. Детонационно-газовые процессы в промышленности / Харламов Ю.А., Будагянц Н.А. // Луганск: изд-во Восточноукр. гос. ун-та, 1998. – 223 с.
56. Fagoaga, I. The high frequency pulse detonation (HFPD) spray process / Fagoaga, I., Barykin, G., De Juan, J., Soroa, T., Vaquero, C., Coatings, A., Inasmet, F. // Thermal Spray 1999: United Thermal Spray Conference (DVS-ASM), P. 282–287.
57. Dorfman, M.R. Challenges and strategies for growth of thermal spray markets: the six-pillar plan / Dorfman,

- M.R., Sharma, A. // J. Therm. Spray Technol., 2013, 22 (5), P. 559–563.
58. Fukumoto, M. The current status of thermal spraying in Asia / Fukumoto, M. // J. Therm. Spray Technol., 2008, 17 (1), P. 5–13.
 59. Thermal Spray Coating Technology White Paper by the ASM International Thermal Spray Association (TSS) // TSS, 2014. <http://tss.asminternational.org/portal/site/tss/>.
 60. von Niessen, K. Plasma sprayed-PVD: a new thermal spray process to deposit out of the vapor phase / von Niessen, K., Gindrat, M. // J. Therm. Spray Technol., 2011, 20 (4), P. 736–743.
 61. Branagan, D.J. Maximizing the glass fraction in ironbased high velocity oxy-fuel coatings / Branagan, D.J., Swank, W.D., Meacham, B.E., // Metall. Mater. Trans., 2009, A 40A, P. 1306–1313.
 62. Lima, R.S. Thermal spray coatings engineered from nanostructured ceramic agglomerated powders for structural, thermal barrier and biomedical applications: a review / Lima, R.S., Marple, B.R. // J. Therm. Spray Technol., 2007, 16 (1), P. 40–63.
 63. Fauchais, P. Engineering a new class of thermal spray nano-based microstructures from agglomerated nanostructured particles, suspensions and solutions: an invited review / Fauchais, P., Montavon, G., Lima, R.S., Marple, B.R. // J. Phys., 2011, D 44, 093001.
 64. Ajdelsztajn, L. Cold-spray processing of a nanocrystalline Al–Cu–Mg–Fe–Ni alloy with Sc. / Ajdelsztajn, L., Zuñiga, A., Jodoin, B., Lavernia, E.J. // J. Therm. Spray Technol., 2006, 15 (2), P. 184–190.
 65. Wang, H.-T. Microstructural characterization of cold-sprayed nanostructured FeAl intermetallic compound coating and its ball-milled feedstock powders / Wang, H.-T., Li, C.-J., Yang, G.-J., Li, C.-X., Zhang, Q., Li, W.-Y. // J. Therm. Spray Technol., 2007, 16 (5–6), P. 669–676.
 66. Zhang, Q. Study of oxidation behavior of nanostructured NiCrAlY bond coatings deposited by cold spraying / Zhang, Q., Li, C.-J., Li, C.-X., Yang, G.-J., Lui, S.-C. // Surf. Coat. Technol., 2008, 202 (14), P. 3378–3384.
 67. Killinger, A. Review of new developments in suspension and solution precursor thermal spray processes / Killinger, A., Gadow, R., Mauer, G., Guignard, A., Vaßen, R., Stöver, D. // J. Therm. Spray Technol., 2011, 20 (4), P. 677–695.
 68. Ульшин В.А. Оптимизация параметров детонационного напыления с использованием генетического алгоритма / Ульшин В.А., Харламов М.Ю. // Автоматическая сварка. – 2005. – № 2. – С.32–37.
 7. Glocker, D.A., Shah, S.I. / Handbook of Thin Film Process Technology, 2 vol. set. / Glocker, D.A., Shah, S.I. - Bristol: Institute of Physics, - 2002.
 8. Mahan J.E. / Physical Vapor Deposition of Thin Films / Mahan J.E. Hoboken: John Wiley & Sons. – 2000.
 9. Erkens, G. / Plasma-Assisted Surface Coating Processes, Methods, Systems and Applications. Sulzer Metco / Erkens, G., Vetter, J., Müller, J., auf dem Brinke, T., Fromme, M., Mohnfeld, A. Munich: Süddeutscher Verlag onpact GmbH. – 2011.
 10. Frey, H., / Handbook of Thin Film Technology / Frey, H., Khan, H.R. // NY: Springer, - P. 550.
 11. Gladish G. / Physics of Laser Materials Processing: Theory and Experiment. Springer Series in Materials Science, Book 146 / Gladish, G.G., Smurov, I. // NY: Springer, 2011.
 12. Polonsky L.G. / Tekhnika napilennya gazotermichnikh pokritiy (mashinna stadia rozvitky) / Polonsky L.G. // Zhitomir: ZDTU, 2004. – 266 s.
 13. Krechmar E. Napilenie metallov, keramiki i plastmass / Krechmar E. // M.: Mashinostroenie, 1966. – 432 s.
 14. Hermanek, F.J. / What is Thermal Spray? For the International Thermal Spray Association (ITSA) / Hermanek, F.J. // Online: www.thermalspray.org, 2014.
 15. Handbook of Thermal Spray Technology, edited by J.R. Davis // Ohio: ASM International. – 2004. – P. 347.
 16. Berndt C.C. The origin of thermal spray literature / Berndt C.C. / Proceedings of the international thermal spray conference, Singapore // Ohio: ASM International, 2001. - P. 1351–1360.
 17. Knight R. Thermal spray: past, present and future / Knight R. / Proceedings of the international symposium on plasma chemistry // Toronto: ASME, 2005.
 18. Patent 5,712 UK, Improvements in or connected with the coating of surfaces with metal, applicable also for soldering or uniting metals and other materials / Schoop M.U. 1910.
 19. Patent 21,066 UK, An improved process of applying deposits of metal or metallic compound to surfaces / Schoop M.U. 1911.
 20. Patent 28,001 UK, A method of producing bodies and coatings of glass and other substances / Morf E. 1912.
 21. Patent 1,133,507 US, Apparatus for spraying molten metal and other fusible substances / Schoop M.U. 1915.
 22. Pawlowski L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings: 2-nd Ed. / L. Pawlowski // Chichester, England. John Wiley & Sons, Ltd. – 2008. – P. 647.
 23. Tucker Jr., C. (Ed.), 2013. ASM Handbook. Thermal Spray Technology Volume 5A. - Ohio: ASM International. P. 412.
 24. Friis, M. / Control of thermal spray processes by means of process maps and process windows / Friis, M., Persson, C. // J. Therm. Spray Technol. 2003. 12 (1), - P. 44–52.
 25. Kudinov V.V. Nanesenie pokritiy napileniem. Teoriya, tekhnologiya i oborudovanie / Kudinov V.V., Bobrov G.V. – M.: Metallurgiya, 1992. – 432 s.
 26. Ilyushchenko A.F. Formirovanie gazotermicheskikh pokritiy: teoriy i praktika / Ilyushchenko A.F., V.A. Okovityi, S.P. Kundas, Formanek B. // Minsk: Bestprint, 2002. – 480 s.
 27. Kudinov V.V. Plazmennye pokritiya / V.V. Kudinov // M.: Nauka, 1977. – 184 s.
 28. Kudinov V.V. Teplofizika plazmennikh pokritiy / V.V. Kudinov, E.M. Ivanov / Fizika i khimiya plazmennikh metallurgicheskikh prochshessov // M.: Nauka, 1985. – S.103-126.

References

1. Hocking M.G. Metallic and Ceramic Coatings / Hocking M.G., Vasantasree V., Sidky P.S. // L.: Longman Group UK Limited, 1989. (M.: Mir, 2000. – P. 518).
2. Teoriya i praktika naneseniya zashchitnikh pokritiy / Vityaz P.A., Ivashko V.S., Ilyushchenko A.F. [I dr.]. – Minsk: Belorusskaya navuka, 1998. – 583 s.
3. ASM Handbook Volume 5: Surface Engineering. – Ohio: ASM International, 1994 – P. 1056.
4. Cartier M. / 2003. Handbook of Surface Treatments and Coatings / Cartier M., Polak T.A., G D Wilcox G.D. – N-Y: ASME Press, 2003. – P. 412.
5. Yushchenko K.A. Inseneriya poverhni / Yushchenko K.A., Yu.S. Borisov, V.D. Kuznetsov, V.M. Kors.- Kiev: Nauk.dumka. 2007. – 559 s.
6. Dobkin D.M. Principles of Chemical Vapor Deposition / Dobkin D.M., Zuraw M.K. - NY: Springer, 2003.

29. Dubnichshev Yu.A., V.A. Arbusov, P.P. Belousov, P.Ya. Belousov // Novosibirsk: Sib. Univ. izd-vo, 2003. – 418 s.
30. Gulyaev P.Yu. Fizicheskie princhshipi diagnostiki v technologiakh plazmennogo napileniya / P.Yu. Gulyaev, A.V. Dolmatov // Izvestia Samarskogo nauchnogo chshentra Rossieskoy akademii nauk, 2009, t.11, # 5(2). – S. 381-385.
31. Ovsinnikov A.A. Diagnostika nizkotemperaturnoy plazmi / A.A. Ovsinnikov, V.S. Engelsht, Yu. A. Lebedev [i dr.] // Novosibirsk: Nauka, 1994. – 485 s.
32. Metodi i sredstva opticheskoy pirometrii // M.: Nauka, 1983. – 149 s.
33. M. Doubenskaia Particle-in-flight monitoring in thermal spray processes / M. Doubenskaia, D. Novichenko, A. Sova and D. Pervoushin // Surface and Coatings Technology, 2010, Vol. 205, Issue 4, P. 1092-1095.
34. Fauchais, P. Sensors in spray processes / Fauchais, P., Vardelle, M. // J. Therm. Spray Technol. 2010, 19 (4). – P. 668–694.
35. Fauchais, P. Diagnostics in thermal plasma processing / Fauchais, P., Coudert, J.F., Vardelle, M. / Plasma Diagnostics, vol. 1 // NY: Academic Press, 1989. – P. 349–446.
36. Kharlamov Yu.A. Detonachshionno-gazovie napilitelnie strui / Yu.A. Kharlamov, M.Yu. Kharlamov // Lugansk: Vostochno-ukr. Nachsh. Univ-t im. V.Dalya, 2011. – 260 s.
37. Fauchais P. Diagnostics of thermal spraying plasma jets / Fauchais, P., et al. // J. Therm. Spray Technol. 1992, 1 (2), P. 117–128.
38. Moreau, C. Diagnostics for advanced materials processing by plasma spraying / Moreau, C., Bisson, J.-F., Lima, R.S., Marple, B.R. // Pure Appl. Chem. 2005, 77 (2), P. 443–462.
39. Poluchenie pokritiy visokotemperaturnim napileniem. Sb. Statey. Pod red. L.K. Druzhinina i V.V. Kudinova // M.: Atomizdat, 1973. – 312 s.
40. Thermal Spray Conf. Proceedings. // ASM Internatational.
41. Teoriya i praktika gazotermicheskogo naneseniy pokritiy // M.: MVТУ im. N.E. Bauman. – Materiali i seminar, 1977,.... XII Vses, conf., 1991.
42. Gazotermicheskoe napilenie v promishlennosti: mat-li mezhdunarodn. Seminar. – Leningrad: Poliplazma. – 1991. – 104 s.
43. Ilyuchshenko A.F. Prochshessi plazmennogo naneseniya pokritiy: teoriya i praktika / A.F. Ilyuchshenko, S.P. Kundas, A.P. Dostanko [i dr.] // Minsk: Nauchniy chshentr issledovaniy politiki i biznesa "Armita – Marketing, Menegment", 1999. – 544 s.
44. Dostanko A.P. Plazmennye prochshessi v proizvodstve izdeliy elektronnoy tekhniki. V 3-kh t. T.1 / Dostanko A.P., S.P. Kundas, M.N. Bosyakov [i dr.] // Minsk: FUAinform, 2000. – 424 s.
45. Ilyuchshenko A.F. Formirovanie gazotermicheskikh pokritiy: teoriya i praktika / A.F. Ilyuchshenko, V.A. Okovityu, S.P. Kundas, B. Formanek // Minsk: Bestprint, 2002. – 480 s.
46. Li, C.-J. / Effect of spray particle trajectory on the measurement signal of particle parameters based on thermal radiation / Li, C.-J., Wu, T., Li, C.-X., Sun, B. // J. Therm. Spray Technol. 2003, 12 (1), P. 80–94.
47. Fauchais, P. / Sensors in spray processes / Fauchais, P., Vardelle, M. // J. Therm. Spray Technol., 2010, 19 (4), P. 668–694.
48. Legoux, J.-G. Evaluation of four high velocity thermal spray guns using WC-10% Co-4% Cr cermets / Legoux, J.-G., Arsenaault, B., Leblanc, L., Bouyer, V., Moreau, C. // J. Therm. Spray Technol., 2002, 11 (1), P. 86–94.
49. Planche M.P. In-flight characteristics of plasma sprayed alumina particles measurements, modeling, and comparison / Planche, M.P., Bolot, R., Coddet, C. // J. Therm. Spray Technol., 2003, 12 (1), P. 101–111.
50. Sampath, S. Sensing, control, and in situ measurement of coating properties: an integrated approach toward establishing process-property correlations / Sampath, S., Srinivasan, V., Valarezo, A., Vaidya, A., Streibl, T. // J. Therm. Spray Technol., 2009, 18 (2), P. 243–255.
51. Fauchais, P., Thermal Spray Fundamentals / Fauchais, P., Heberlein, J., Boulos, M. // NY: Springer, 2014. – P. 1600.
52. Shorshorov M.Kh. Fiziko-khimicheskie osnovi detonachshionno-gazovogo napileniya / M.Kh. Shorshorov, Yu.A. Kharlamov // M.: Nauka, 1978. – 224 s.
53. Kharlamov Yu.A. Detonchshionno-gazovaya apparatura dly napileniy pokritiy / Yu.A. Kharlamov, M.Kh. Shorshorov, Yu.I. Pisklov, B.L. Ryuboshaqko // M.: In-t metallurgii im. A.A. Baykova AN SSSR, 1980. – 65 c.
54. Zverev A.I. Detonachshionnoe napilenie pokritiy / A.I. Zverev, S.Yu. Sharivker, E.A. Astakhov // L.: Sudostroenie, 1979. 232 s.
55. Kharlamov Yu.A. Detonchshionno-gazovie processi v promishlennosti / Yu.A. Kharlamov, N.A. Budagynchsh // Lugansk: izd-vo Vostochnoukr. Gos. Univ-ta, 1998. – 223 s.
56. Fagoaga, I. The high frequency pulse detonation (HFPD) spray process / Fagoaga, I., Barykin, G., De Juan, J., Soroa, T., Vaquero, C., Coatings, A., Inasmet, F. // Thermal Spray 1999: United Thermal Spray Conference (DVS-ASM), P. 282–287.
57. Dorfman, M.R. Challenges and strategies for growth of thermal spray markets: the six-pillar plan / Dorfman, M.R., Sharma, A. // J. Therm. Spray Technol., 2013, 22 (5), P. 559–563.
58. Fukumoto, M. The current status of thermal spraying in Asia / Fukumoto, M. // J. Therm. Spray Technol., 2008, 17 (1), P. 5–13.
59. Thermal Spray Coating Technology White Paper by the ASM International Thermal Spray Association (TSS) // TSS, 2014. <http://tss.asminternational.org/portal/site/tss/>.
60. Von Niessen, K. Plasma sprayed-PVD: a new thermal spray process to deposit out of the vapor phase / von Niessen, K., Gindrat, M. // J. Therm. Spray Technol., 2011, 20 (4), P. 736–743.
61. Branagan, D.J. Maximizing the glass fraction in ironbased high velocity oxy-fuel coatings / Branagan, D.J., Swank, W.D., Meacham, B.E., // Metall. Mater. Trans., 2009, A 40A, P. 1306–1313.
62. Lima, R.S. Thermal spray coatings engineered from nanostructured ceramic agglomerated powders for structural, thermal barrier and biomedical applications: a review / Lima, R.S., Marple, B.R. // J. Therm. Spray Technol., 2007, 16 (1), P. 40–63.
63. Fauchais, P. Engineering a new class of thermal spray nano-based microstructures from agglomerated nanostructured particles, suspensions and solutions: an invited review / Fauchais, P., Montavon, G., Lima, R.S., Marple, B.R. // J. Phys., 2011, D 44, 093001.
64. Ajdelsztajn, L. Cold-spray processing of a nanocrystalline Al–Cu–Mg–Fe–Ni alloy with Sc. / Ajdelsztajn, L., Zu'n'iga, A., Jodoin, B., Lavernia, E.J. // J. Therm. Spray Technol., 2006, 15 (2), P. 184–190.

65. Wang, H.-T. Microstructural characterization of cold-sprayed nanostructured FeAl intermetallic compound coating and its ball-milled feedstock powders / Wang, H.-T., Li, C.-J., Yang, G.-J., Li, C.-X., Zhang, Q., Li, W.-Y. // J. Therm. Spray Technol., 2007, 16 (5–6), P. 669–676.
66. Zhang, Q. Study of oxidation behavior of nanostructured NiCrAlY bond coatings deposited by cold spraying / Zhang, Q., Li, C.-J., Li, C.-X., Yang, G.-J., Lui, S.-C. // Surf. Coat. Technol., 2008, 202 (14), P. 3378–3384.
67. Killinger, A. Review of new developments in suspension and solution precursor thermal spray processes / Killinger, A., Gadow, R., Mauer, G., Guignard, A., Vaßen, R., Stöcker, D. // J. Therm. Spray Technol., 2011, 20 (4), P. 677–695.
68. Ulshin V.A. Opgtimizachshiy parametrov detonachshionnogo napileniy s ispolzovaniem geneticheskogo algoritma / V.A. Ulshin, M.Yu. Kharlamov // Avtomaticheskay svarka. – 2005. - #2. – S.32-37.

Харламов Ю.О., Полонський Л.Г. Газотермічне напilenня. Сучасний стан і перспективи розвитку

У статті показано, що одним з необхідних умовий підвищення конкурентоспроможності машинобудування є використання методів і засобів інженерії поверхні. Особливий інтерес представляють методи газотермічного напilenня. Розглянуто основні етапи історії розвитку цих методів. Інтенсивний розвиток теорії і практики газотермічного напilenня пов'язано з прогресом в наукоємних галузях промисловості. Тоді ж намітилася тенденція до проведення поряд з прикладними фундаментальних досліджень по газотермічному напilenню. Розглянуто сучасні газотермічні покриття, їх отримання і області застосування. Коротко розглянуті основні методи напilenня.

Ключові слова: газотермічне напilenня, дослідження, історія техніки, поверхня, покриття.

Kharlamov Yu.A., Polonsky L.G. Thermal spraying. Current status and further development

The article shows that one of the necessary conditions to increase the competitiveness of machine building industry is the use of methods and means of surface engineering. Thermal spraying is a group of processes in which finely divided metallic or nonmetallic surfacing materials are deposited in a molten or semimolten or solid conditions on to a prepared substrate to form a deposited coating.

In paper are generalized the results of studies and developments in the field of thermal spraying, including theory, technology and equipment, as also application of thermal sprayed coatings. The first part of this paper refers to the short history of thermal spraying. In the second part the adoption of thermal spraying processes by knowledge-intensive industries are discussed. Changes in research methods of thermal spraying are discussed in the third part of the paper. The great deal of attention is paid to current coatings, their materials and coatings build-up in next fourth part of the paper. Future trends and applications also discussed in sixth part of paper.

Keywords: applications, history, thermal spraying, trends, research and development, surface, coatings.

Харламов Юрій Олександрович – д.т.н., проф., професор кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк). yuriy.kharlamov@gmail.com

Полонський Леонід Григорович – д.т.н., проф., зав. кафедри технології машинобудування Житомирського державного технологічного університету (м. Житомир). pol@ztu.edu.ua

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

Стаття подана 12.09.2016

УДК 532.542

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В МИКРОАЗОРАХ С ГРАНИЧНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ВЯЗКОСТИ

Соколов В.И., Рассказова Ю.Б.

MODELING OF FLUID FLOW IN MICROGAPS WITH THE BOUNDARY CHANGE OF VISCOSITY

Sokolov V.I., Rasskazova Yu.B.

Исследовано течение вязкой несжимаемой жидкости в микрозазорах гидравлических устройств и аппаратов с учетом скачкообразного граничного изменения вязкости. Для принятой модели распределения динамической вязкости проинтегрированы уравнения движения жидкости, на основании чего получены выражения для скорости жидкости по высоте зазора. Получены зависимости для расчета падения пропускной способности проходного сечения. Приведены примеры расчета распределений скорости и падения пропускной способности для плоской щели. Выполнена оценка границ применимости классического подхода к расчету течения вязкой жидкости в микрозазоре.

Ключевые слова: динамическая вязкость, жидкость, давление, расход, распределение скорости.

Постановка проблемы. Течение жидкости в микрозазорах представляет практический интерес в связи с решением задач по уплотнениям гидравлических устройств и аппаратов, герметичность соединения подвижных пар которых часто обеспечивается выполнением гарантированного микронного зазора. Классический подход к расчету течения в узких щелях предполагает постоянство динамической вязкости жидкости по сечению. Поток жидкости для распространенных условий работы гидросистем носит ламинарный характер и расчет течения производят на основе известных зависимостей для плоской, концентрической и эксцентрической щелей [1, 2].

Однако, согласно теоретическим положениям и опытным данным ряда авторов [3, 4] вблизи границы твердого тела (до нескольких тысяч ангстрем, $1\text{Å} = 10^{-4}\text{мкм} = 10^{-10}\text{м}$) вязкость минеральных масел скачкообразно увеличивается. Хотя толщина слоев, где проявляется отклонение вязкости, заметно меньше величины микрозазоров (размеры щелей в гидроаппаратах обычно выполняют не меньше 10-15 мкм), возникает

несомненный интерес к оценке гидромеханических параметров потока с учетом отмеченного эффекта.

Анализ последних исследований и публикаций. На величину скачка оказывает влияние род жидкости, материал твердой стенки, температура и т.д. Исследование свойств приграничных слоев жидкостей показывает, что это слои, где жидкость находится в особом фазовом состоянии, характеризующимся высокой степенью упорядочения молекул. Одна из самых простых непротиворечивых теорий, учитывающих эффекты пристеночных течений, исходит из модели сплошной среды с внутренним вращением неточечных структурных элементов [5 – 7].

Несмотря на то, что качественная оценка граничного увеличения вязкости вблизи твердой поверхности достаточно широко представлена в литературе, количественные характеристики для оценки гидромеханических параметров течения в микрозазоре отсутствуют.

Цель статьи. Предложить математическую модель течения вязкой несжимаемой жидкости в микрозазорах гидравлических устройств и аппаратов с учетом скачкообразного граничного изменения вязкости и установить зависимости для расчета падения пропускной способности проходного сечения.

Материалы и результаты исследования. Рассмотрим стационарное течение в плоской щели, образованной двумя параллельными стенками неограниченной ширины. Выбрав ось x по потоку, ось y – перпендикулярно к стенкам щели (рис. 1), запишем уравнение движения несжимаемой среды с переменной динамической вязкостью [1, 2]

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u_x}{\partial y} \right), \quad (1)$$

где μ – динамическая вязкость; $\partial p / \partial x$ – градиент давления; u_x – скорость течения жидкости

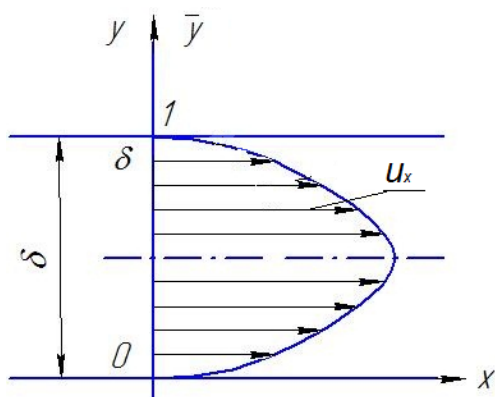


Рис. 1. Схема течения в плоской щели

Будем считать, что стенки, образующие щель, выполнены, в общем случае, из разных материалов. Это предполагает введения в рассмотрения различных величин скачков вязкости вблизи твердой поверхности, а также различных размеров приграничных слоев, где проявляется изменение вязкости. Поэтому, непротиворечивым является задание следующего распределения динамической вязкости по высоте зазора (рис. 2):

$$\mu = \begin{cases} \mu_0 + \Delta\mu_1, & y < \Delta\delta_1; \\ \mu_0, & \Delta\delta_1 \leq y \leq \delta - \Delta\delta_2; \\ \mu_0 + \Delta\mu_2, & y > \delta - \Delta\delta_2; \end{cases} \quad (2)$$

где δ – размер щели;

$\Delta\delta_1, \Delta\delta_2$ – размеры приграничных слоев у каждой из стенок, вблизи которых происходит увеличение вязкости;

μ_0 – динамическая вязкость (в основном потоке жидкости вне граничных слоев);

$\Delta\mu_1, \Delta\mu_2$ – величины приграничных скачков вязкости.

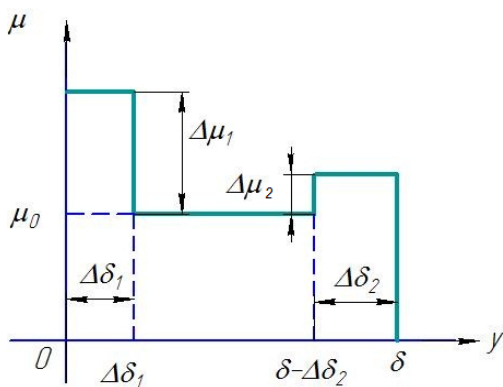


Рис. 2. Распределение динамической вязкости по высоте зазора

С целью дальнейшего упрощения математических выкладок введем следующие безразмерные переменные:

безразмерные координаты

$$\bar{y} = y/\delta; \quad \bar{\delta}_1 = \Delta\delta_1/\delta; \quad \bar{\delta}_2 = \Delta\delta_2/\delta; \quad (3)$$

безразмерная вязкость и ее скачки

$$\bar{\mu} = \mu/\mu_0; \quad \bar{\mu}_1 = \Delta\mu_1/\mu_0; \quad \bar{\mu}_2 = \Delta\mu_2/\mu_0; \quad (4)$$

безразмерная скорость

$$\bar{u} = u_x/V_0, \quad (5)$$

где u_0 – средняя скорость при классическом расчете течения в плоской щели [1, 2];

$$V_0 = -\frac{\delta^2}{12\mu_0} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (6)$$

или в виде, более удобном для технических расчетов,

$$V_0 = \frac{\Delta p \delta^2}{12\mu_0 l}, \quad (7)$$

где Δp – перепад давлений на щели; l – длина щели.

С учетом (3 – 6) уравнение (1) и распределение (2) принимают следующий безразмерный вид

$$\frac{\partial}{\partial \bar{y}} \left(\bar{\mu} \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial \bar{y}} \right) = -12; \quad (8)$$

$$\bar{\mu} = \begin{cases} 1 + \bar{\mu}_1, & \bar{y} < \bar{\delta}_1; \\ 1, & \bar{\delta}_1 \leq \bar{y} \leq 1 - \bar{\delta}_2; \\ 1 + \bar{\mu}_2, & \bar{y} > 1 - \bar{\delta}_2. \end{cases} \quad (9)$$

Безразмерное распределение вязкости (9) показано на рис. 3.

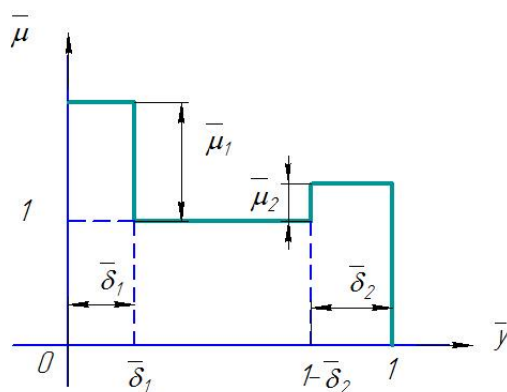


Рис. 3. Безразмерное распределение вязкости

Для нахождения распределения скорости $\bar{u}_x(\bar{y})$ по высоте щели выделим в зазоре (рис. 4) три зоны (0, 1, 2), соответствующие постоянным значениям вязкости и проинтегрируем уравнение (8) для каждой из зон

$$\bar{u}_1(\bar{y}) = -\frac{6}{1+\bar{\mu}_1} \bar{y}^2 + C_{11}\bar{y} + C_{12}; \quad (10)$$

$$\bar{u}_0(\bar{y}) = -6\bar{y}^2 + C_{01}\bar{y} + C_{02} \quad (11)$$

$$\bar{u}_2(\bar{y}) = -\frac{6}{1+\bar{\mu}_2} \bar{y}^2 + C_{21}\bar{y} + C_{22}; \quad (12)$$

где $C_{11}, C_{12}, C_{01}, C_{02}, C_{21}, C_{22}$ – постоянные интегрирования.

Для определения постоянных интегрирования рассматриваем следующие граничные условия

$$\bar{u}_1(0) = 0; \bar{u}_2(1) = 0 \quad (13)$$

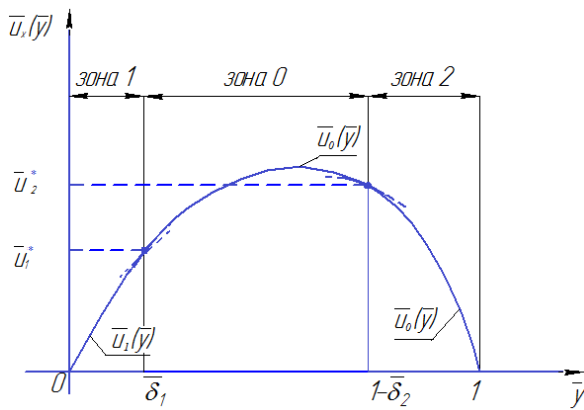


Рис. 4. К определению распределения скорости в плоской щели

и вводим согласно рис. 4 пока еще неизвестные скорости $\bar{u}_1^*, \bar{u}_2^*$

$$\bar{u}_1^* = \bar{u}_1(\bar{\delta}_1) = \bar{u}_0(\bar{\delta}_1); \quad (14)$$

$$\bar{u}_2^* = \bar{u}_2(1 - \bar{\delta}_2) = \bar{u}_0(1 - \bar{\delta}_2). \quad (15)$$

С учетом (13 – 15) получаем значения констант, после подстановки которых в (10 – 12) имеем

$$\bar{u}_1(\bar{y}) = \frac{6}{1+\bar{\mu}_1} \bar{y}(\bar{\delta}_1 - \bar{y}) + \bar{u}_1^* \frac{\bar{y}}{\bar{\delta}_1}; \quad (16)$$

$$\bar{u}_0(\bar{y}) = \bar{u}_1^* + 6\bar{\delta}_1^2 - 6\bar{y}^2 + \frac{\bar{u}_1^* - \bar{u}_2^* + 6(\bar{\delta}_1^2 - (1 - \bar{\delta}_2)^2)}{\bar{\delta}_1 - (1 - \bar{\delta}_2)} (\bar{y} - \bar{\delta}_1) \quad (17)$$

$$\bar{u}_2(\bar{y}) = \frac{6}{1+\bar{\mu}_2} (1 - \bar{y})(\bar{\delta}_2 - 1 + \bar{y}) + \bar{u}_2^* \frac{(1 - \bar{y})}{\bar{\delta}_2}; \quad (18)$$

Так как функциональная зависимость для скорости должна быть непрерывной и гладкой, то для нахождения скоростей $\bar{u}_1^*, \bar{u}_2^*$ используем условия равенства производных от скорости в точках «сшивания» профилей скорости различных зон (рис. 4)

$$\left. \frac{d\bar{u}_1}{d\bar{y}} \right|_{\bar{\delta}_1} = \left. \frac{d\bar{u}_0}{d\bar{y}} \right|_{\bar{\delta}_1}; \quad (19)$$

$$\left. \frac{d\bar{u}_2}{d\bar{y}} \right|_{1-\bar{\delta}_2} = \left. \frac{d\bar{u}_0}{d\bar{y}} \right|_{1-\bar{\delta}_2}. \quad (20)$$

Зависимости (19, 20) дают следующие уравнения

$$-\frac{6\bar{\delta}_1}{1+\bar{\mu}_1} + \frac{\bar{u}_1^*}{\bar{\delta}_1} = -12\bar{\delta}_1 + \frac{\bar{u}_1^* - \bar{u}_2^* + 6(\bar{\delta}_1^2 - (1 - \bar{\delta}_2)^2)}{\bar{\delta}_1 - (1 - \bar{\delta}_2)}; \quad (21)$$

$$\begin{aligned} & -\frac{6\bar{\delta}_2}{1+\bar{\mu}_2} + \frac{12(1-\bar{y})}{1+\bar{\mu}_2} \frac{\bar{u}_2^*}{\bar{\delta}_2} = \\ & = -12(1-\bar{\delta}_2) + \frac{\bar{u}_1^* - \bar{u}_2^* + 6(\bar{\delta}_1^2 - (1 - \bar{\delta}_2)^2)}{\bar{\delta}_1 - (1 - \bar{\delta}_2)}; \end{aligned} \quad (22)$$

Решая совместно (21) и (22), получаем

$$\bar{u}_1^* = \frac{6\bar{\delta}_1^3 \bar{\mu}_1 - 6\bar{\delta}_1^2 \bar{\mu}_1}{1+\bar{\mu}_1} - \frac{6\bar{\delta}_1 \bar{\delta}_2^2 \bar{\mu}_2}{1+\bar{\mu}_2} + 6\bar{\delta}_1(1 - \bar{\delta}_1); \quad (23)$$

$$\bar{u}_2^* = \frac{6\bar{\delta}_2^3 \bar{\mu}_2 - 6\bar{\delta}_2^2 \bar{\mu}_2}{1+\bar{\mu}_2} - \frac{6\bar{\delta}_1 \bar{\delta}_2^2 \bar{\mu}_1}{1+\bar{\mu}_1} + 6\bar{\delta}_2(1 - \bar{\delta}_2); \quad (24)$$

Подставляя (23 – 24) в (16 – 18), имеем

$$\bar{u}_1(\bar{y}) = 6\bar{y} \left(1 - \frac{\bar{\delta}_2^2 \bar{\mu}_2}{1+\bar{\mu}_2} + \frac{\bar{\delta}_1^2 \bar{\mu}_1 - 2\bar{\delta}_1 \bar{\mu}_1 - \bar{y}}{1+\bar{\mu}_1} \right); \quad (25)$$

$$\bar{u}_0(\bar{y}) = -\frac{6\bar{\delta}_1^2 \bar{\mu}_1}{1+\bar{\mu}_1} + 6\bar{y} \left(1 - \bar{y} + \frac{\bar{\delta}_1^2 \bar{\mu}_1}{1+\bar{\mu}_1} - \frac{\bar{\delta}_2^2 \bar{\mu}_2}{1+\bar{\mu}_2} \right); \quad (26)$$

$$\bar{u}_2(\bar{y}) = 6(1 - \bar{y}) \left(\frac{\bar{y} + \bar{\delta}_2^2 \bar{\mu}_2 - 2\bar{\delta}_2 \bar{\mu}_2 + \bar{\mu}_2}{1+\bar{\mu}_2} - \frac{\bar{\delta}_1^2 \bar{\mu}_1}{1+\bar{\mu}_1} \right). \quad (27)$$

Зависимости (25 – 27) дают полное распределение безразмерной скорости по размеру щели. Примеры профилей скорости, рассчитанных по данным зависимостям для случая $\bar{\delta}_2 = 2\bar{\delta}_1$ и

$\bar{\mu}_1 = 1$, $\bar{\mu}_2 = 2$, приведенные на рис. 5. Как видно, скорость течения меньше скорости, определенной по классическому расчету. Также, заметно смещение максимального значения скорости от центра зазора при неравномерном распределении вязкости.

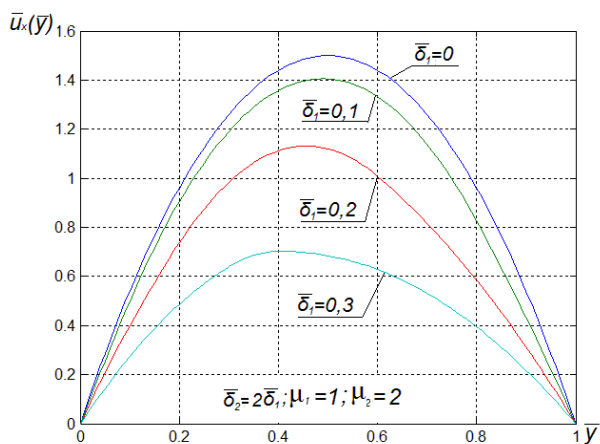


Рис. 5. Распределение скорости в щели

Введем безразмерный расход жидкости в зазоре

$$\bar{Q} = \frac{Q}{Q_0} = \frac{\int_0^\delta u_x(y) dy}{V_0 \delta}, \quad (28)$$

где Q – действительный расход в зазоре;

Q_0 – расход в зазоре по классическому расчету.

Нетрудно убедиться, что величина $\bar{Q}$ есть соотношение между значением расхода, определенным с учетом скачкообразного граничного изменения вязкости, и значением расхода, определенным по классическому расчету. Величину $\bar{Q}$ можно также рассматривать как падение пропускной способности проходного сечения микрозазора.

Учитывая (3, 5), вместо (28) имеем

$$\bar{Q} = \int_0^1 \bar{u}_x(\bar{y}) d\bar{y} \quad (29)$$

или, рассматривая интеграл (29) по зонам (рис. 4),

$$\bar{Q} = \int_0^{\bar{\delta}_1} \bar{u}_1(\bar{y}) d\bar{y} + \int_{\bar{\delta}_1}^{1-\bar{\delta}_2} \bar{u}_0(\bar{y}) d\bar{y} + \int_{1-\bar{\delta}_2}^1 \bar{u}_2(\bar{y}) d\bar{y}. \quad (30)$$

Подставив (25-27) в (30), получаем следующее выражение для определения падения пропускной способности проходного сечения

$$\bar{Q} = 1 - \bar{\mu}_1 \bar{\delta}_1^2 \frac{3-2\bar{\delta}_1}{1+\bar{\mu}_1} - \bar{\mu}_2 \bar{\delta}_2^2 \frac{3-2\bar{\delta}_2}{1+\bar{\mu}_2}. \quad (31)$$

Необходимо отметить, что при $\bar{\mu}_1, \bar{\mu}_2 \rightarrow 0$ или $\bar{\delta}_1, \bar{\delta}_2 \rightarrow 0$ выражение (31) дает $\bar{Q} = 1$, т.е. имеется явный предельный переход к классическому расчету течения вязкой несжимаемой жидкости в микрозазоре.

Более общий анализ влияния скачкообразного увеличения вязкости можно сделать, если рассмотреть течение в плоской щели между стенками из однородных материалов. В этом случае имеем одно значение размера приграничной зоны и величины приграничного скачка вязкости

$$\bar{\delta} = \bar{\delta}_1 = \bar{\delta}_2; \quad (32)$$

$$\bar{\mu} = \bar{\mu}_1 = \bar{\mu}_2. \quad (33)$$

Ввиду появляющейся при этом симметрии распределения скорости зависимости (25–27) записываем для половины размера щели

$$\bar{u}(\bar{y}) = \begin{cases} 6\bar{y} \left(1 - \frac{2\bar{\delta}\bar{\mu} + \bar{y}}{1+\bar{\mu}} \right), & 0 \leq \bar{y} < \bar{\delta}; \\ 6\bar{y}(1-\bar{y}) - \frac{6\bar{\mu}\bar{\delta}^2}{1+\bar{\mu}}, & \bar{\delta} \leq \bar{y} \leq 0,5. \end{cases} \quad (34)$$

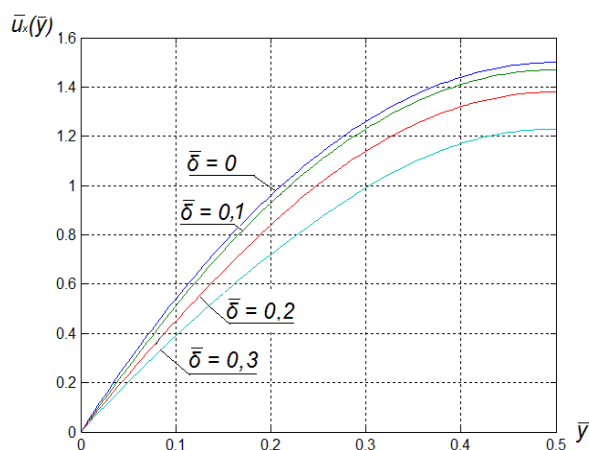


Рис. 6. Полупрофиль скорости в щели между стенками из однородных материалов

Примеры расчета распределений скорости для $\bar{\mu} = 1$ при различных значениях $\bar{\delta}$ приведены на рис. 6.

На основании (32) и (33) получаем следующее выражение для падения пропускной способности проходного сечения плоской щели

$$\bar{Q} = 1 - 2\bar{\mu}\bar{\delta}^2 \frac{3-2\bar{\delta}}{1+\bar{\mu}}. \quad (35)$$

Примеры расчета зависимости падения пропускной способности проходного сечения от размера приграничной зоны при различных значениях скачка вязкости показаны на рис. 7. Примеры расчета зависимости падения пропускной способности проходного сечения от приграничного

скачка вязкости при различных размерах приграничной зоны представлены на рис. 8.

Анализ полученных результатов показывает, что скачкообразное граничное увеличение динамической вязкости однозначно приводит к падению пропускной способности проходного сечения микрозора. Также можно считать, что падение расхода для плоской щели составляет не более 5% при $\bar{\delta} < 0,1$ и $\bar{\mu} < 4$, а для расчета течения вполне применимы известные зависимости [1, 2].

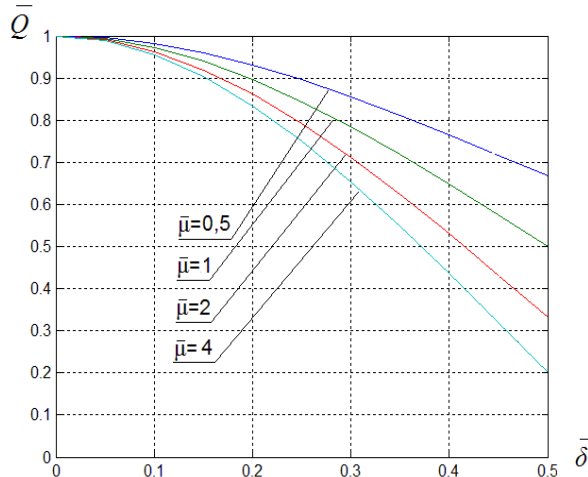


Рис. 7. Падение пропускной способности в зависимости от размера приграничного слоя с повышенной вязкостью

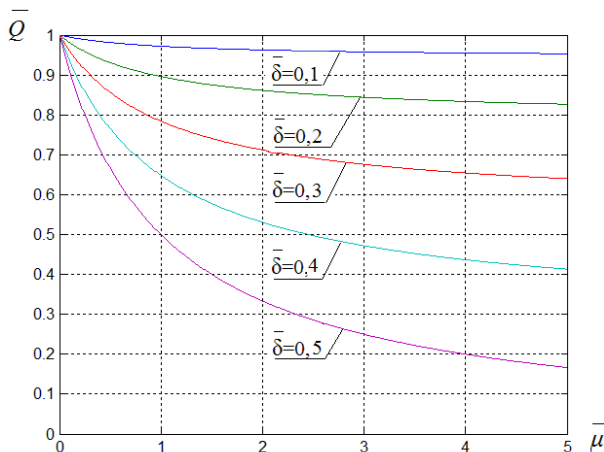


Рис. 8. Падение пропускной способности в зависимости от скачка вязкости

Выводы. Проведены исследования течения вязкой несжимаемой жидкости в микрозорах гидравлических устройств и аппаратов с учетом скачкообразного граничного увеличения вязкости вблизи твердой поверхности. На примере плоской щели установлены зависимости для расчета падения пропускной способности проходного сечения.

Л и т е р а т у р а

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Лойцянский Л.Г. // – М.: Наука, 1987. – С.840.

2. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика [Текст] / Емцев Б.Т. // – М.: Машиностроение, 1987. – С.440.
3. Дерягин Б.В. Поверхностные силы [Текст] / Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. // – М.: Наука, 1983. – С.399.
4. Дерягин Б.В. Смачивающие пленки [Текст] / Дерягин Б.В., Чураев Н.В. // – М.: Наука, 1984. – С.160.
5. Бондаренко Н.Ф. Соотношение между сдвиговой прочностью жидкостей в объеме и ограниченных слоях. Бондаренко Н.Ф. / Бондаренко Н.Ф., Нерпин С.В. Сб. Поверхностные силы в тонких пленках и дисперсных системах. – М.: Наука, 1972. – С. 281 – 289.
6. Листров А.Т. О модели вязкой жидкости с несимметричным тензором напряжений [Текст] / Листров А.Т. // Прикладная математика и механика. – 1967. – Вып. 31. - № 1. – С.112 – 115.
7. Cosserat E., Cosserat F. Teoretie des corps deformables. [Text] – Paris: Herman, 1909. – 226 p.

References

1. Loitsianskyi L.H. Mekhanyka zhydkosti y haza [Tekst] / Loitsianskyi L.H. // – М.: Nauka, 1987. – С.840.
2. Emtsev B.T. Tekhnicheskaia hydromekhanyka [Tekst] / Emtsev B.T. // – М.: Mashynostroenye, 1987. – С.440.
3. Deriahyn B.V. Poverkhnostnye sylu [Tekst] / Deriahyn B.V., Churaev N.V., Muller V.M. // – М.: Nauka, 1983. – С.399.
4. Deriahyn B.V. Smachyvaiushchye plenky [Tekst] / Deriahyn B.V., Churaev N.V. // – М.: Nauka, 1984. – С.160.
5. Bondarenko N.F. Sootnoshenye mezhdru sdvyhovoii prochnosti zhydkosti v obueme y ohranychennukh sloiakh. Bondarenko N.F. / Bondarenko N.F., Nerpyn S.V. Sb. Poverkhnostnye sylu v tonkykh plenках y dyspersnykh systemakh. – М.: Nauka, 1972. – С. 281 – 289.
6. Lystrov A.T. O modely viazkoi zhydkosti s nessymetrychnum tenzorom napriazheniy [Tekst] / Lystrov A.T. // Prykladnaia matematyka y mekhanyka. – 1967. – Vup. 31. - # 1. – С.112 – 115.
7. Cosserat E., Cosserat F. Teoretie des corps deformables. [Text] – Paris: Herman, 1909. – 226 r.

Соколов В.І., Рассказова Ю.Б. Дослідження течії рідини в микрозорах з граничною зміною в'язкості.

Досліджена течія нестисливої в'язкої рідини в микрозорах гідрравлічних пристроїв і апаратів з урахуванням стрибкоподібної граничної зміни в'язкості. Для прийнятої моделі розподілу динамічної в'язкості проінтегровані рівняння руху рідини, на основі чого отримані вирази для швидкості рідини по висоті зазору. Отримані залежності для розрахунку падіння пропускної спроможності проходного перетину. Приведені приклади розрахунку розподілів швидкості та падіння пропускної спроможності для плоскої щілини. Виконана оцінка границь застосування класичного підходу до розрахунку течії в'язкої рідини в микрозорі.

Ключові слова: динамічна в'язкість, рідина, тиск, витрата, розподіл швидкості.

Sokolov V.I., Rasskazova Yu.B. Modeling of fluid flow in microgaps with the boundary change of viscosity.

The flow of an incompressible viscous fluid in microgap of the hydraulic equipment and vehicles considering the abrupt change in the boundary viscosity is observed. Relations

for the calculation of the decreasing of the throughput flow area is offered.

Keywords: *dynamic viscosity of the fluid, pressure, flow, velocity distribution.*

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

Рассказова Юлія Борисівна – аспірант кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк)
urass.snu.edu@gmail.com

Рецензент: д.т.н., проф. **Марченко Д.М.**

Стаття подана 23.09.2016

УДК 621.9.06

3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГООПЕРАЦИОННОГО СТАНКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕНДЕРИНГА

Кроль О.С., Лисица С.Н.

3D-MODELLING MULTYOPERATION TOOL USING RENDERING

Krol O., Lysytsa S.

Рассмотрены процедуры построения трехмерных моделей обрабатывающего центра СФ68ВФЗ, с использованием, интегрированной САПР КОМПАС-3D. Представлен инструментарий создания фотореалистического изображения как самого обрабатывающего центра, так и его формообразующих узлов в модуле Artisan Rendering, интегрированном в систему КОМПАС-3D.

Ключевые слова: обрабатывающий центр, угловая головка, вертикальная головка, твердотельная модель, САПР КОМПАС, модуль Artisan Rendering.

1. Введение. В практике станкостроения эффективно используются интегрированные САПР, к которым относится CAD/CAM/PDM КОМПАС-3D [1, 2]. В последних версиях система КОМПАС интегрирует в свой состав CAD/CAE/PDM APM WinMachine, оснащенную собственным параметризатором и модулем исследования напряженно-деформированного состояния APM FEM, использующим метод конечных элементов. [3].

Преимуществом современных систем 3D-моделирования, является возможность оперативной разработки компоновок достаточно сложного станочного оборудования, в том числе и трехмерном варианте. Конкурентоспособность будущего изделия повышается, если потенциальному заказчику предъявляется фотореалистическая визуализация будущей конструкции. Для продвижения будущего изделия на рынок машиностроения необходима быстрая и успешная его презентация, в которой немаловажную роль играет использование эффектных изображений его внешнего вида и дизайна.

2. Анализ последних исследований и публикаций. Одним из вариантов внедрения процедуры визуализации трехмерной графики является применение системы Artisan Rendering,

созданной английской компанией Lightworks. Это приложение эффективно интегрировано с системой КОМПАС-3D и позволяет получать высококачественные фотореалистические изображения изделия одновременно с выпуском конструкторской документации. Оно способно быть инструментарием для анализа внешнего вида будущего изделия, дает возможность подобрать материалы с учетом расцветки, фактуры, с последующей обратной связью в процессе корректировки геометрии изделия в целях совершенствования внешнего вида.

Обрабатывающие центры можно разделить на три группы [6]:

- для обработки корпусных деталей;
- для обработки тел вращения;
- с выполнением разнородных переходов и оригинальной компоновкой.

Станки первой группы с главным движением – вращением инструмента – это станки для обработки корпусных деталей, которые имеют компоновку вертикальных, горизонтальных и продольно-обрабатывающих станков. Они выполняют сверление, зенкерование, развертывание, расточку, нарезание резьбы, подрезку торцов, фрезерования плоскостей и контуров. На многих станках выполняются токарные работы, а при наличии высокоскоростного шпинделя – шлифовальные. Некоторые станки оснащены устройствами для глубокого сверления, долбления и строгания.

Станки вертикального типа (со шпинделем, расположенным вертикально) предназначены для обработки плоских деталей с одной стороны: кондукторных плит, планок, крышек и т.п.

Станки горизонтального типа служат для обработки с нескольких сторон деталей, имеющих большое число гладких, ступенчатых и резьбовых отверстий, сложных контуров, плоских поверхностей.

Целью данной работы является повышение эффективности процедур проектирования металлорежущих станков, типа обрабатывающий центр, за счет построения твердотельных моделей их конструкций и рендеринга в среде модуля Artisan Rendering [4].

3. Материалы и результаты исследования. В качестве исследуемого изделия рассматривается обрабатывающий центр фрезерно-сверлильно-расточной группы на базе модели СФ68ВФ3 [5].

Станок СФ68ВФ4 отличается такой компоновкой, которая включает как горизонтальный, так и вертикальный шпиндельный узел. Разработанная 3D-модель станка представлена на (рис. 1) [7]. Конструктивно данным станок монтируется на чугунном основании, где закреплена колонна, на которой монтируются все основные части станка.

По горизонтальным направляющим колонны перемещается бабка шпиндельная (ось "Z"), к которой крепится вертикальная головка или дополнительные устройства и приспособления.

Головка вертикальная крепится к шпиндельной бабке четырьмя винтами и центрируется при помощи двух конических штырей и втулок.

Вертикальный шпиндель смонтирован в гильзе, имеющей перемещение в корпусе, получающей вращение через коническую пару и кулачковую муфту. Наибольший ход пиноли 90 мм. Зажим пиноли осуществляется с четырех сторон, с помощью зажимных секторов посредством вращения рукоятки. Для силовых режимов работы применяется блокировка пиноли зубчатым фиксатором в пределах шага рейки – 4,166 мм. Благодаря наличию Т-образного паза в переходной плите головка поворачивается на 90° в обе стороны. Установка головки в нужное положение осуществляется штифтом. Отверстие под штифт должно быть всегда чистым, при черновой обработке обязательно удалить фиксирующий штифт.

Для точной установки головки в вертикальном положении используется контрольная оправка, вставляемая и зажата в конусном отверстии шпинделя, и стрелочный индикатор. Зажим и разжим инструмента осуществляется гидрофицированным механизмом, закрепляемым на задней части шпинделя. Инструмент зажимается в рабочем шпинделе пакетом тарельчатых пружин. Следовательно, зажим осуществляется механически, причем инструмент остается закрепленным даже в случае отказа гидравлики. Разжим происходит при подаче давления в полость цилиндра при не вращающемся шпинделе. В период разжима происходит разгрузка подшипников шпинделя от усилия необходимого для сжатия пакета тарельчатых пружин, чем обеспечивается точность и долговечность подшипников.

По вертикальным направляющим колонны перемещается суппорт (ось "Y"), а по его горизонтальным направляющим основной вертикальный стол (ось "X"), к которому крепится, в зависимости от комплектации, жесткий угловой

стол или поворотный стол для установки на них обрабатываемых деталей.

В верхней части колонны с левой стороны находится съемник, на котором устанавливается вертикальная головка в не рабочем положении. Слева, у основания, размещен бак СОЖ с электронасосом, справа, на колонне, закреплена станция смазки. Пульт управления крепится посредством поворотного кронштейна к основанию. Комплект шкафов (шкаф гидроаппарата, приводов и электроавтоматики) закреплены непосредственно на задней стенке колонны.

Исследуемый станок оснащен дополнительной модульной оснасткой, которая включает: угловую шпиндельную головку, долбежную головку и хобот с установленным пакетом дисковых модульных фрез.

Угловая головка входит в комплект поставки проектируемого оборудования, позволяет расширить технологические возможности фрезерно-сверлильно-расточных станков. Угловая головка предназначена для обработки в труднодоступных участках заготовок плоскостей, уступов и пазов. Она обеспечивает высокопроизводительную обработку при частотах вращения шпинделя до 4000 мин⁻¹ с возможностью угла поворота шпинделя на 360° в горизонтальной плоскости. Вращательное движение от вертикального шпинделя на шпиндель головки угловой передается через коническую пару с передаточным числом $u = 1$.

На рис. 2 представлены угловая и вертикальная головки в 3D-исполнении.

Рендеринг обрабатывающего центра осуществим в модуле Artisan Rendering, представляющий собой инструмент создания фото реалистических изображений машиностроительных изделий и строительных объектов, спроектированных в системе КОМПАС-3D. Возможности программы позволяют комбинировать материалы и освещение, фон и сцену и буквально в несколько действий получать на основе трехмерной модели высококачественное изображение. С помощью Artisan Rendering пользователь КОМПАС-3D сможет самостоятельно сформировать точный внешний вид объекта проектирования задолго до выпуска опытного образца. Рассмотрим процедуру реализации создания фотореалистического изображения на примере рендеринга угловой головки:

1. В открытом окне модуля Artisan Rendering необходимо выбрать стиль модели, называемый «Продукт» (рис. 3).

2. Вставка модели из системы КОМПАС-3D. При этом исходная модель помещается в окне рендера, цвет и материалы которой соответствуют назначенным ранее при создании модели в КОМПАС-3D (рис. 4). Возможные ошибки которые могут появиться в сборке можно исправить с помощью опции *Геометрия*, команда *Скрыть* (рис. 5).

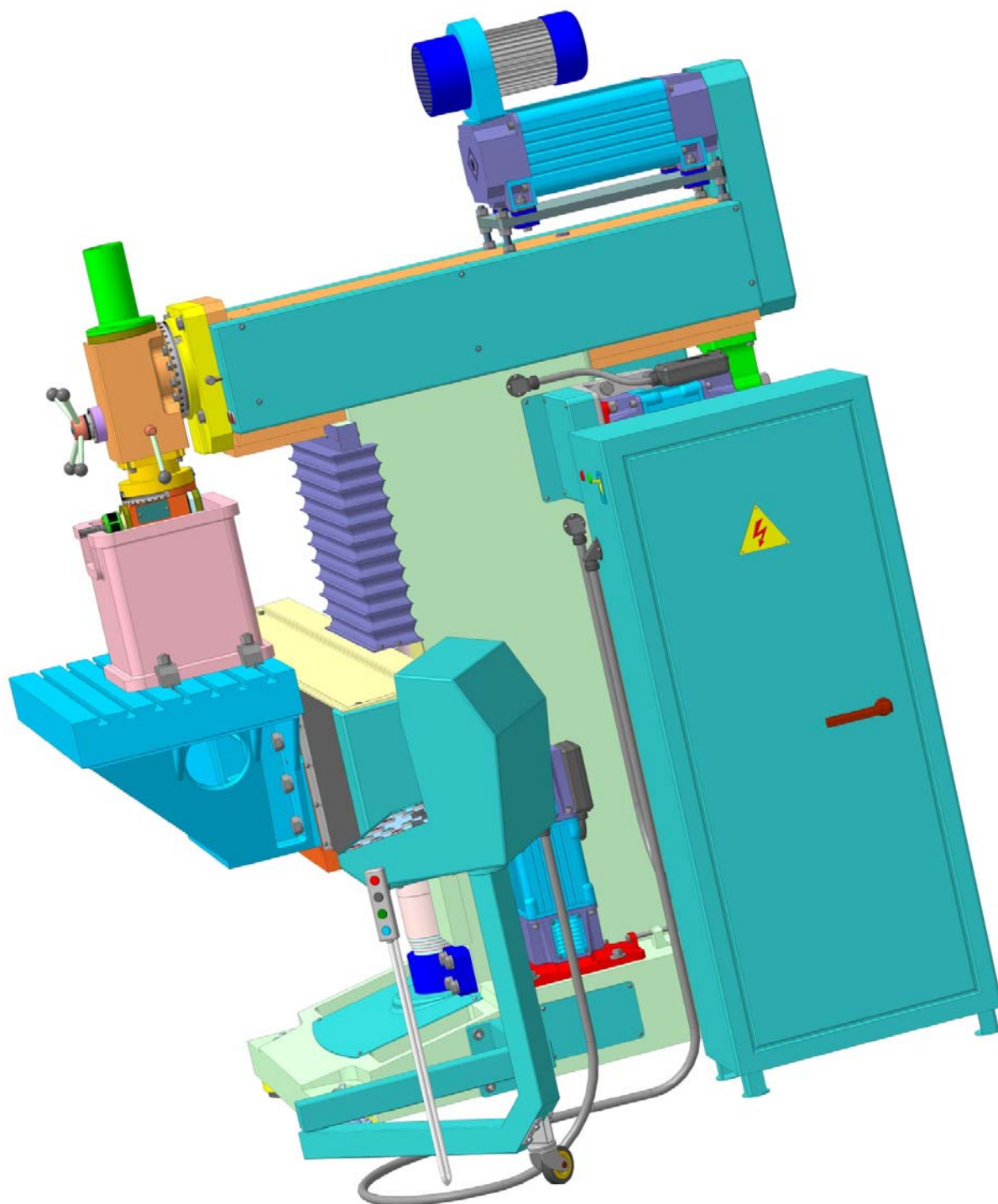


Рис. 1. 3D-модель обрабатывающего центра модели СФ68ВФ3

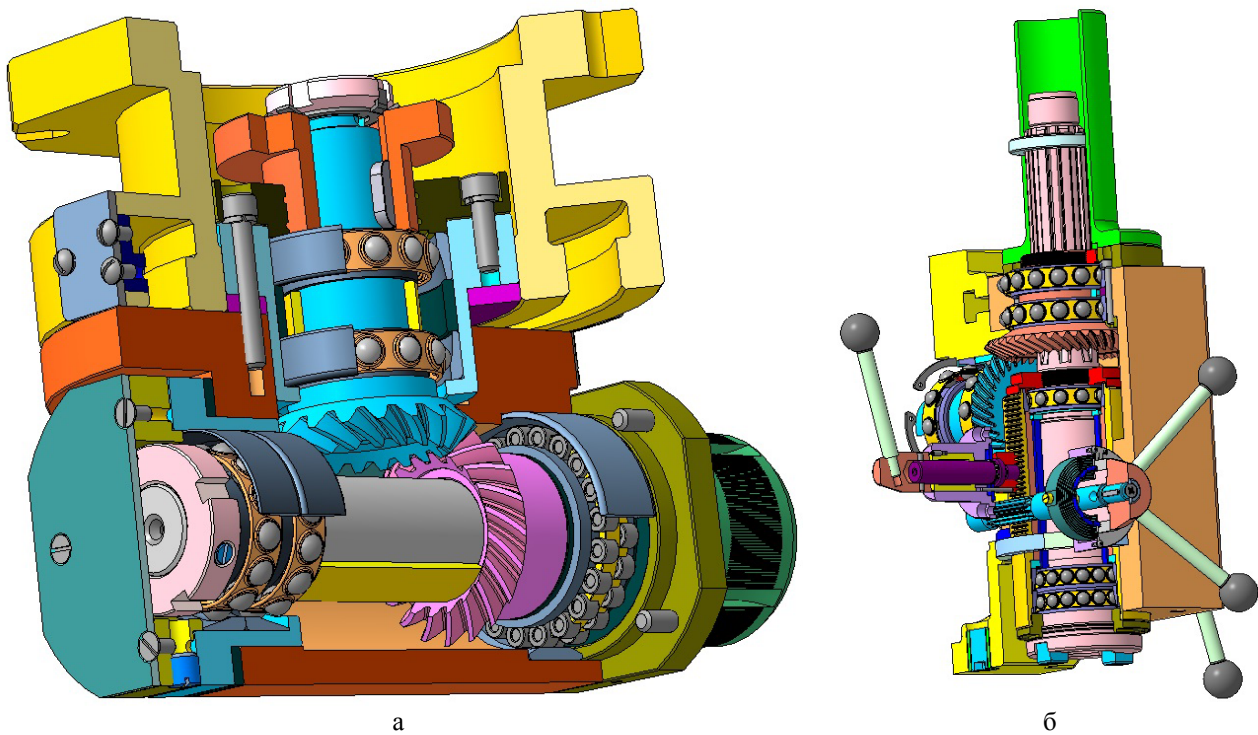


Рис. 2. 3D-модели шпиндельных головок: а – угловая; б – вертикальная

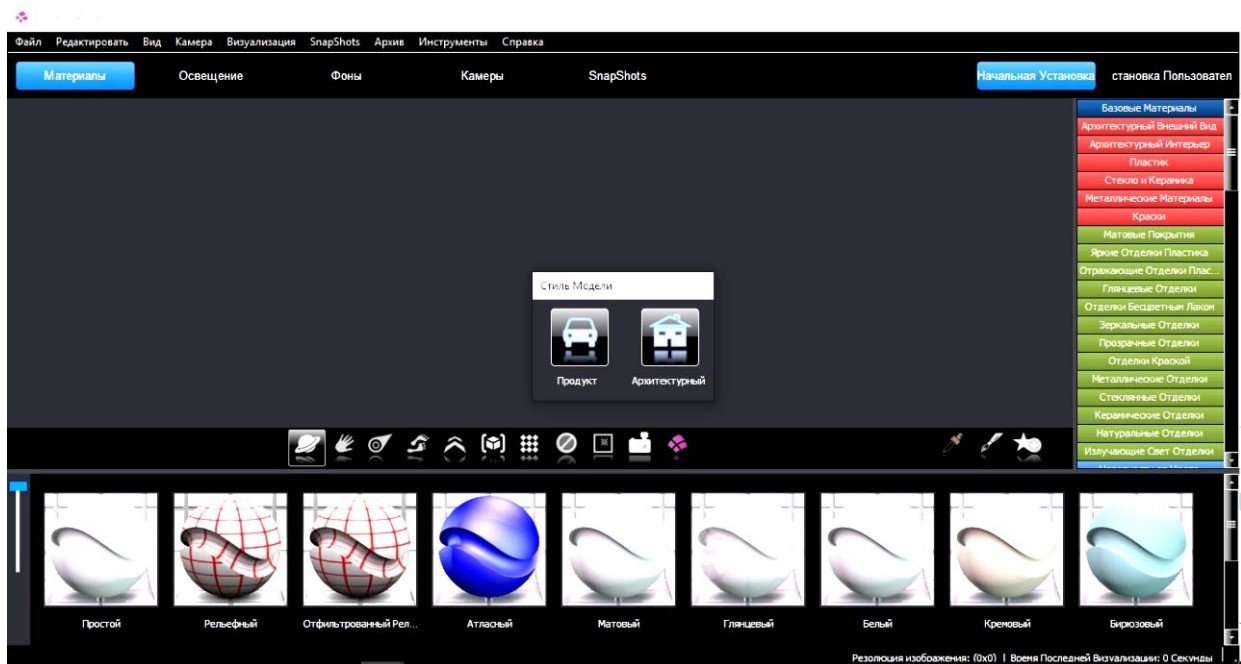


Рис. 3. Окно выбора стиля модели

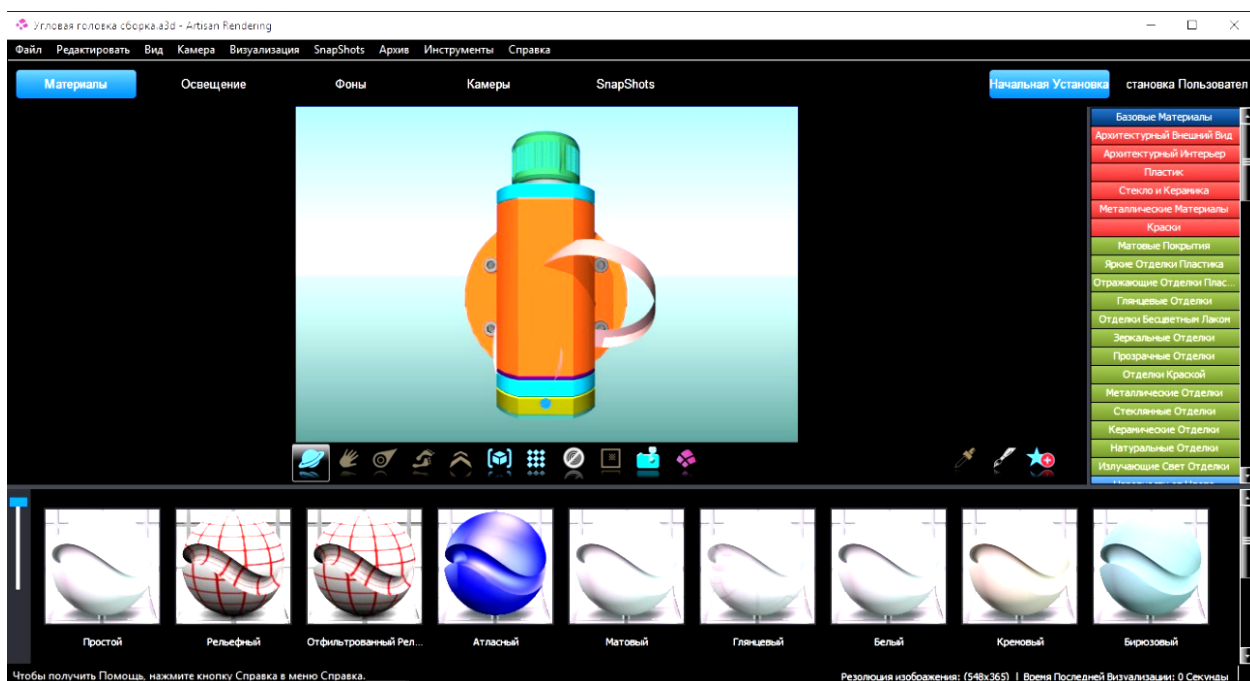


Рис. 4. Исходная модель угловой головки

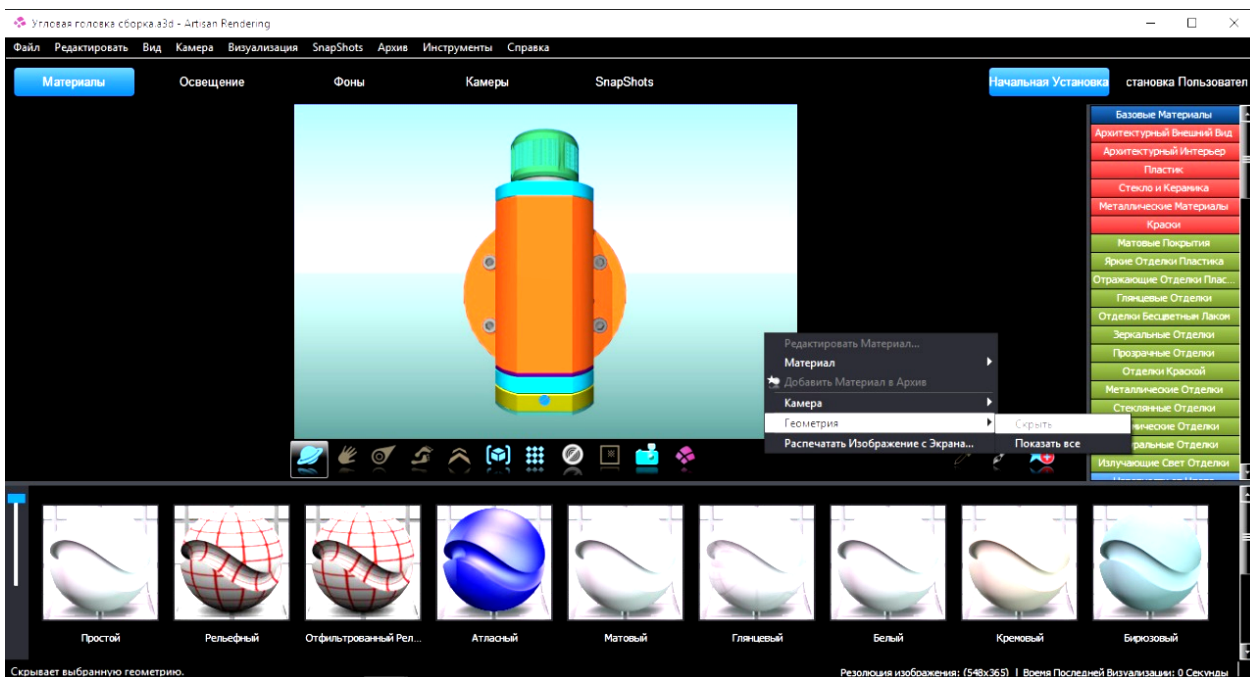


Рис. 5. Улучшение исходной модели

Приложение Artisan Rendering способно не только выдавать готовые изображения, но и выступает инструментом для принятия решений о внешнем виде будущего изделия, помогает

правильно подобрать материалы с точки зрения дизайна, подобрать цвета, фактуры.

На рис. 6 показан вариант конструкции угловой головки с изменением материала и цвета

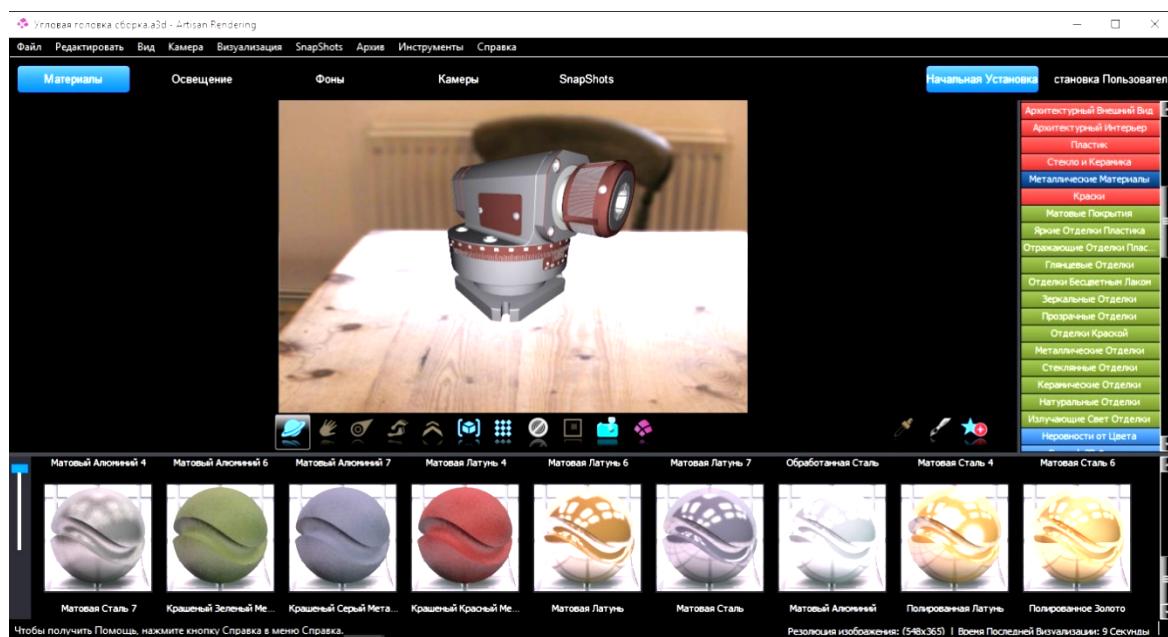


Рис. 6. Рендеринг угловой головки с изменением материалов и цвета

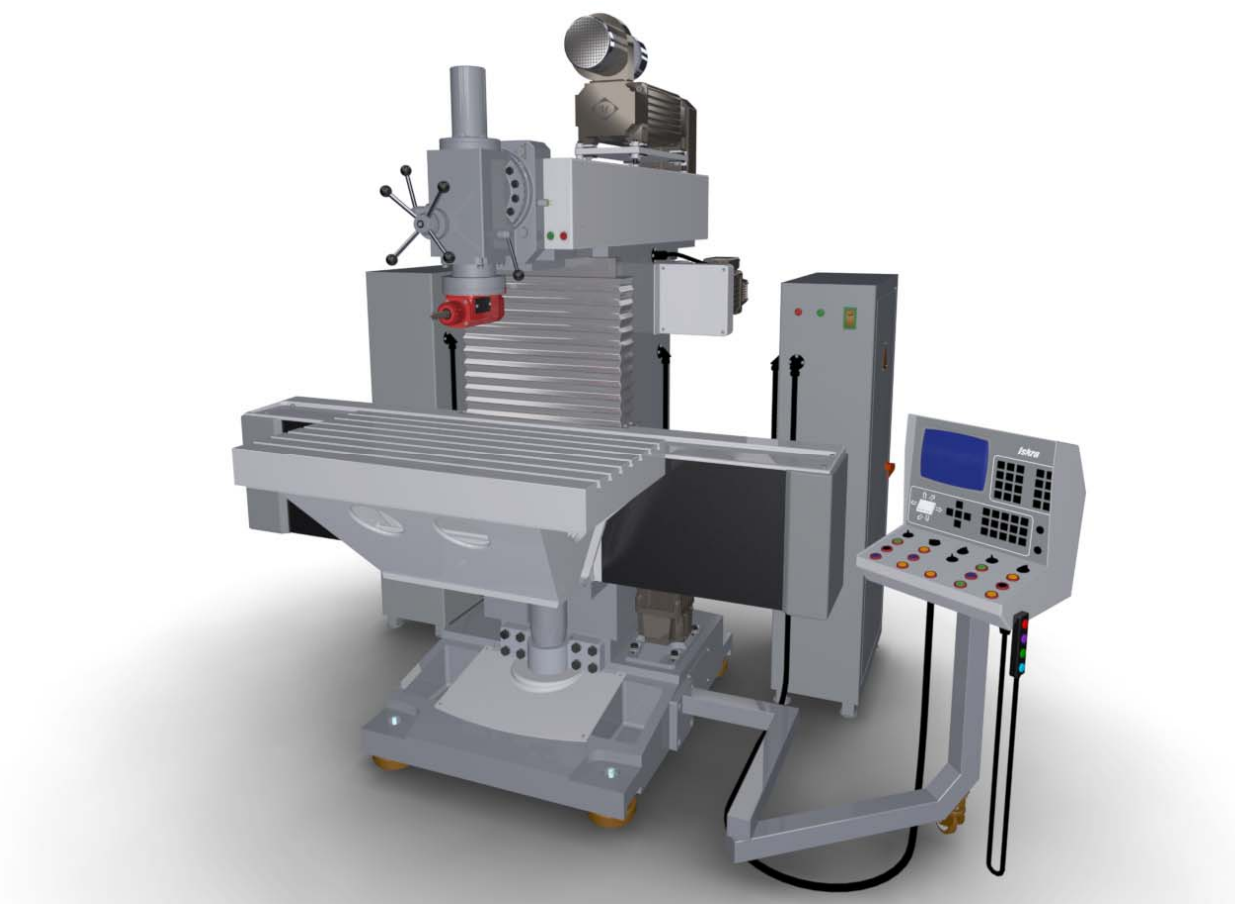


Рис. 7. Рендеринг обрабатывающего центра модели СФ68ВФ4

Для формирования фотореалистического вида изделия Artisan Rendering имеет возможности настройки таких параметров, как материалы составных частей изделия, а также настройки сцены визуализации, которая включает в себя управление параметрами освещения, параметрами камеры и выбор фона. Не менее широкие возможности и по формированию пользовательских материалов за счет выбора фактуры, рельефа и цвета, включая возможность добавления пользовательских текстур.

На рис. 7 представлен рендеринг конструкции обрабатывающего центра модели СФ68ВФ4 в модуле Artisan Rendering

Аналогичным путем выполнен рендеринг угловой (рис. 8) и вертикальной (рис. 9) шпиндельных головок в модуле Artisan Rendering.



Рис. 8. Рендеринг угловой головки



Рис. 9. Рендеринг вертикальной шпиндельной головки

Выводы. 1. Проведена комплексная процедура 3D-моделирования конструкции обрабатывающего центра фрезерно-сверлильного-расточного типа второго типоразмера модели СФ68ВФ3 с использованием функциональных возможностей параметризации и прикладных библиотек в САПР КОМПАС-3D.

2. Построена 3D-модель станка и его формообразующих узлов в системе КОМПАС-3D, дающая реальное представление о конструкции и являющаяся основой для проектных расчетов и исследования работоспособности станка.

3. Выполнено фотореалистическое представление конструкции станка и его формообразующих узлов в модуле Artisan Rendering.

Л и т е р а т у р а

1. Ганин Н.В. Трехмерное проектирование в КОМПАС-3D [Текст] / Н. В. Ганин. – М.: ДМК, 2012. – 776 с.
2. Фомин Е.П. Использование параметрических возможностей КОМПАС-3D/САПР и графика, №10, 2007. – с.70-74.
3. Магомедов А. Интегрированный конечно-элементный анализ в КОМПАС-3D / А. Магомедов, А. Алевин // CAD/CAM/CAE observer. – 2010. – #8(60). – С. 1-5.
4. Платонов Л. Смотрим на модели любимой CAD-системы КОМПАС-3D по новому/Л. Платонов. – Санкт-Петербург: Изд-во АСКОН, №1(8), 2012. – С. 16 – 20.
5. Krol O. Modeling of construction spindle's node machining centre/ Krol O, Osipov V.//TEKA Com. Mot. and Energ. in Agriculture. – OL PAN, 2013, Vol.13, No 3, Lublin, Poland. – P. 108 – 113.
6. Металлорежущие станки. В 2 т. / Т.М. Аврамова, В.В. Бушуев, Л.Я. Гиловой и др. ; под ред. В.В. Бушуева. Т. 1. – М.: Машиностроение, 2012. – 608 с.
7. 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 СНУ ім. В.Далі, 2015. – 120 с.

R e f e r e n c e s

1. Ganin N.V. Trehmernoe proektirovanie v KOMPAS-3D [Tekst] / N. V. Ganin. – M.: DMK, 2012. – 776 p.
2. Fomin E.P. Ispol'zovanie parametricheskikh vozmozhnostej KOMPAS-3D/SAPR i grafika, №10, 2007. – P.70-74.
3. Magomedov A. Integrirovannyj konechno-jelementnyj analiz v KOMPAS-3D / A. Magomedov, A. Alehin // CAD/CAM/CAE observer. – 2010. – #8(60). – P 1-5.
4. Platonov L. Smotrim na modeli ljubimoj CAD-sistemy KOMPAS-3D po novomu/L. Platonov. – Sankt-Peterburg: Izd-vo ASKON, №1(8), 2012. – P. 16 – 20.
5. Krol O. Modeling of construction spindle's node machining centre/ Krol O, Osipov V.//TEKA Com. Mot. and Energ. in Agriculture. – OL PAN, 2013, Vol.13, No 3, Lublin, Poland. – P. 108 – 113.
6. Metallorazhushhie stanki. V 2 t. / T.M. Avramova, V.V. Bushuev, L.Ja. Gilovoj i dr. ; pod red. V.V. Bushueva. T. 1. – M.: Mashinostroenie, 2012. – 608 p.
7. Krol O.S. Metody i procedury 3D-modelirovaniya metallorazhushhih stankov i instrumentov. Monografija. ISBN 978-617-11-0049-7/ O.S. Krol'. - Severodonec'k: Vid-vo SNU im. V.Dalja, 2015. – 120 p.

Кроль О.С., Лисиця С.М. 3D-модельовання багатоопераційного верстата з використанням рендеринга

Розглянуто процедури побудови тривимірних моделей обробного центру СФ68ВФ3 з використанням, інтегрованої САПР КОМПАС-3D. Представлений інструментарій створення фотореалістичного зображення як самого обробного центру, так і його формотворчих вузлів в модулі Artisan Rendering, інтегрованому в систему КОМПАС-3D.

Ключові слова: обробний центр, кутова головка, вертикальна головка, твердотільна модель, САПР КОМПАС, модуль Artisan Rendering.

Krol O.S., Lysytsa S.N. 3D-modelling multyoperation tool using rendering

The procedure of constructing three-dimensional models of the machining center SF68VF3 using integrated CAD KOMPAS-3D is considered. The tools create photorealistic images of both the machining center, and his formative

components in the module Artisan Rendering, integrated in KOMPAS-3D system are presented.

Keywords: machining center, angle head, vertical head, solid model, CAD KOMPAS module Artisan Rendering

Кроль Олег Соломонович – к.т.н., доц., професор кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк). krolos@yandex.ru
Лисиця Сергій Миколайович – студент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк).

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

Стаття подана 15.09.2016

УДК 621.9.06

3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ОСНАСТКИ ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕНДЕРИНГА

Кроль О.С., Лисица С.Н.

3D-MODELLING INSTRUMENTAL EQUIPMENT MULTYOPERATION TOOL USING RENDERING

Krol O., Lysytsa S.

Рассмотрены процедуры построения трехмерных моделей инструментальной оснастки обрабатывающих центров фрезернодверильно-расточного типа с использованием, интегрированной САПР КОМПАС-3D. Представлен инструментарий создания фотореалистического изображения как инструментального магазина и автооператора, так и комплектов режущего инструмента в модуле Artisan Rendering, интегрированном в систему КОМПАС-3D.

Ключевые слова: инструментальная оснастка, автооператор, режущий инструмент, твердотельная модель, САПР КОМПАС, модуль Artisan Rendering

1. Введение. Широкое применение обрабатывающих центров в машиностроении связано с возможностью обеспечить комплексную обработку сложных деталей с разных сторон без их перебазирования с применением автоматической смены инструмента. Эти станки выпускают для обработки корпусных заготовок методами сверления, зенкования, развертывания, растачивания, нарезания резьбы, фрезерования плоских поверхностей и контуров. Как известно производительность обрабатывающих центров в 3 – 8 раз выше, чем у обычных станков за счет резкого сокращения вспомогательного времени и тем самым увеличения доли машинного времени до 60 – 70 % в общем цикле обработки. Вспомогательное время уменьшается за счет автоматической смены инструмента, скоростного позиционирования рабочих органов станка и т.д. В современных станках время переналадки еще более уменьшается вследствие применения сменных инструментальных магазинов с заранее налаженным на размер режущим инструментом. Машинное время обработки снижается за счет интенсификации и оптимизации режимов резания, применения

современных высокопроизводительных режущих инструментов.

Вместе с тем, проектирование инструментальной системы для оснастки обрабатывающих центров представляет собой комплексную задачу. Разработка конструкторской документации (чертежей, спецификаций, схем) инструментальной оснастки многооперационных станков (обрабатывающих центров) является трудоемким и затратным процессом, занимающим значительное время. Наличие 3D-моделирования с принципом ассоциативности позволяет сгенерировать любые необходимые виды и разрезы, то есть сформировать основные чертежи, получить исходные данные для расчетов и смежных задач. И что самое важное, корректно построенная модель позволяет получать абсолютно точные перечни оборудования, изделий и материалов, используемых в этой модели, спецификации, ведомости материалов. Для реализации 3D-моделирования инструментальной оснастки используется быстро прогрессирующая система КОМПАС-3D с технологией комплексного сквозного 3D-проектирования и рендеринга, разработанная группой компаний АСКОН [1 – 3].

2. Анализ последних исследований и публикаций. Одним из вариантов внедрения процедуры визуализации трехмерной графики является применение системы Artisan Rendering, созданной английской компанией Lightworks. Это приложение эффективно интегрировано с системой КОМПАС-3D и позволяет получать высококачественные фотореалистические изображения изделия одновременно с выпуском конструкторской документации. Оно способно быть инструментарием для анализа внешнего вида будущего изделия, дает возможность подобрать

материалы с учетом расцветки, фактуры, с последующей обратной связью в процессе корректировки геометрии изделия в целях совершенствования внешнего вида.

Обрабатываемые центры можно разделить на три группы [6]:

- для обработки корпусных деталей;
- для обработки тел вращения;
- с выполнением разнородных переходов и оригинальной компоновкой.

Станки первой группы с главным движением – вращением инструмента – это станки для обработки корпусных деталей, которые имеют компоновку вертикальных, горизонтальных и продольно-обрабатывающих станков. Они выполняют сверление, зенкерование, развертывание, расточку, нарезание резьбы, подрезку торцов, фрезерования плоскостей и контуров. На многих станках выполняются токарные работы, а при наличии высокоскоростного шпинделя – шлифовальные. Некоторые станки оснащены устройствами для глубокого сверления, долбления и строгания.

Станки вертикального типа (со шпинделем, расположенным вертикально) предназначены для обработки плоских деталей с одной стороны: кондукторных плит, планок, крышек и т.п.

Станки горизонтального типа служат для обработки с нескольких сторон деталей, имеющих большое число гладких, ступенчатых и резьбовых отверстий, сложных контуров, плоских поверхностей.

Целью данной работы является совершенствование процедур проектирования инструментальной оснастки для оборудования типа обрабатывающий центр, за счет построения твердотельных моделей их конструкций и рендеринга в среде модуля Artisan Rendering.

2. Материалы и результаты исследования. Под инструментальной системой (системой инструментальной оснастки) для автоматизированного оборудования понимается комплекс, состоящий из инструментальных магазинов, устройств смены инструмента, режущего и вспомогательного инструмента, а также приспособлений для их настройки.

В общем случае устройства Автоматической Смены Инструмента (АСИ) многооперационных станков состоят из следующих компонентов [3]: инструментальных магазинов, являющихся накопителями инструмента (блоков режущего и вспомогательного инструмента для инструментальных шпинделей); инструментальных манипуляторов, предназначенных для смены инструмента в шпинделе станка; промежуточных транспортных манипуляторов, предназначенных для передачи инструмента от магазина к инструментальным манипуляторам или к промежуточным позициям – накопителям инструмента.

Используются три типа устройств АСИ: для смены шпиндельного узла; для смены инструмента в шпинделе станка и комбинированные.

На рис. 1 представлен разработанный в [4] дисковый инструментальный магазин для обрабатывающего центра СВМ1Ф4 (рис. 1, а) и автооператор для смены инструмента (рис. 1, б)

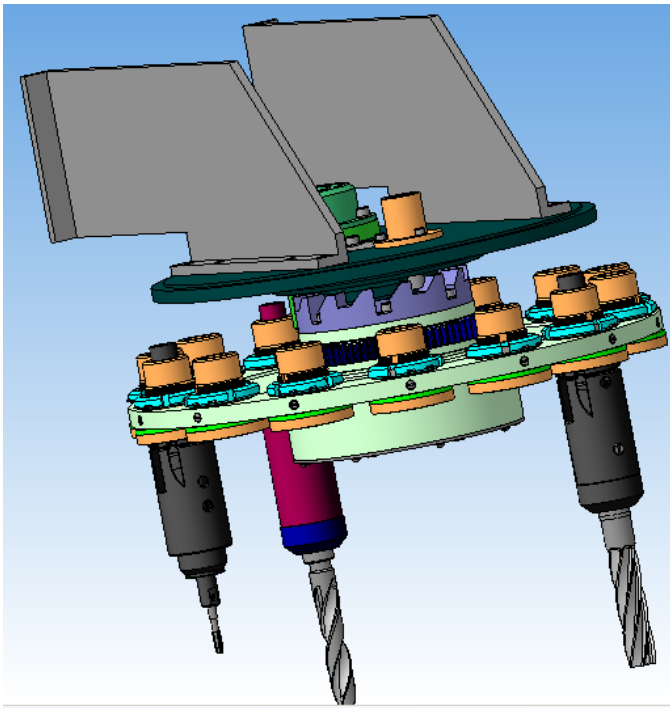
Так в специализированном вертикальном фрезерно-сверлильном станке с ЧПУ модели СФ16МФ3 используется шестишпиндельная револьверная головка (ШРГ), в которой инструменты устанавливаются в требуемой последовательности обработки заготовки, а автоматическая смена инструмента осуществляется расфиксацией, поворотом и фиксацией револьверной головки. В работе [5, 6] построены 3D-модели ШРГ и соответствующей инструментальной оснастки.

На рис.2 представлена трехмерная модель ШРГ, построенная в системе КОМПАС-3D.

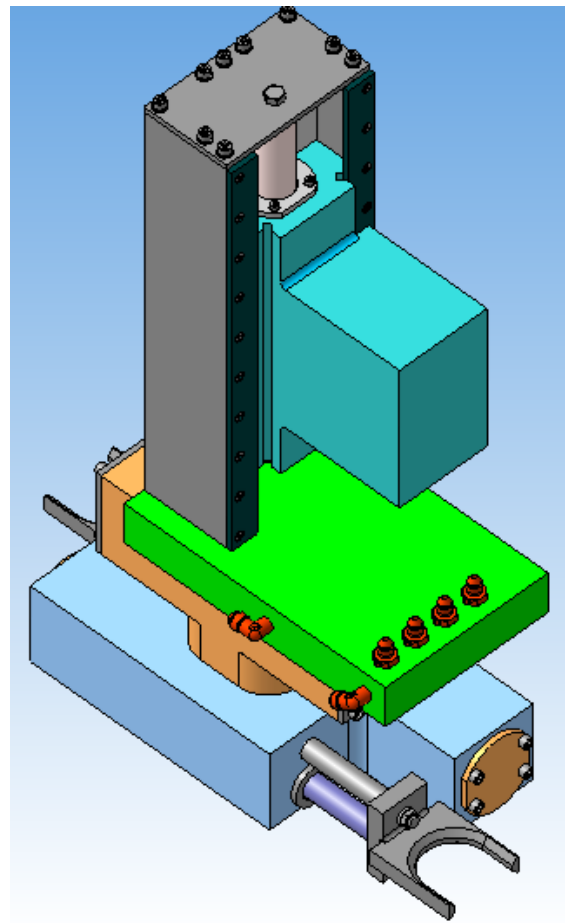
В станке используется система вспомогательного инструмента на базе инструментальных блоков, которая служит для быстрого закрепления режущего инструмента в шпинделе станка и передача ему крутящего момента. В качестве вспомогательного инструмента в обрабатывающих центрах используют патроны и оправки. Оправки главным образом предназначены для операций с большими усилиями резания, таких как торцовое фрезерование, фрезерование пазов дисковыми фрезами, растачивание отверстий большого диаметра. На рис. 3 представлены 3D-модели инструментальных блоков, используемых в ШРГ [5, 6]: оправка для развертывания (рис. 3, а); сверлильная оправка (рис. 3, б); оправка для обработки отверстия фасонным сверлом (рис. 3, в); оправка для торцового фрезерования (рис. 3, г); оправка для резбонарезания (рис. 3, д);

Для создания фотореалистического изображения инструментальной составляющей используется модуль Artisan Rendering, интегрированный в систему КОМПАС-3D. На рис. 4 показан рендеринг ШРГ в сборе (рис. 3, а) и шпиндельного узла, в котором монтируются, указанные выше инструментальные блоки.

С помощью приложения Artisan Rendering [7] получены высококачественные фотореалистические изображения режущих инструментов как средство для анализа внешнего вида будущей конструкции. В частности, это дает возможность подобрать материалы с учетом расцветки, фактуры, с последующей обратной связью в процессе корректировки геометрии изделия в целях совершенствования внешнего вида. На рис. 5 представлены режущие инструменты для фасонного сверления (рис. 5, а), нарезания резьбы (рис. 5, б), сверления (рис. 5, в), развертывания (рис. 5, г) и торцового фрезерования (рис. 5, д).

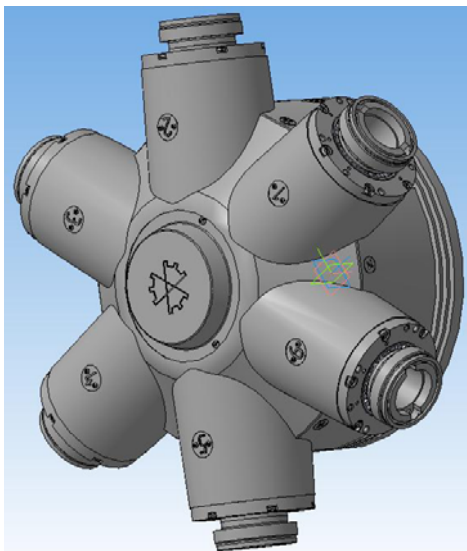


а

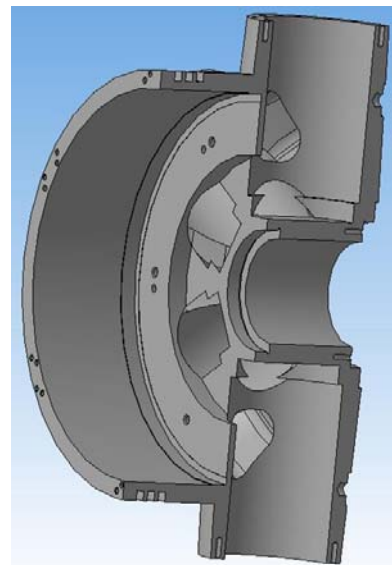


б

Рис. 1. 3D-модели компонентов системы смены инструмента:
а – инструментальный магазин; б – автооператор



а



б

Рис. 2. 3D-модель ШРГ станка модели СФ16МФЗ

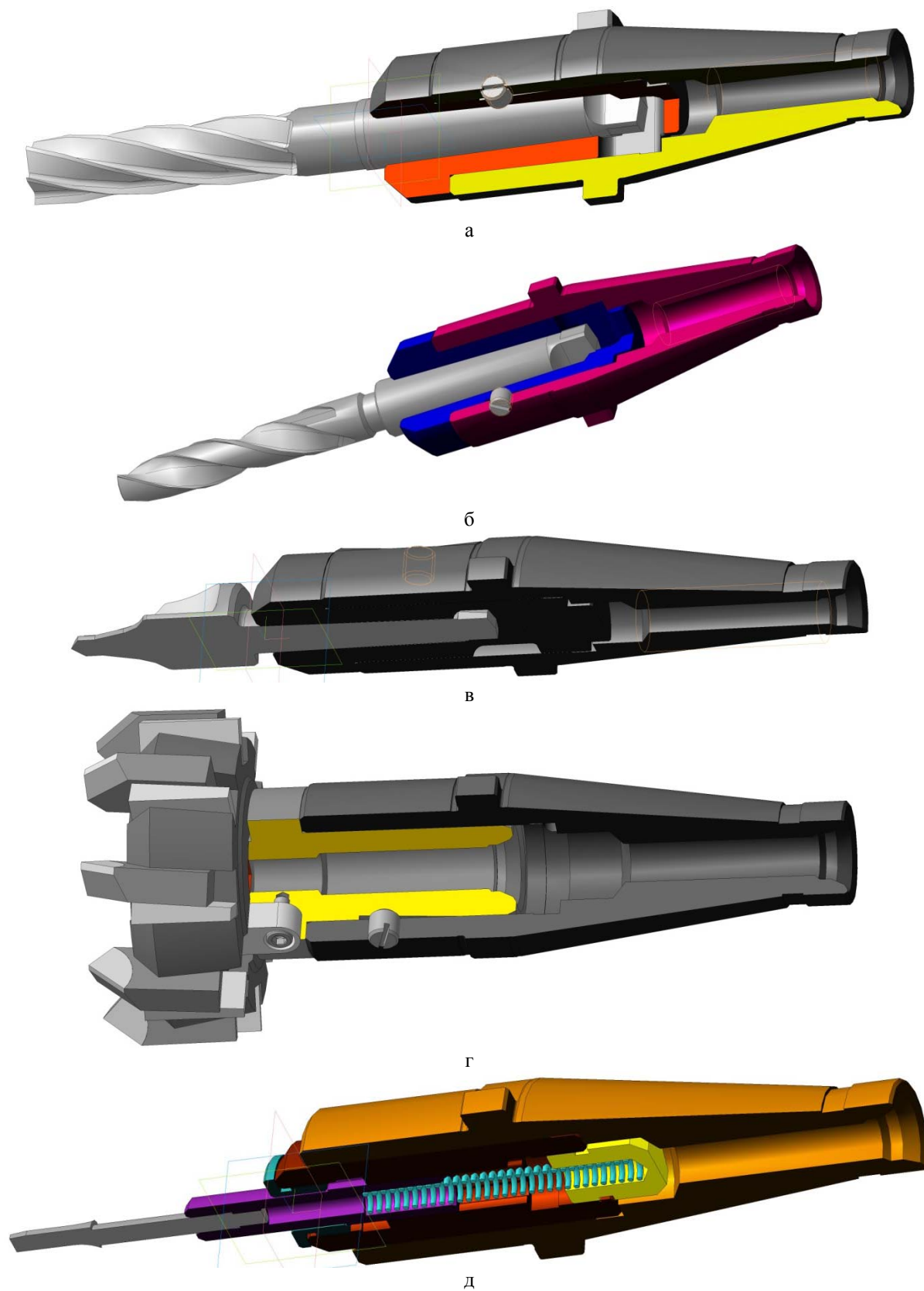
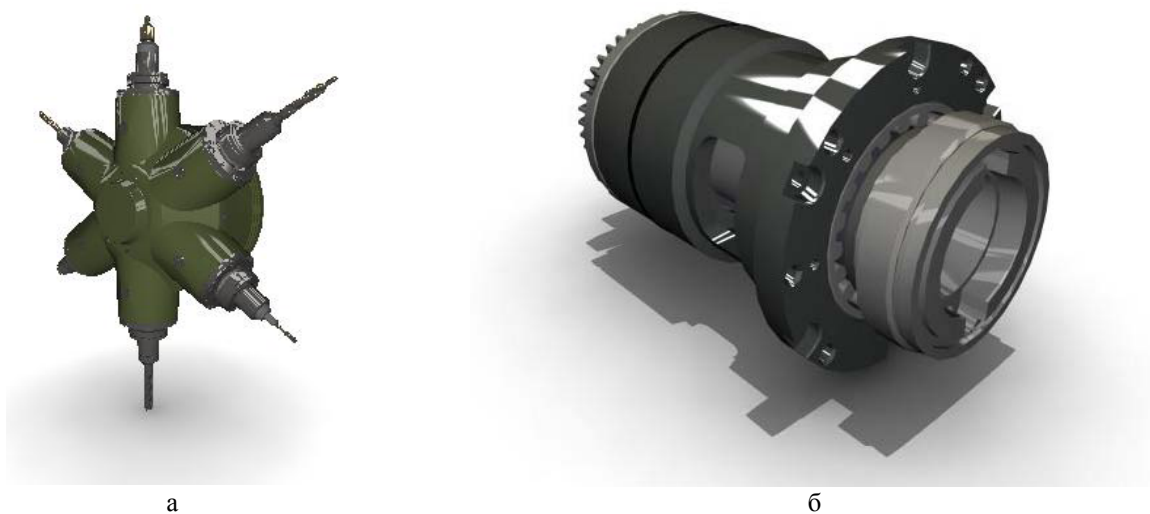


Рис. 3. 3D-модели инструментальных блоков:
а- развертывание; б – сверление; в – фасонное сверление; г – фрезерование; д – нарезание резьбы



а

б

Рис. 4. Рендеринг ШРГ: а – сборка; б – шпиндельный узел



а

б

в

г

д

Рис. 5. Режущие инструменты с рендерингом:
а – фасонное сверло; б – метчик; в – сверло спиральное; г – развертка; д – фреза торцовая

Выводы. 1. Разработана процедура 3D-моделирования инструментальной оснастки шпиндельных узлов ОЦ фрезерно-сверлильно-расточного типа с помощью САПР КОМПАС и модуля Artisan Rendering.

2. Построены твердотельные модели основных компонентов устройств автоматической смены режущего инструмента на базе дискового инструментального магазина и двухпозиционного автооператора

3. Выполнено фотореалистическое представление конструкции инструментальной оснастки обрабатывающих центров и комплектов режущего инструмента в модуле Artisan Rendering.

Л и т е р а т у р а

1. Ганин Н.В. Трехмерное проектирование в КОМПАС-3D [Текст] / Н. В. Ганин. – М.: ДМК, 2012. – 776 с.
2. Ганин Н.В. Проектирование и вычисление прочности в системе КОМПАС-3D v. 13/Н. В. Ганин. – М.: ДМК, 2011. – 521 с.
3. Кріль О. С. Методи і процедури 3D-моделирования металлорежущих станков и инструментов. Монографія. ISBN 978-617-11-0049-7/ О.С. Кріль. – Северодонецк: Вид-во СНУ ім. В.Даля, 2015. – 120 с.
4. 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.
5. Кріль О.С. 3D-моделирование и расчеты привода главного движения фрезерного станка с шестишпиндельной револьверной головкой/ О.С.Кріль, В.В. Журавлев// Вісник НТУ «ХПІ». – 2014. – №40(1083). – с. 87 – 99.
6. Krol O. Modeling of spindle for turret of the specialized tool type SF16MF3/ O Krol, V. Juravlev [Text] //TEKA Com. Mot. and Energ. in Agriculture. – OL PAN, 2013, Vol.13, No 4, Lublin, Poland. – P. 141 – 147.
7. Платонов Л. Смотрим на модели любимой CAD-системы КОМПАС-3D по новому/Л. Платонов. – Санкт-Петербург: Изд-во АСКОН, №1(8), 2012. – С. 16 – 20.

R e f e r e n c e s

1. Ganin N.V. Trehmernoe proektirovanie v KOMPAS-3D [Tekst] / N. V. Ganin. – M.: DMK, 2012. – 776 s.
2. Ganin N.V. Proektirovanie i vychislenie prochnosti v sisteme KOMPAS-3D v. 13/N. V. Ganin. – M.: DMK, 2011. – 521 s.
3. Krol O.S. Metody i procedury 3D-modelirovanija metallorazhushchih stankov i instrumentov. Monografija. ISBN 978-617-11-0049-7/ O.S. Krol. – Severodonec'k: Vid-vo SNU im. V.Dalja, 2015. – 120 s.
4. 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.

5. Krol O.S. 3D-modelirovanie i raschety privoda glavnogo dvizhenija fрезерного станка s shestishpindel'noj revol'vernoj golovkoj/ O.S. Krol, V.V. Zhuravlev// Visnik NTU "HPI". – 2014. – №40 (1083). – s. 87 – 99.
6. Krol O. Modeling of spindle for turret of the specialized tool type SF16MF3/ O Krol, V. Juravlev [Text] //TEKA Com. Mot. and Energ. in Agriculture. – OL PAN, 2013, Vol.13, No 4, Lublin, Poland. – P. 141 – 147
7. Platonov L. Smotrim na modeli ljubimoy CAD-sistemy KOMPAS-3D po novomu/L. Platonov. – Sankt-Peterburg: Izd-vo ASKON, №1(8), 2012. – P. 16 – 20.

Кріль О.С., Лисиця С.М. 3D-моделирование инструментального оснащения обрабатывающих центров из использованием рендеринга

Розглянуто процедури побудови тривимірних моделей інструментального оснащення обробних центрів фрезерно-сверлильно-розточувального типу з використанням, інтегрованої САПР КОМПАС-3D. Представлений інструментарій створення фотореалістичного зображення як інструментального магазину і автооператора, так і комплектів різального інструменту в модулі Artisan Rendering, інтегрованому в систему КОМПАС-3D.

Ключові слова: інструментальна оснастка, автооператор, різальний інструмент, твердотільна модель, САПР КОМПАС, модуль Artisan Rendering

Krol O.S., Lysytsa S.N. 3D-modelling instrumental equipment multyoperation tool using rendering

The procedure of constructing three-dimensional models of tooling for machining centers milling-drilling-boring type using integrated CAD KOMPAS-3D is considered. Tools create photorealistic images as tool magazine and auto manipulator, and sets the cutter in module Artisan Rendering, integrated in KOMPAS-3D system are presented.

Keywords: Tooling, auto manipulator, cutting tools, solid model, CAD KOMPAS, module Artisan Rendering

Кріль Олег Соломонович – к.т.н., доц., професор кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк). krolos@yandex.ru
Лисиця Сергій Миколайович – студент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк).

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

Стаття подана 12.09.16

УДК 658.562.012

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КЛАССИФИКАЦИИ С ИНТЕРВАЛОМ В ПРОЦЕССЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ПЕРФОРАЦИОННОГО МАРКЕРА

Логунов А.Н.

CLASSIFICATION WITH THE INTERVAL USE IN PERFORATION MARKER RECOGNITION

Logunov A.N.

Рассмотрен вопрос выделения отверстий на изображении перфорационного маркера в условиях присутствия помех. Показано, что использование классификации с интервалом для небольшой части изображения позволяет существенно снизить вероятность ошибки при приемлемом времени обработки.

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

1. Введение. Успешная экономическая деятельность предприятий, их конкурентоспособность на рынке в значительной мере начинает зависеть от наличия у них высокоэффективного организационно-технического механизма управления и обеспечения качества продукции. Одним из показателей конкурентоспособности любой фирмы является сертификат на соответствие стандартам системы качества ISO 9000. Эта сертификация гарантирует, что система качества предприятия способна обеспечивать и улучшать качество изготавливаемой продукции. Системы идентификации изделий являются неотъемлемым элементом системы управления качеством.

Особенно эффективна идентификация при автоматизации процессов нанесения и считывания маркировки изделий и материалов. Автоматизированная технология идентификации обеспечивает оперативность и объективность контроля, экономию средств, возможность прослеживаемости продукции на всех стадиях производства и наличие информации, необходимой для управления процессом производства [1, 2].

Наиболее сложные условия имеют место при маркировке шкур в кожевенном производстве. Нанесенные маркеры идентификации подвергаются совместно с маркируемыми изделиями жестким технологическим воздействиям – механической,

термической и химической обработке поверхности, во время которой может удаляться поверхностный слой материала изделий вместе с маркировкой, а изделие подвергается неоднородной деформации (вытягивание, набухание, усадка, коробление и т.п.). Вследствие этих процессов искажается геометрия маркера и значительно изменяются оптические характеристики поверхности изделий.

Маркер должен сохраняться на протяжении всего технологического процесса по переработке шкуры в кожу. Единственным маркером, который выдерживает все обработки, является сквозное отверстие, поэтому для маркировки кожи используется метод перфорации, причём форма перфорационных отверстий может быть различной. Этот способ гарантирует, что маркер не исчезнет при двоении (разделение шкуры на две половины по толщине), как это может случиться, если к коже прикреплены бирка или радиочастотная метка. Также этот способ гарантирует, что код сохранится на шкуре после ее обработки химическими реактивами и нагрева, после выравнивания кожи по толщине (строжки) и шлифования поверхности.

Основной задачей при разработке систем автоматизированной идентификации для кожевенного производства является сохранение маркеров идентификации изделий и обеспечение их надежного автоматизированного считывания на всех этапах технологического процесса обработки от сырья до готовых изделий. Особенно нежелательным является ошибочное считывание кода, так как в этом случае появляются изделия «двойники», что дезорганизует работу АСУП. Автоматизированное считывание маркировки должно быть достаточно надежным даже при неоднородном деформировании изделий, искажении первоначальной сетки нанесенных отверстий и изменении оптических характеристик поверхности.

2. Анализ последних исследований и публикаций. «Построение описания изображения на основе его представления с использованием признаков – едва ли не самая сложная задача в процессе построения любой системы распознавания. При этом, если в рамках некоторых математических моделей удалось формализовать процесс классификации, то процесс выбора признаков до сих пор остался процедурой эвристической и зависимой как от предметной области, так и от разработчика.

В то же время определенный опыт, накопленный за годы использования средств распознавания образов и обработки изображений для решения практических задач, позволяет выделить ряд основных групп признаков, которые успешно используются для описания и распознавания изображений [3]. Корреляционные методы нашли широкое применение при обнаружении и распознавании изображений в системах навигации, слежения, промышленных роботах.

При полностью заданном эталоне многошаговая корреляция путем сканирования входного поля зрения является, по сути, полным перебором в пространстве сигналов. Поэтому эту процедуру можно считать базовой, потенциально наиболее помехоустойчивой, хотя и самой трудоемкой. Все остальные методы направлены на сокращение вычислительных затрат при попытке обеспечения наперед заданной надежности распознавания, габаритно-весовых характеристик вычислителя и стоимости расходов на создание программных и технических средств [4].

В соответствии с вышеизложенным в качестве признаков используются отклики корреляционных фильтров.

3. Материалы и результаты исследования. Ключевым процессом является распознавание отверстий маркера на изображении изделия (рис. 1). Поскольку характеристики поступающих для распознавания изображений сильно различаются в зависимости от партии шкур (цвет шкуры, изменения поверхности, вызванные обработкой, затягивание и забивание отверстий, множество причин случайного характера) не может быть выбран один фильтр, удовлетворяющий всем условиям, выбор фильтра закладывается в алгоритм распознавания.

В качестве базового принимается комбинированный одномерный корреляционный фильтр как обладающий одновременно высокой скоростью и эффективностью. В случае, когда не удаётся распознать изображение с помощью базового фильтра, применяются двумерный корреляционный (наиболее помехоустойчив, но требует большого количества вычислений и, соответственно, времени) [5].

Как и следовало ожидать, использование двух признаков позволяет уменьшить вероятность ошибки при распознавании, но значительно

увеличивает время машинной обработки. Ослабить это противоречие позволяет использование классификации 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 интервал больше области перекрытия распределений, 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



Рис. 1. Изображение перфорационной маркировки

Вероятность ошибки $P(e_2)$ при классификации с интервалом от k_1 до k_2 для классифицированных пикселей изображения (не попавших в интервал) составляет

$$P(e_2) = P(d) \sum_{i=k_2}^{255} d_i + P(f) \sum_{i=0}^{k_1} f_i$$

Поведение слагаемых показано на рис 2.

$$P(e_{j1}) = P(d) \sum_{i=j1}^{255} d_i$$

$$P(e_{j2}) = P(f) \sum_{i=0}^{j2} f_i$$

Представив логарифм вероятности ошибки классификации как функцию двух переменных k_1 и k_2

$$P(e_{2,k_1,k_2}) = \log \left[P(d) \sum_{i=k_2}^{255} d_i + P(f) \sum_{i=0}^{k_1} f_i \right]$$

получим контурный график в координатах k_1 и k_2 (рис 3), на котором изображены линии равных значений логарифма вероятности. Чтобы выбрать искомую точку на изолинии можно использовать значение логарифма вероятности попадания пикселей в раздельный интервал:

$$P(g_{k_1, k_2}) = \log \left[P(d) \sum_{i=k_1}^{k_2} d_i + P(f) \sum_{i=k_1}^{k_2} f_i \right]$$

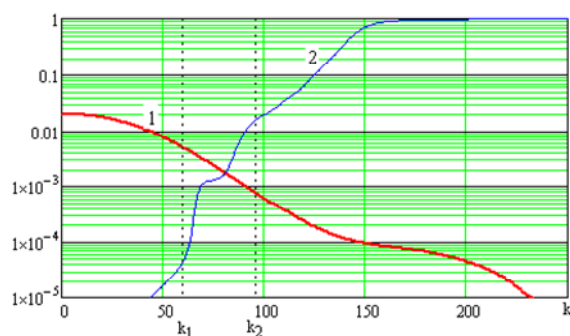


Рис. 2. Составляющие вероятности ошибки классификации пикселей (1 – отверстия, 2 – фон) и разделительный интервал $k_1 \dots k_2$

Вид этой функции в тех же координатах показан на рис 4.

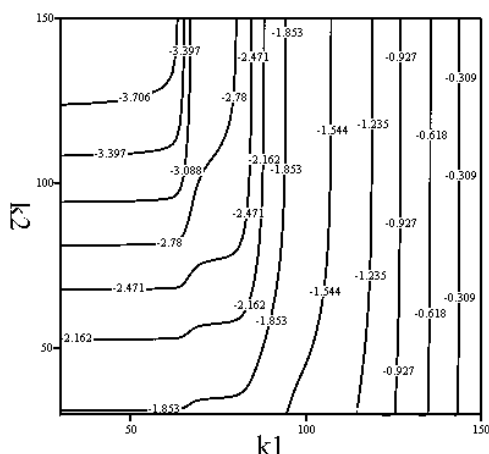


Рис. 3. Зависимость логарифма ошибки классификации от границ разделительного интервала

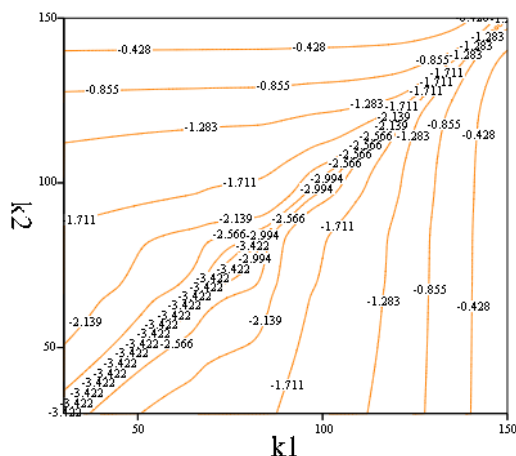


Рис. 4. Логарифм вероятности попадания пикселей в разделительный интервал

Таким образом, границы разделительного интервала можно получить путем решения системы уравнений:

$$\begin{cases} P(d) \sum_{i=k_2}^{255} d_i + P(f) \sum_{i=0}^{k_1} f_i = P_{2s} \\ P(d) \sum_{i=k_1}^{k_2} d_i + P(f) \sum_{i=k_1}^{k_2} f_i \rightarrow \min \end{cases}$$

где p_{2s} – минимальное значение вероятности ошибки классификации при распознавании с использованием двух признаков

Совместное решение системы уравнений численным методом в частном случае для $p_{2s}=0.0007$ дает искомые значения границ интервала $k_1=62$ $k_2=96$. Решение проводилось путем построения изолинии равной вероятности ошибки и определения изолинии наименьшего уровня касательной к ней (рис. 5)

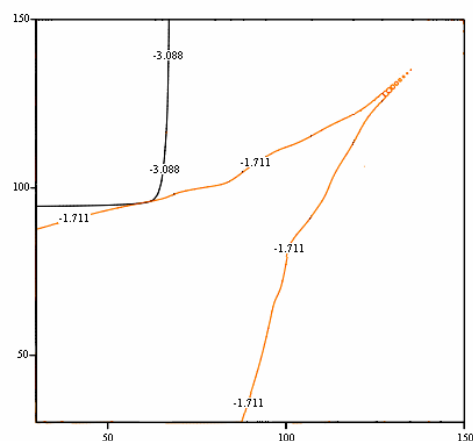


Рис. 5. Определение границ разделительного интервала (черным показана изолиния логарифма ошибки классификации, коричневым – касательная к ней изолиния логарифма вероятности попадания пикселей в разделительный интервал)

В данном случае эта линия соответствует вероятности попадания в разделительный интервал равной 0,019. На рис.6 показаны результаты распознавания данным методом.

Доля нераспознанных на первом этапе пикселей составляет для различных изображений перфорационной маркировки от 0 до 2 %. Располагаются эти пиксели по краям отверстий и в зоне действия помех. При первой итерации алгоритма распознавания их координаты на изображении сохраняются в памяти ЭВМ. Если при этом не удастся прочесть кодовое сообщение маркера, то к этим пикселям применяется двухпризнаковое распознавание, описанное в работе [5].

4. Выводы. Таким образом, двухпризнаковое распознавание используется только для небольшой части изображения, что повышает производительность процесса считывания маркировки. Одновременно при этом достигается

адаптация алгоритма распознавания к каждому изображению маркировки. Выполнено экспериментальное исследование эффективности методов обработки изображения и выделения элементов маркировки, положенных в основу адаптивно-итерационной процедуры распознавания маркировки, с использованием специально разработанного программного обеспечения и реальных изображений маркировки, полученных в промышленных условиях. Подавляющая доля отказов считывания обусловлена аппаратными отказами и ошибками обслуживающего персонала. Отказы, связанные с помехами на изображении маркировки и его обработкой составили незначительную часть от общего числа отказов и для реального производства их можно оценить в 0,3 %, что подтверждает эффективность данных алгоритмов и адаптивной процедуры распознавания в целом.

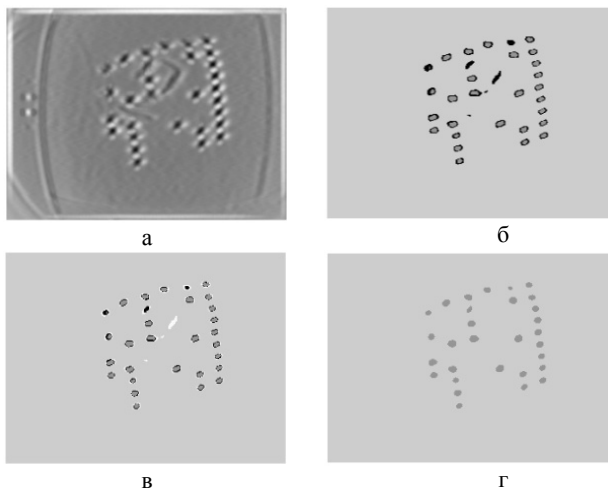


Рис. 6. Результаты классификации с интервалом:

а – изображение после обработки комбинированным корреляционным фильтром; б – классификация с интервалом 62...96 (светло-серые пиксели – фон, темно-серые – отверстия, черные – попавшие в разделительный интервал пиксели, классификация которых отложена); в – классификация попавших в разделительный интервал пикселей (черные – отверстия, белые – фон); г – окончательный результат

Л и т е р а т у р а

1. 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).
2. 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>.
3. Кузьмич И.В. Признаки, используемые при распознавании изображений дефектов в автоматизированной системе контроля качества автомобильных стекол [Электронный ресурс] / И.В. Кузьмич, А.А. Козлов, А.П. Павлова. – Режим доступа: <http://konftm.tltsu.ru/stat/kyzmich/input1.html>

4. Путятин Е.П. Нормализация и распознавание изображений [Электронный ресурс] / Е.П. Путятин – Режим доступа: <http://sumschool.sumdu.edu.ua/is-02/rus/lectures/pytyatin/pytyatin.htm>
5. 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.

References

1. Campanella J. The economics of quality. Basic principles and their application / J. Campanella.; per. from English. A. Raskin; [Under the scientific. Ed. YP Adler and SE Shepetova]. – M.: RIA "Standards and quality", 2005. – 232c, il. – (Practice Management).
2. Hide and skin quality systems / FAIR Project Improving Hide and Skin Quality // Newsletter. – 2001. – № 6 [electronic resource]. – Access: <http://www.leathercouncil.org/fair/news6.htm>.
3. Kuzmich JV Signs used in the recognition of defects in the automated image quality control system, auto-mobile glass [electronic resource] / IV Kuzmich, A. Kozlov, Alexander Pavlov. – Access: <http://konftm.tltsu.ru/stat/kyzmich/input1.html>
4. Putyatin EP normalization and image recognition [electronic resource] / EP Putyatin – Mode of access: <http://sumschool.sumdu.edu.ua/is-02/rus/lectures/pytyatin/pytyatin.htm>
5. Logunov AN Investigation of the effectiveness of digital filters in the system of automated reading of marking products / AN Logunov // VISNUK of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University. – 2003. – №4 (62). – S. 138-143.

Логунов О.М. Використання класифікації з інтервалом в процесі розпізнавання перфораційного маркеру.

Розглянуто питання виділення отворів на зображенні перфораційного маркеру в умовах присутності перешкод. Показано, що використання класифікації з інтервалом для невеликої частини зображення дозволяє істотно знизити ймовірність помилки при прийнятному часу обробки.

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

Logunov A.N. classification with the interval use in perforation marker recognition.

The question of allocation of perforation holes on the image marker in terms of the presence of obstacles. It is shown that the use of classification intervals for a small part of the image can significantly reduce the likelihood of errors in the reasonable processing time.

Keywords: Perforation marker, correlation, detection, identification, sign.

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

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

Стаття подана 07.09.2016

УДК 674

**МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КРУГЛЫХ ПИЛ,
ОСНОВАННЫХ НА ТЕРМОМЕТРИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ****Мелконов Г.Л., Никитченко И.В.****METHOD FORECASTING PERFORMANCE OF ROUND SAWS
ON THE BASIS OF THERMOMETER CONTROL****Melkonov H.L., Nikitchenko I.V.**

В статье приведены результаты исследований одного из опытов натурного эксперимента, проведенного в производственных условиях. Предложен метод прогнозирования работоспособности круглых пил, основанный на использовании инфракрасного радиационного пирометра. Сделан краткий анализ исследований в данной области. Сделаны выводы о прогнозировании работоспособности круглых пил на основе термометрического контроля.

Ключевые слова: температурный контроль; диск пилы; инфракрасный пирометр; режущий инструмент; зона нагрева.

1. Введение. Деревообрабатывающий инструмент в процессе работы, как и любой другой, подвергается тепловому воздействию, возникающему в результате действия сил трения при резании материала. Особенность круглых пил является в том, что среди многочисленных влияющих на работоспособность факторов, весьма значительное влияние оказывают величина и распределение нагрева корпуса пилы [6]. Неравномерный нагрев при определенных параметрах может привести к нарушению плоского состояния вращающегося диска, в следствие чего происходит нарушение функционирования круглопильного станка [8], т.е. можно говорить о возникновении механического отказа оборудования. Такое явление наиболее часто происходит при продольной распиловке древесины.

2. Анализ последних исследований и публикаций. Пиление древесины круглыми (дисковыми) пилами – самый распространенный процесс механической технологии, отличающийся большим разнообразием конструкций и технологических схем станков. Простота устройства станков, относительно низкая стоимость и высокая производительность способствуют их использованию на всех раскроечных операциях

первичной и вторичной обработки древесины. При вращательном главном движении скорость резания круглопильных станков достигает 100 м/с, а скорость подачи – 150 м/мин. Несмотря на преимущества, круглопильные станки имеют серьезный недостаток, который относится к трудности создания требуемой устойчивости пилы в пропиле. Круглая пила надевается на пильный вал посадочным отверстием и зажимается на валу двумя зажимными фланцами и гайкой. При таком креплении относительно тонкий диск большого диаметра имеет только одну опору в центре пилы и работает со значительными нагрузками не всегда находящимися в плоскости диска. Жесткость его при этом не всегда оказывается достаточной: диск отклоняется от плоскости вращения, нагревается, зарезает в пропиле в бок, касаясь его стенок, и теряет свою рабочую устойчивость. Все это приводит к браку при распиловке и частым остановкам станка. Для повышения поперечной жесткости пилы приходится использовать более толстые диски, а это приводит к увеличению выхода опилок, к снижению полезного выхода пиломатериалов.

Основной задачей термометрического метода является изучение начального теплового поля заготовки и закономерностей его изменения в процессе закачки теплоносителя. Главным объектом термометрических исследований на этапе ведения процесса воздействия на заготовку и последующего заводнения является искусственно созданное тепловое поле, которое после прекращения закачки теплоносителя постепенно нивелируется, распределяется, поэтому тепловое поле в очаге воздействия необходимо регистрировать как во время процесса, так и сразу после прекращения закачки тепла [2].

По применению термометрического метода к изучению реакций образования соединений

выполнено большое количество работ, при этом часто для получения данных, по которым строили кривые хода реакции, применяли только термометр. Многие из изученных комплексных соединений не имеют прямого отношения к аналитическим методам, но такой метод широко применяется в изучении хода химических реакций. Правда, большинство исследований касается неорганических комплексных соединений, образование комплексных соединений органических веществ этим методом почти не изучалось [1].

3. Материалы и результаты исследования.

С целью возможного предотвращения «зарезания» и «горения» круглых пил авторами была сформулирована исследовательская задача – установить возможность и условия прогнозирования нагрева в процессе распиловки.

Устанавливая возможность прогнозирования момента возникновения отказа, необходимо учитывать следующие условия [1]:

1. установлен параметр прогнозирования (ПП);
2. имеется возможность периодического или непрерывного контроля ПП;
3. известен критерий предельного состояния.

В качестве параметра прогнозирования принимаем величину температурного перепада (ДУ), суть которого заключается в разности температур наружной кольцевой зоны пильного диска, прилегающей к окружности межзубовых впадин (T_H) и температуры средней кольцевой части диска, прилегающей к внешней окружности зажимных фланцев (T_B). При условии $T_H > T_B$ – перепад считается положительным, и наоборот. Отметим, что оба вида температурных перепадов возможны при различных обстоятельствах, но наиболее опасным и меньшим допустимым значением обладает положительный, нежели отрицательный перепад. В связи, с чем этому виду уделяется большее внимание.

Параметр ДУ является косвенным технологическим, изменяющимся в результате изменения прямых параметров T_H и T_B .

Температуру указанных кольцевых зон пильного диска предлагается определять инфракрасными радиационными пирометрами. Так как процесс пиления является скоротечным (продолжительность непрерывного пиления, из-за высоких скоростей резания и подачи, не превышает 1–2 минут), контроль следует проводить посекундным.

Критерием предельного состояния является величина допустимого температурного перепада. Для пил, работающих без принудительного охлаждения

$$\Delta T_{Доп} = 12,3 \cdot 10^6 \cdot \frac{K_T \cdot N_{рез}}{2 \cdot 10^4 \cdot 24,23} = A \cdot N_{рез} \quad (1)$$

где K_T – коэффициент, учитывающий долю мощности резания, расходуемой на нагрев диска пилы (без зубьев);

$N_{рез}$ – мощность резания на одну пилу, кВт;
 D и S – диаметр и толщина пильного диска, мм;
 n – частота вращения пильного вала, мин⁻¹.

Далее выбирался метод прогнозирования. Принимая во внимание различие свойств распиливаемых материалов даже в одной размерно-качественной группе, возможные значительные отклонения ПП в общие моменты процесса пиления, динамичность процесса и невозможность получения полной и достоверной статистической информации, в качестве метода прогнозирования использовано прогнозирование по реализации изменения параметра [5].

При прогнозировании по реализации принимают, что изменение ПП конкретного объекта характеризуется экстраполяционной функцией и средним квадратическим отклонением этой функции от фактического изменения ПП. Каждому изменению параметра соответствует остаточный ресурс. То есть в рассматриваемом случае остаточный ресурс допустимого температурного перепада в i -й момент времени:

$$\Delta T_{Доп}^{ост} t = \Delta T_{Доп} - (T_H t - T_B t) \quad (2)$$

Дальнейшие действия рассмотрим на примере выполнения и обработки результатов одного из опытов натурного эксперимента, проведенного в реальных производственных условиях.

Производилось продольное пиление березовых необрезных пиломатериалов, длиной 6 м и толщиной 50 мм, на круглопильном станке ЦДК-4-2. Скорость подачи составляла 18 м/мин. Режущим инструментом (объектом исследования) была пила с твердосплавными напайками фирмы «Paritet» 400×36×50. Температура T_H определялась инфракрасным пирометром «Condrol 2 IT» с точностью 0,2 °С. Температура T_B в течении опыта не изменялась и была равна температуре окружающего воздуха в цехе 23 °С. Продолжительность пиления составила 20 с. Параметры ПП и первичной обработки опыта представлены в табл. 1.

Расчетная величина $\Delta T_{Доп}$ с учетом того, что установленная мощность электродвигателя пильного механизма ЦДК-4-2 10 кВт, КПД передачи 90 % и частота вращения пильного вала 2940 мин⁻¹ [5], по формуле 1 составила 34,97 °С и принята в дальнейшем 35 °С.

Период наработки на отказ (интервал корреляции) принимаем последние десять секунд. Рассчитываем среднюю скорость изменения ПП – $V_{Тср}$, которая составила 0,6 °С/сек. Среднеквадратичное отклонение скорости σ и коэффициент вариации скорости изменения ПП V соответственно равны 0,39 и 0,65. Верхняя и нижняя доверительные границы скорости изменения ПП определяются по формуле:

$$V_T^{(y)} = V_{Tsp} \pm U_y \cdot \sigma / \sqrt{n} \quad (3)$$

где: (U_y – квантиль нормального распределения, при доверительной вероятности $y = 0,95$, равно 1,65).

Расчет показывает $V_T^{(0,8)} = 0,8$ и $V_T^{(0,4)} = 0,4$ °C/сек. Из дальнейшего рассмотрения исключаем нижнее значение, так как верхнее значение скорее приближает момент отказа.

Далее проводим аппроксимацию функции $T_H(t)$. Учитывая, что исследуемая зависимость в интервале $[t_{11}; t_{20}]$ непрерывно и монотонно возрастает (коэффициент корреляции $r=0,98$), рассчитаем коэффициенты линейного и

степенного уравнений регрессии [4]. Значения $T_H(t)$ представлены в табл. 2.

Период прогноза определен исходя из условия, что $t_{пл}$ следует принимать не более 1/2 периода контрольной наработки $t_{кз}$ (рис. 1). Период прогнозирования размером в 5 секунд с уверенностью можно считать достаточным, чтобы после получения информации о возникновении возможного отказа ($\Delta T_{ост} \leq 0$) предпринять управляющие воздействия для его предотвращения.

Таблица 1

Результаты наблюдений и обработки

Время t , сек	Температура T_H , °C	Перепад ΔT , °C	Скорость V_T , °C/сек	Остаточный ресурс $\Delta T_{ост}$, °C
1	27,0	4,0	//	31,0
2	27,0	4,0	//	31,0
3	27,6	4,6	//	30,4
4	28,2	5,2	//	29,8
5	29,0	6,0	//	29,0
6	30,8	7,8	//	27,2
7	33,2	10,2	//	24,8
8	34,0	11,0	//	24,0
9	35,0	12,0	//	23,0
10	35,4	12,4	//	22,6
11	35,6	12,6	0,2	22,4
12	36,0	13,0	0,4	22,0
13	36,6	13,6	0,6	21,4
14	38,4	15,4	1,8	19,6
15	38,8	15,8	0,4	19,2
16	39,0	16,0	0,2	19,0
17	39,6	16,6	0,6	18,4
18	41,0	18,0	1,4	17,0
19	41,2	18,2	0,2	16,8
20	41,4	18,4	0,2	16,6

Таблица 2

Результаты прогнозирования остаточного ресурса $\Delta T_{ост}$

Время t , сек	$T_H(t) = 35,69 \cdot e^{0,00716t}$		$T_H(t) = 0,69t + 34,95$	
	(Ряд 2)		(Ряд 3)	
	Температура T_H , °C	$\Delta T_{ост}$	Температура T_H , °C	$\Delta T_{ост}$
20	41,0	17,0	41,8	16,2
21	41,3	16,7	42,6	15,4
22	41,6	16,4	43,2	14,8
23	41,8	16,2	43,9	14,1
24	42,0	16,0	44,6	13,4
25	42,2	15,8	45,3	12,7

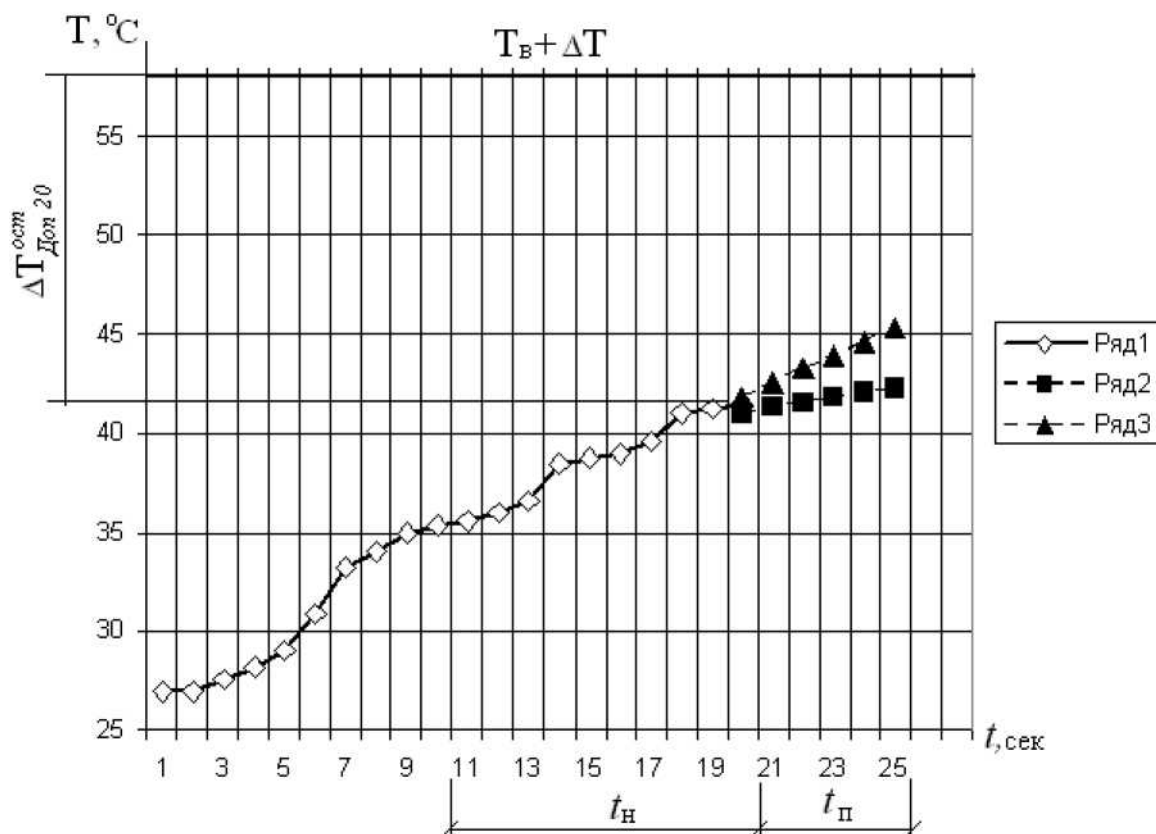


Рис. 1 Зависимость нагрева от времени пиления:
ряд 1 – фактические значения; ряды 2 и 3 – прогнозируемые

4. Выводы. В ходе выполнения исследования в данной области, можно сделать вывод о том, что прогнозирование на основании термометрического контроля работоспособности круглых пил с использованием термометрического контроля возможно при условии определения метода и условий прогнозирования. Предложенная методика возможна для внедрения в процессы автоматизированного контроля работы круглопильных станков для продольной распиловки древесных материалов. Это будет способствовать лучшей эффективности процессов лесопиления, что в последствии улучшит качество производимых изделий, уменьшит энерго затратность и приведёт к экономической выгоде предприятия

Л и т е р а т у р а

1. Барлак Л.С. Термометрическое титрование М.: 1973. – 144 с.
2. Кудинов В.И. Совершенствование тепловых методов разработки месторождений высоковязких нефтей М.: 1996. – 285 с.
3. Михлин В.М. Прогнозирование технического состояния машин. М.: Колос, 1976. — 288 с.
4. Пижурич А.А., Розенблит М.С. Исследования процессов деревообработки. М.: Лесная промышленность, 1984. — 232 с.
5. РД 26.260.004-91. Прогнозирование остаточного

ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации: методические указания. – Введ. 01.01. 1992. М.: Химнефтемаш, 1991. – 96 с.

6. Санев В.И. Обработка древесины круглыми пилами. М.: Лесная промышленность, 1980. – 232 с.
7. Станок прирезной с гусеничной подачей ЦДК-4-2: Руководство по эксплуатации / Тюменский станкостроительный завод. – Тюмень: Обл. типография управления издательств, полиграфии и книжной торговли Тюменского облисполкома, 1972. – 32 с.
8. Стахийев Ю.М. Работоспособность круглых пил. М.: Лесная промышленность, 1989. – 384 с.
9. Стахийев Ю.М., Пашков В.К. Руководящие технические материалы по определению режимов пиления древесины круглыми пилами. Архангельск: ЦНИИМОД, 1988. – 74 с.

References

1. Barlak L.S. Termometricheskoe titirovanie M.: 1973. – 144 s.
2. Kudinov V.I. Sovershenstvovanie teplovyih metodov razrabotki mestorozhdeniy vyisokovyazkih neftey M.: 1996. – 285 s. Vorozhnev N. N. Osnovy sinteza promezhutochnykh produktov i krasitelej / Nikolaj Nikolaevich Vorozhnev. – M. : Goshimizdat, 1955. – 839 s.
3. Mihlin V.M. Prognozirovaniye tehnikeskogo sostoyaniya mashin. M.: Kolos, 1976. — 288 s.

4. Pizhurin A.A., Rozenblit M.S. Issledovaniya protsessov derevoobrabotki. M.: Lesnaya promyshlennost, 1984. – 232 s.
5. RD 26.260.004-91. Prognozirovaniye ostatochnogo resursa oborudovaniya po izmeneniyu parametrov ego tekhnicheskogo sostoyaniya pri ekspluatatsii: metodicheskie ukazaniya. – Vved. 01.01. 1992. M.: Himneftemash, 1991. – 96 s.
6. Sanev V.I. Obrabotka drevesinyi kruglyimi pilami. M.: Lesnaya promyshlennost, 1980. – 232 s.
7. Stanok prireznoy s gusenichnoy podachey TsDK-4-2: Rukovodstvo po ekspluatatsii / Tyumenskiy stankostroitelnyy zavod. – Tyumen: Obl. tipografiya upravleniya izdatelstv, poligrafii i knizhnoy trgovli Tyumenskogo oblispolkoma, 1972. – 32 s.
8. Stahiev Yu.M. Rabotosposobnost kruglyih pil. M.: Lesnaya promyshlennost, 1989. – 384 s.
9. Stahiev Yu.M., Pashkov V.K. Rukovodystvie tekhnicheskie materialy po opredeleniyu rezhimov pileniya drevesinyi kruglyimi pilami. Arhangelsk: TsNIIMOD, 1988. – 74 s.

Мелконов Г.Л., Нікітченко І.В. Метод прогнозування працездатності круглих пил заснованих на термометричному контролі

У статті приведені результати досліджень одного з дослідів натурного експерименту, проведеного в виробничих умовах. Запропоновано метод прогнозування працездатності круглих пил, заснований на використанні інфрачервоного радіаційного пірометра. Зроблено короткий аналіз досліджень в даній області. Зроблено висновки про прогнозування працездатності круглих пил на основі термометричного контролю.

Ключові слова: температурний контроль; диск пилки; інфрачервоний пірометр; ріжучий інструмент; зона нагріву.

Melkonov H.L., Nikitchenko I.V. Method forecasting performance of round saws on the basis of thermometer control

In article results research of one of the tests of full-scale experiment conducted in a production environment. A method for predicting performance circular saw blades based on the use of the infrared radiation thermometer. A brief analysis of the research in this area. The conclusions about the forecasting performance circular saw blades based on thermometric control.

Keywords: temperature control; saw blade; the infrared thermometer; cutting tool; heated zone.

Мелконов Григорій Леонідович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк).
g_melkonov@mail.ru

Нікітченко Інна Вікторівна – старший викладач кафедри електричної інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк).
inna_mia_lg@mail.ru

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

Стаття подана 19.09.2016

УДК 621.9.048

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ОПЕРАЦИЙ ВИБРООБРАБОТКИ И ОБЛАСТЬ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ИХ ДОСТИЖЕНИЯ

Мицьук А.В.

SCIENTIFIC BASIS FOR DETERMINING THE CRITERIA AND MATHEMATICAL SIMULATION OF VIBRATION TREATMENT OPERATIONS AND THE FIELD OF RATIONALE PARAMETERS OF TECHNOLOGICAL PROCESS TO ACHIEVE THEM

Mitsyk A.V.

Дана физическая сущность процесса виброобработки, а также особенности механики рабочей среды и технологические возможности виброобработки. Указаны отличительные признаки виброобработки, получена механо-физико-химическая модель разрушения поверхности детали. Приведены критерии операции виброобработки и аналитические выражения для их расчета. Даны технологические рекомендации по выбору параметров для различных операций виброобработки. Проведено математическое моделирование кинематики рабочей среды. Приведены исходные уравнения и граничные условия движения рабочей среды. Предложены решения упрощенных уравнений Навье-Стокса.

Ключевые слова: операции виброобработки, рабочая среда, съем металла, шероховатость поверхности, циркуляция среды, механо-физико-химическая модель, критерии операций, схемы энергетического воздействия, уравнения Навье-Стокса.

Общие сведения. Долговечность и надежность машин в значительной мере зависят от точности их изготовления, качества и состояния физико-механических свойств поверхностных слоев сопрягаемых деталей. На современном этапе развитие машиностроения невозможно без постоянного улучшения качества деталей выпускаемых изделий, повышения производительности труда, решения организационно-экономических задач и эффективности производства при минимизации затрат.

При этом, как правило, предъявляются повышенные требования в отношении точности размеров, уменьшении шероховатости поверхности, придания ей особого вида в эстетических или санитарно-гигиенических целях. Выполнить такие требования можно при достижении особых качеств поверхностных слоев деталей. Достигнуть их

традиционными методами формообразования и механической обработки поверхности удастся не всегда. В этой связи в наиболее благоприятной ситуации для поставленных целей находится технология виброобработки, реализуемая при использовании вибрации низкой частоты.

Физическая сущность процесса виброобработки. Состоит в том, что в «U» – образный резервуар помещают рабочую среду, обрабатываемые детали и другие интенсифицирующие добавки. Далее резервуар с помощью внешнего источника энергии сообщают циклоидно-трахоидные колебательные движения, приводя гранулированную среду в состояние виброкипения. При этом среда совершает циркуляционное движение в направлении обратном движению рабочих поверхностей резервуара. В результате относительного перемещения и взаимного давления гранул среды и обрабатываемых деталей происходят процессы микрорезания и упругопластического деформирования, что обеспечивает удаление дефектного слоя металла, а также уменьшение шероховатости поверхности деталей. Эффективность процесса определяется кинематикой и динамикой виброкипящей гранулированной среды [1, 2].

Особенности механики рабочей среды и технологические возможности виброобработки. Исследования, выполненные с использованием скоростной киносъемки, позволили установить характерные особенности динамики рабочей среды в технологической системе. Отмечено, что в течение одного периода колебаний имеет место отход гранул рабочей среды от стенок резервуара и последующая встреча обоих. Такое явление является причиной возникновения циркуляционного

движения среды [3]. Также установлено, что сферическая поверхность днища резервуара при нижнем горизонтальном расположении инерционного вибровозбудителя, оказывает в 1,2...1,5 раза большее силовое воздействие на загруженную в резервуар среду и детали, чем прямолинейные поверхности его стенок [4].

Необходимо отметить, что основными физическими элементами многих методов и процессов механической обработки является микрорезание и пластическое деформирование. Учитывая, что в физической модели виброобработки отсутствует жесткая связь детали и рабочей среды и тем самым исключается возможность эффективного и регулируемого влияния на геометрические размеры и форму детали. Поэтому процесс виброобработки принимается безразмерным, то есть не определяющим форму и размеры обрабатываемых деталей.

С другой стороны отсутствие жесткой кинематической связи не только ограничивает, но и расширяет технологические возможности виброобработки. Так, отсутствие жесткой связи деталей и рабочей среды, и равномерная обработка всей поверхности, с которой контактирует рабочая среда, обеспечивают обработку различных деталей простой и сложной формы, а наличие перемешивания и текучести рабочей среды создает условия для эффективного применения процесса при обработке кромок, заусенцев и облоя.

Таким образом, сочетание таких элементов процесса, как последовательность нанесения множества микроударов, интенсивное перемешивание рабочей среды и обрабатываемых деталей при различной их взаимной ориентации в зависимости от состава и характеристик рабочей среды, а также режимов вибрации, создает условия для выполнения операций, связанных с очисткой литых заготовок, удалением облоя, очисткой от окалины и коррозии, удалением заусенцев, скруглением острых кромок и др. Воздействие химически-активных растворов способствует интенсификации указанных операций и приданию виброобработке дополнительных возможностей [5].

Интенсивность протекания процесса и реализация перечисленных возможностей виброобработки определяются в значительной мере его основными параметрами и их уровнем. Скорость соударения гранул рабочей среды может достигать 0,5...1,0 м/с, ускорение 20...150 м/с², сила соударения может быть 15...30 Н и более, контактные давления в зоне соударений достигают 6500...14500 Н/мм², что обеспечивает деформацию и разрушение материала, средняя температура в резервуаре вибростанка обычно не превышает 30...40 °С и является следствием взаимного соударения и трения гранул среды обрабатываемых деталей и рабочих поверхностей резервуара [6].

Отличительные признаки процесса виброобработки. С определенными допущениями, учитывая результаты электронно-микроскопического исследования можно предположить, что процесс виброобработки зависит от характера локального контакта рабочих зерен гранулы рабочей среды с тонким поверхностным слоем материала обрабатываемой детали. Установлено, что при взаимодействии деталей с массой колеблющихся и перемещающихся абразивных гранул происходит взаимное интенсивное разрушение твердых тел, то есть так называемый процесс взаимной приработки. Характер динамических нагрузок в зоне контакта гранул и деталей принципиально отличает процесс виброобработки от других известных отделочно-зачистных методов. К отличительным признакам процесса виброобработки можно отнести следующие:

- зерна абразивных гранул нагружаются достаточно равномерно и глубина внедрения каждого из них имеет высокую стабильность;

- постоянно обеспечивается чередование деформирующих и режущих зерен, что объясняется прерывностью взаимодействия зерен с поверхностью деталей;

- наличие колебаний обеспечивает уменьшение сил трения на контактных поверхностях гранул среды и детали;

- благодаря незначительным размерам абразивная гранула пропитывается химически-активным раствором и обеспечивает его подачу в зону взаимного контакта с обрабатываемой поверхностью;

- обеспечивается снижение сил микрорезания и контактной температуры.

При наличии таких признаков создаются условия образования более однородного поверхностного слоя, устраняется возможность возникновения грубых следов разрушения. Отмечается, что в точках фактического контакта тел возникает сложный спектр напряжений, происходит микрорезание, упругопластическая деформация со значительным увеличением плотности дислокаций и образованием активных дислокационно-вакансионных центров [1].

Механо-физико-химическая модель процесса виброобработки. Анализ отличительных признаков процесса виброобработки позволяет построить следующую механо-физико-химическую модель процесса разрушения поверхности детали в среде колеблющихся гранул свободной абразивной среды (рис. 1).

Таким образом интенсивность съема металла при виброобработке зависит от интенсивности механического и химического воздействия и способности материала детали сопротивляться действию указанных процессов.

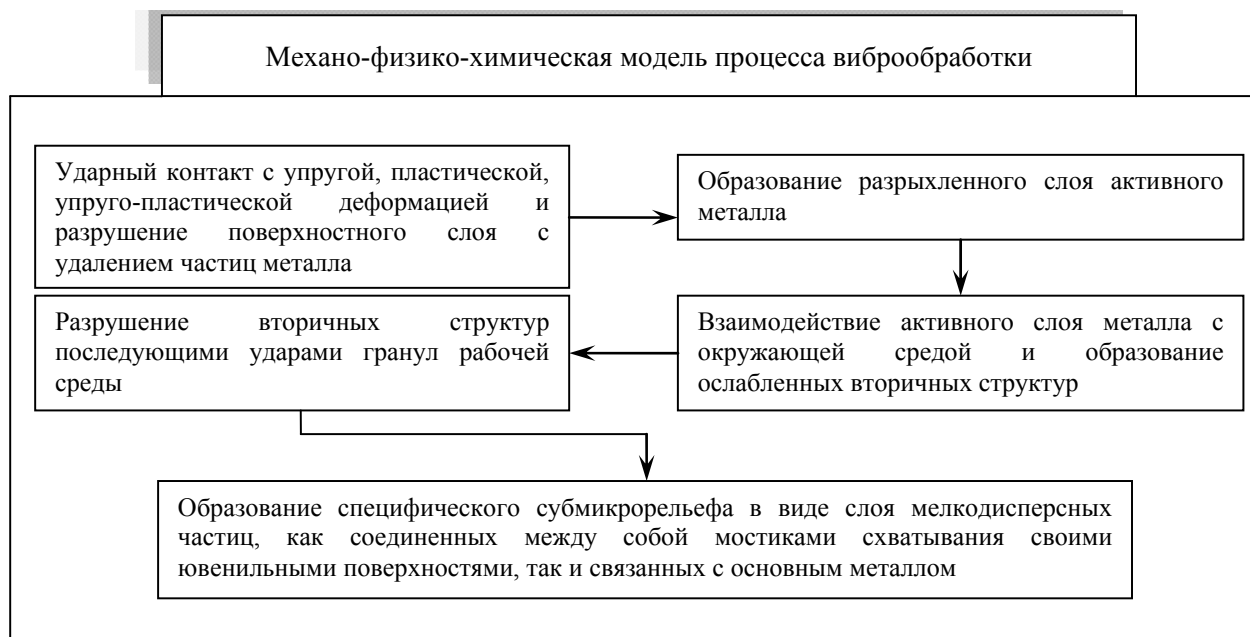


Рис. 1. Модель процесса разрушения поверхности детали в среде колеблющихся гранул свободной абразивной среды

В связи с рассмотренной моделью разрушения поверхностного слоя обрабатываемой детали представляет интерес определения соотношения каждого из перечисленных этапов процесса, доли участия каждого из них в общем процессе обработки. Ориентировочно соотношение процессов микрорезания и упругопластического деформирования составляет 30...35 и 70...65 % [1].

Критерии операций виброобработки. Принимая во внимание, априорную информацию к критериям операции виброобработки будет, справедливо, в первую очередь, отнести сьем металла и шероховатость обработанной поверхности. Такие критерии, как уже говорилось, позволяют дать количественную и качественную оценку состоянию виброобработки при достижении требуемого технологического результата в изготовлении широкой номенклатуры деталей, выполненных из различных металлов и их сплавов.

Кроме того, следует в качестве критерия операции виброобработки обратить внимание на траекторию движения рабочей среды в резервуаре. Ее характер, в первую очередь, определяет интенсивность циркуляционного движения среды, влияющую на производительность процесса и, во вторую очередь, имеет прямую технологическую связь с операциями виброобработки при достижении требуемого технологического результата. Так же в зависимости от выбранной траектории движения среды в резервуаре определяются конструктивные характеристики упругой подвески резервуара.

На основании результатов обработок образцов из различных материалов определены усредненные значения съема металла с единицы площади

поверхности в единицу времени, обеспечивающие достижение шероховатости поверхности, требуемой различными операциями виброобработки. Амплитуда и частота колебаний резервуара, и размеры гранул среды в области рациональных значений определены из условий влияния технологических параметров процесса на эффективность виброобработки. Результаты эксперимента представлены технологическими рекомендациями (табл. 1).

Анализируя состояние технологических процессов виброобработки можно отметить, что получение высокой шероховатости поверхности, соответствующей операции чернового шлифования, сопровождается наибольшим съемом металла для всех исследуемых материалов. Такой результат за минимальное время обработки может быть получен при сочетании параметров $A = 3,5...4,0$ мм, $\omega = 52...70$ Гц, $d = 25...35$ мм, область которых для данной операции принята рациональной.

Операции шлифования, обеспечивающие при обработке дальнейшее последовательное уменьшение шероховатости поверхности на величину, соответствующую трем классам ее чистоты, характеризуются снижением съема металла от класса к классу в среднем на 30...38 %. Такое качество поверхности может быть получено: при шероховатости $R_a = 5,0...2,5$ мкм сочетанием параметров $A = 3,0...3,5$ мм, $\omega = 52...72$ Гц, $d = 25...35$ мм; при шероховатости $R_a = 2,5...1,25$ мкм сочетанием параметров $A = 2,5...3,0$ мм, $\omega = 43...61$ Гц, $d = 25...35$ мм; при шероховатости $R_a = 1,25...0,63$ мкм

сочетанием параметров $A = 2,0 \dots 2,5$ мм, $\omega = 34 \dots 52$ Гц, $d = 15 \dots 25$ мм.

Операции чистового и тонкого шлифования в свою очередь уменьшают шероховатость обрабатываемой поверхности на величину, соответствующую двум

классам ее чистоты. При этом съем металла от класса к классу снижается в среднем на 50 %. Достижимое качество поверхности обеспечивается следующей областью рациональных сочетаний

Таблица 1

Технологические рекомендации по выбору параметров процесса для различных операций виброобработки

Операции вибро- обработки	Исходная шероховатость поверхности, R_a , мкм	Требуемая шероховатость поверхности, R_a , мкм	Материал изделия	Съем металла, Q , мг/ч·см ²	Амплитуда колебаний резервуара, A , мм	Частота колебаний резервуара, ω , Гц	Размер гранул рабочей среды, d , мм
1	2	3	4	5	6	7	8
Черновое шлифование	20,0...10,0	10,0...5,0	Сталь 45	6,0...7,5	1,0	16	5
					1,5	25	15
			Алюминий АЛ-9	13,5...17,0	2,0	34	25
					2,5	43	35
			Латунь ЛС-59	32,0...40,0	3,0	52	—
					3,5	61	—
					4,0	70	—
Шлифование	10,0...5,0	5,0...2,5	Сталь 45	5,0...6,0	1,0	16	5
					1,5	25	15
			Алюминий АЛ-9	12,5...14,0	2,0	34	25
					2,5	43	35
			Латунь ЛС-59	28,0...35,5	3,0	52	—
					3,5	61	—
					4,0	70	—
Шлифование	5,0...2,5	2,5...1,25	Сталь 45	3,5...5,0	1,0	16	5
					1,5	25	15
			Алюминий АЛ-9	8,5...12,0	2,0	34	25
					2,5	43	35
			Латунь ЛС-59	20,0...25,0	3,0	52	—
					3,5	61	—
					4,0	70	—
Шлифование	2,5...1,25	1,25...0,63	Сталь 45	2,0...3,5	1,0	16	5
					1,5	25	15
			Алюминий АЛ-9	4,5...8,0	2,0	34	25
					2,5	43	35
			Латунь ЛС-59	11,5...18,0	3,0	52	—
					3,5	61	—
					4,0	70	—
Чистовое шлифование	1,25...0,63	0,63...0,32	Сталь 45	1,0...2,0	1,0	16	5
					1,5	25	15
			Алюминий АЛ-9	2,5...4,0	2,0	34	25
					2,5	43	35
			Латунь ЛС-59	5,0...9,5	3,0	52	—
					3,5	61	—
					4,0	70	—
Тонкое Шлифование	0,63...0,32	0,32...0,16	Сталь 45	0,5...1,0	1,0	16	5
					1,5	25	15
			Алюминий АЛ-9	1,2...2,0	2,0	34	25
					2,5	43	35
			Латунь ЛС-59	2,5...5,0	3,0	52	—
					3,5	61	—
					4,0	70	—
Полирование	0,32...0,16	0,16...0,08	Сталь 45	$\leq 2,5$	1,0	16	5
					1,5	25	15
			Алюминий АЛ-9	$\leq 2,5$	2,0	34	25
					2,5	43	35
			Латунь ЛС-59	$\leq 2,5$	3,0	52	—
					3,5	61	—
					4,0	70	—

параметров: при шероховатості
 $R_a = 0,63 \dots 0,32$ мкм – $A = 1,5 \dots 2,0$ мм, $\omega = 25$ Гц,
 $d = 5 \dots 15$ мм; при шероховатості
 $R_a = 0,32 \dots 0,16$ мкм – $A = 1,0 \dots 1,5$ мм,
 $\omega = 1,0 \dots 1,5$ Гц, $d = 5 \dots 15$ мм.

При шероховатості поверхності
 $R_a = 0,16 \dots 0,08$ мкм, получаемой на операции
 полирования, съём металла практически
 отсутствует, так как технологической задачей
 операции в отличие от рассмотренных ранее, где
 обрабатываемые поверхности изделия при удалении
 дефектного слоя сохраняли матовый оттенок, в
 первую очередь является придание обрабатываемым
 поверхностям глянцевого оттенка. Требуемый
 технологический результат за минимальное время
 обработки может быть достигнут при использовании
 сочетания параметров: $A = 1,0 \dots 1,5$ мм,
 $\omega = 25 \dots 52$ Гц, $d = 5$ мм.

Количественная и качественная оценка
 процесса виброобработки как правило проводится
 при анализе данных экспериментальных обработок
 деталей в различных технологических условиях.
 Однако, вместе с тем, в теории виброобработки
 получены следующие аналитические выражения:

1. По расчету съема металла в единицу
 времени с единицы площади поверхности [2]:

$$Q = \frac{28 \cdot 10^{-6} P_N^2 t \omega (m + M) \delta}{c \rho_x^2 \tau_S m M}, \quad (1)$$

где Q – съём метала; P_N – нормальная
 составляющая силы косоуго удару гранулы рабочей
 среды; t – время обработки; ω – частота колебаний
 резервуара; m – масса гранулы рабочей среды; M –
 масса обрабатываемой детали; c – коэффициент,
 учитывающий число одновременно
 контактирующих зерен гранулы среды; ρ_x – радиус
 отпечатка зерна гранулы среды; τ_S – величина
 контактных касательных напряжений.

2. По расчету высоты микрошероховатости
 обрабатываемой поверхности [2]:

$$H_{cp} = \frac{106 \eta A \omega m M}{c \sigma_S \rho_x (m + M)}, \quad (2)$$

где η – абразивная способность гранулы среды;
 A, ω – амплитуда и частота колебаний резервуара;
 m – приведенная масса гранулы среды; M –
 приведенная масса обрабатываемой детали; c –
 коэффициент, учитывающий число одновременно
 работающих зерен; σ_S – прочность материала
 детали на растяжение; ρ_x – диаметр лунки от
 внедрения абразивного зерна.

Для проверки зависимостей (1) и (2), и
 установления границ их применения проводились
 соответствующие экспериментальные исследования
 [7]. Они показывают хорошую сходимость
 полученных экспериментальных результатов с
 расчетами.

Приведенная методика и аналитические
 выражения для расчета величины основных
 критериев операции виброобработки и определения
 области рациональных параметров
 технологического процесса для достижения
 критериев справедливы для традиционных
 процессов виброобработки, в которых рабочая среда
 подвергается одноосемному энергетическому
 воздействию со стороны рабочего органа
 вибростанка.

Однако в настоящее время, когда разработаны и
 внедрены прогрессивные мультиэнергетические
 технологии [8, 9], основанные на комбинировании
 различных схем энергетического воздействия, когда
 на рабочую среду производится не только
 динамическое воздействие рабочих поверхностей
 резервуара, но и дополнительное воздействие
 обрабатываемых деталей, смонтированных на
 специальных установочных приспособлениях,
 совершающих автономное движение и
 представляющих собой независимую колебательную
 или центробежную систему [10]. При таком
 механизме обработки в резервуаре вибростанка
 создается комбинированный характер волнового
 колебательного или другого (например, кругового
 центробежного) движения слоев и потоков гранул
 рабочей среды, свободно проникающих ко всем
 труднодоступным поверхностям обрабатываемых
 деталей, что приводит к высокой интенсивности
 обработки, управление которой осуществляют при
 регулировке механизмов создания движения.

**Математическое моделирование кинематики
 рабочей среды при виброобработке.** Для более
 полного понимания и изучения характера движения
 рабочей среды в резервуаре гибридного
 вибростанка, реализующего мультиэнергетические
 технологии необходимо провести математическое
 моделирование кинематики виброкипящей
 гранулированной среды при обработке в
 колеблющемся резервуаре.

Модельные решения позволят рассчитать
 скорости перемещения потоков среды в любой точке
 резервуара, что необходимо для определения
 величин основных критериев операции
 виброобработки и области рациональных
 параметров технологического процесса для их
 достижения. Также моделирование позволит
 выявить зоны резервуара гибридного вибростанка с
 повышенным импульсным нагружением при
 комбинировании схем энергетического воздействия
 на рабочую среду и обрабатываемые детали (рис. 2).

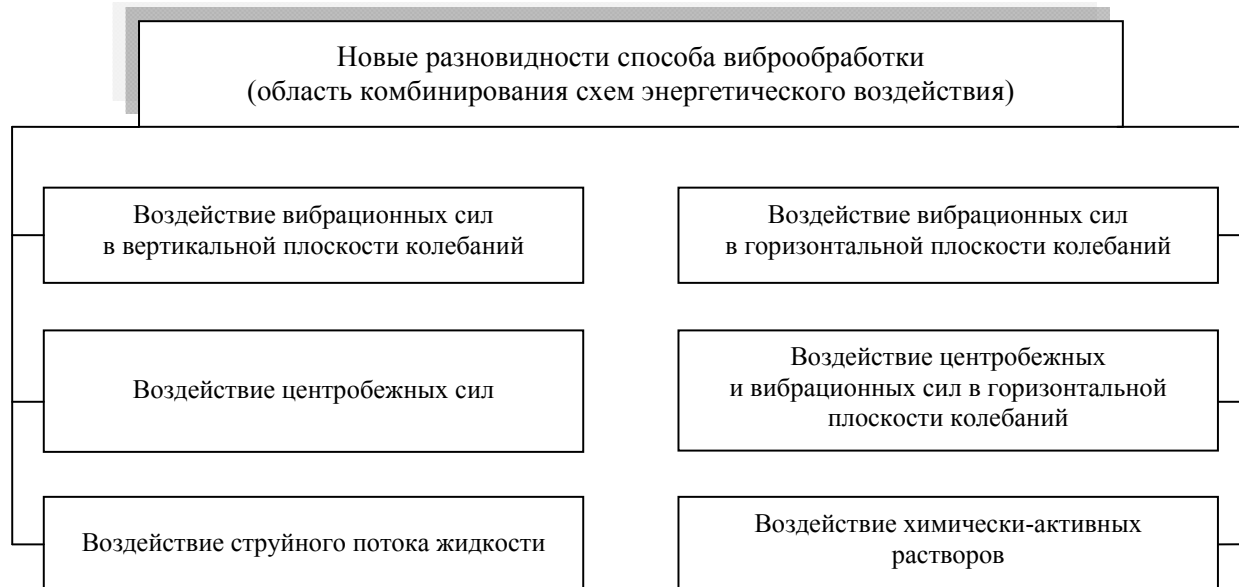


Рис. 2. Схемы энергетического воздействия на рабочую среду и обрабатываемые детали в процессе отделочно-зачистной обработки

Такие данные также будут полезны для выбора геометрических размеров резервуара при проектировании агрегатированных отделочно-зачистных станков вибрационного динамического воздействия.

Вернемся к утверждению, что в «U» – образном резервуаре днище в силовом отношении значительно более активно, чем прямолинейные поверхности стенок резервуара.

В этой связи представляет научный интерес рассмотрение кинематики рабочей среды, контактирующей с цилиндрическим днищем «U» – образного резервуара отделочно-зачистного вибростанка. В данной статье движение рабочей среды у цилиндрического днища резервуара целесообразно изучать на примере колебательного движения среды внутри кругового цилиндра. Рассматриваемые здесь особенности движения сохраняют свою общность и полную аналогию.

Постановка задачи моделирования. В основу модели положено предположение о том, что поведение массы гранул, находящихся под действием колебаний, аналогично поведению газа. Решение задачи нахождения зависимости поля скоростей элементарного объема гранул рабочей среды, а также его плотности и давления, от координат и времени необходимо искать с помощью уравнений Навье-Стокса, уравнений неразрывности и уравнений состояния газа. Однако, поиск решения этих уравнений даже при простых начальных и граничных условиях встречает непреодолимые математические трудности. Поэтому в данном случае пренебрегаем изменением плотности, гравитационным воздействием и конвективным ускорением. Все перечисленные упрощения согласуются с результатами экспериментальных исследований процесса виброобработки [1, 2, 11].

Исходные уравнения и граничные условия движения рабочей среды. Исходя из гипотезы прилипания [12], принимаем, что элементарный объем рабочей среды, находящейся на внутренней поверхности цилиндра, имеет скорость, равную скорости этой поверхности. Тогда, скорости гранул среды на границе цилиндра определяются следующим образом: $V_{O\varphi} = -A\omega \sin(\omega t - \varphi)$; $V_{Or} = -A\omega \cos(\omega t - \varphi)$ (рис. 3). Компоненты скорости элементарного объема гранул представлены в цилиндрических координатах $o\varphi$ и or . Ось oz расположена перпендикулярно плоскостям, i_r и i_φ – единичные векторы, направленные по радиусу цилиндра и тангенциально ему (рис. 3).

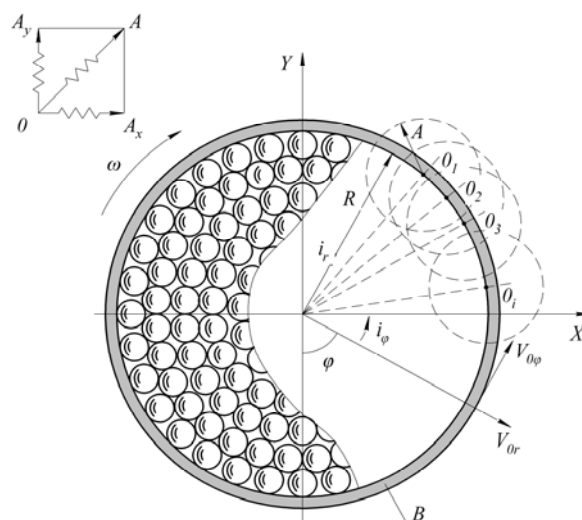


Рис. 3. Радиальная и тангенциальная составляющие скорости движения элементарного объема гранул рабочей среды внутри цилиндра

Решение упрощенных уравнений Навье-Стокса.

Исходя из сказанного выше, можно записать следующие упрощенные уравнения Навье-Стокса [13] в цилиндрических координатах:

$$\frac{\partial V_r}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \varphi^2} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial V_\varphi}{\partial t} = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial P}{\partial \varphi} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial \varphi^2} \right). \quad (4)$$

Здесь V_r и V_φ – скорости элементарного объема рабочей среды, направленные, соответственно, вдоль единичных векторов i_r и i_φ .

Для решения уравнений (3) и (4) использовался метод разделения переменных [14]. Были получены три типа уравнений, одинаковых для обоих компонент скорости, которые определяли радиальную $H(r)$, тангенциальную $g(\varphi)$ и временную $a(t)$ составляющие скоростей V_r и V_φ элементарного объема псевдо-газа из абразивных гранул:

$$x^2 \frac{d^2 H}{dx^2} + x \frac{dH}{dx} + H(x^2 - l) = \frac{lc}{\rho k}; \quad \frac{1}{g} \frac{d^2 g}{d\varphi^2} = l; \quad a = Ae^{\pm kt}. \quad (5)$$

Константы, определяются из граничных условий – $k = i\omega$, $l = -1$. Переменная x , введенная в ходе преобразований может иметь два значения – $w = \sqrt{\frac{k}{\nu}} r$, $z = i\sqrt{\frac{k}{\nu}} r$ в зависимости от знака перед постоянной k в выражении для $a(t)$. Уравнение для $H(r)$ является неоднородным дифференциальным уравнением Бесселя, решение которого имеет вид [15]:

$$H(x) = \frac{\pi}{2} Y_\nu(x) \int x J_\nu(x) m dx - \frac{\pi}{2} J_\nu(x) \int x Y_\nu(x) m dx. \quad (6)$$

Решение уравнения (6) определяется следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} H(z) = -\frac{\pi}{2} \frac{c_1 c_2 c_3}{\rho \omega} \{H_1^*(z) + iH_2^*(z)\}, \\ H(w) = \frac{\pi}{2} \frac{c_1 c_2 c_3}{\rho \omega} \{H_1^*(w) + iH_2^*(w)\}. \end{cases} \quad (7)$$

Окончательное решение уравнений (3) и (4) с граничными условиями $V_{0\varphi} = -A\omega \sin(\omega t - \varphi)$; $V_{0r} = -A\omega \cos(\omega t - \varphi)$ имеет вид:

$$V_r(t, r, \varphi) = \left(F_1^J(r^*) (D_r - B_r) + \frac{\pi}{2} R \omega A^2 (H_1^*(w) - H_1^*(z)) \right) \cos(\omega t - \varphi). \quad (8)$$

$$V_\varphi(t, r, \varphi) = -\left(F_2^J(r^*) (D_\varphi + B_\varphi) + \frac{\pi}{2} R \omega A^2 (H_2^*(w) + H_2^*(z)) \right) \sin(\omega t - \varphi). \quad (9)$$

Коэффициенты B_φ , D_φ , B_r , D_r входящие в выражения (8) и (9), определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} B_\varphi &= \frac{A\omega(1 - 2RA + \pi RAH_2^*(Z))}{2F_2^J(R^*)}; \\ D_\varphi &= \frac{A\omega(1 + 2RA - \pi RAH_2^*(W))}{2F_2^J(R^*)}; \\ B_r &= \frac{A\omega(1 + 2RA - \pi RAH_1^*(Z))}{2F_1^J(R^*)}; \\ D_r &= \frac{A\omega(-1 + 2RA - \pi RAH_1^*(W))}{2F_1^J(R^*)}. \end{aligned} \quad (10)$$

$$(11)$$

Для граничных условий $V_{0r}^1 = -A\omega \sin(\omega t - \varphi)$, $V_{0\varphi}^1 = -A\omega \cos(\omega t - \varphi)$ решение несколько видоизменяется: здесь $H_1^*(Z)$; $H_1^*(W)$; $H_2^*(Z)$; $H_2^*(W)$; $F_1^J(R^*)$; $F_2^J(R^*)$ представляют собой значения этих функций при $r = R$, $r^* = r\sqrt{\frac{\omega}{\nu}}$ (рис. 4). Поведение перечисленных функций в зависимости от безразмерного радиуса – r^* , а также зависимости $V_r(t, r, \varphi)$ и $V_\varphi(t, r, \varphi)$ при $\varphi = 0$ показаны графически (рис. 5, 6).

Графическая зависимость для $V_r(t, r, \varphi)$ показывает, что радиальная $V_r(r^*)$ компонента скорости движения гранул описывается только вдоль временной оси $T = 2\pi/\omega$.

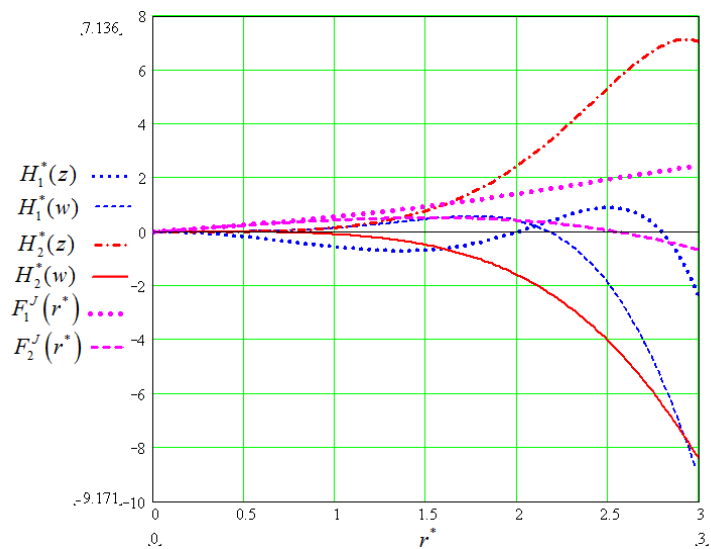


Рис. 4. Зависимость функций $H_1^*(Z)$; $H_1^*(W)$; $H_2^*(Z)$; $H_2^*(W)$; $F_1^J(R^*)$; $F_2^J(R^*)$

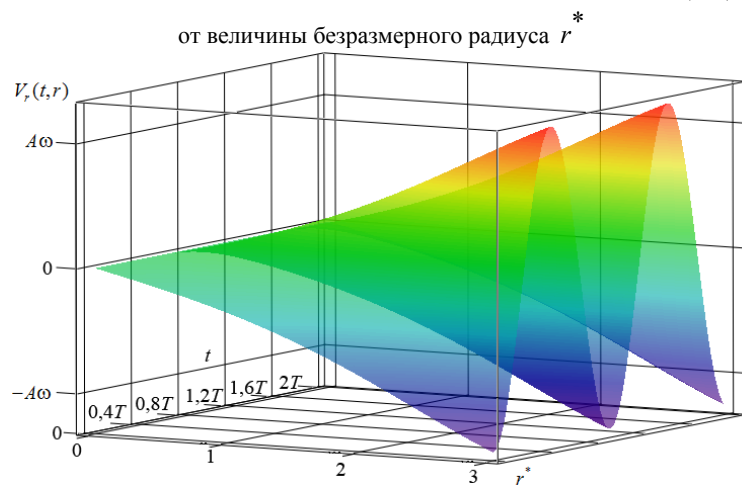


Рис. 5. Зависимость $V_r(t, r, \varphi)$ радиальной составляющей скорости движения гранул среды внутри колеблющегося цилиндра от его радиуса и периода колебания $T = 2\pi/\omega$

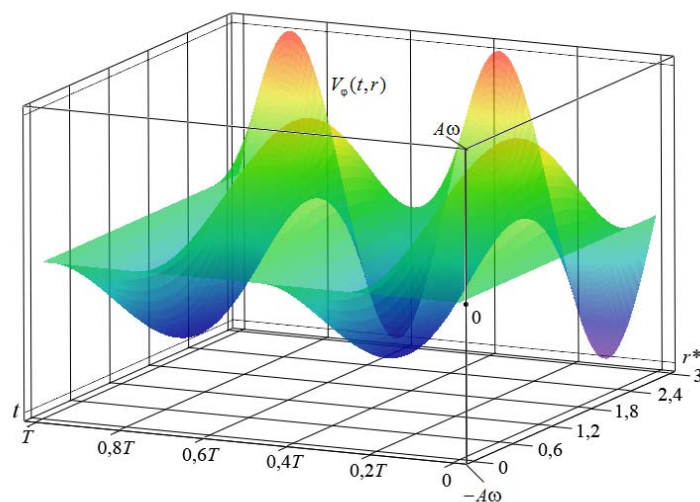


Рис. 6. Зависимость $V_\varphi(t, r, \varphi)$ тангенциальной составляющей скорости движения гранул среды внутри колеблющегося цилиндра от его радиуса и периода колебания $T = 2\pi/\omega$

Графическая зависимость для $V_{\varphi}(t, r, \varphi)$ описывает колебательное движение рабочей среды, как вдоль временной оси, так и в радиальном направлении. Такое поведение, в циркуляционном движении колеблющейся рабочей среды весьма характерно для волновых процессов. Из волновых свойств $V_{\varphi}(t, r, \varphi)$ можно сделать следующие выводы:

– волновой характер поведения $V_{\varphi}(r^*)$

означает, что тангенциальная составляющая скорости движения гранул среды будет иметь различное направление при изменении удаления от рабочей поверхности цилиндра или от его оси;

– на кривой $V_{\varphi}(r^*)$ можно выделить три участка, которые характеризуют изменение ее поведения по мере удаления от рабочей поверхности цилиндра к его центральной части. На первом отрезке, когда $2,6 \leq r^* \leq 3$, модуль функции убывает от $A\omega$ до нуля, на втором отрезке, когда $1,5 \leq r^* \leq 2,6$, модуль функции растет от нуля до $\approx 0,8A\omega$, на третьем участке $V_{\varphi}(r^*)$ вновь стремится к нулю.

Следовательно, поведение тангенциальной $V_{\varphi}(r^*)$ составляющей скорости движения гранул среды означает, что изменяя радиус днища резервуара вибростанка, можно обеспечить, как увеличение модуля тангенциальной составляющей скорости по мере удаления от рабочей поверхности резервуара к его центру, так и его снижение. Иными словами, существует возможность оптимизировать конструктивные параметры резервуара вибростанка применительно к требуемому технологическому результату обработки. Основным фактором определения конструктивных параметров является величина $\bar{L} = \sqrt{\frac{v}{\omega}}$, имеющая размерность длины.

Кроме того, увеличение тангенциальной $V_{\varphi}(r^*)$ составляющей скорости движения гранул рабочей среды носит характер кумуляции кинетической энергии тангенциального потока. Такие физические эффекты целесообразно использовать в новых разновидностях процессов виброобработки, связанных с использованием различных схем энергетического воздействия на рабочую среду и обрабатываемые детали [5, 16].

Выводы. Таким образом, проведенные исследования позволили установить характерные особенности динамики рабочей среды в технологической системе. При этом выявлено, что основными физическими элементами в

виброобработке являются процессы микрорезания и упругопластического деформирования. Также определен безразмерный характер виброобработки и предложена ее механо-физико-химическая модель при разрушении поверхности детали в среде колеблющихся гранул свободной абразивной среды.

В результате экспериментальных обработок изделий из различных металлов установлены величины съема металла и шероховатости поверхности для операций виброобработки, а также область рациональных параметров технологического процесса для их достижения.

Проведенное описание кинематики виброкипящей гранулированной среды при обработке в колеблющемся резервуаре позволяет рассчитать динамику рабочей среды в резервуаре с учетом «отрыва» среды от поверхности резервуара и последующей их «встречи». Для этого необходимо разложить в ряд Фурье периодическое негармоническое изменение скорости гранул граничного слоя среды, контактирующего с рабочей поверхностью резервуара. Тогда новое решение будет определяться суммой решений, найденных для случая гармонического изменения скорости гранул граничного слоя, принятых со своими частотами и весовыми коэффициентами.

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. 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.
3. Развитие вопросов кинематики и динамики процессов отделочно-зачистной обработки в колеблющемся резервуаре / Мицык А.В., Фадеев В.А., Федорович В.А. // Резание и инструмент в технологических системах: сб. науч. прац. – Х.: НТУ «ХПИ», 2012. – Вип. 82. – С. 171 – 182.
4. Mityuk A.V., Fedorovich V.A., Mamalis A.G., Kundrak J Development of Modular Machine Design and Technologies of Dynamic Action for Finishing-Grinding Treatment by an Oscillating Abrasive Medium. Journal of Machining and Forming Technologies. 2015. 7, 1-10.
5. 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.
6. Бабичев А.П. Наладка и эксплуатация станков для вибрационной обработки / А.П. Бабичев, Т.Н. Рысева, В.А. Самодуров, М.А. Тамаркин. – М.: Машиностроение, 1988. – 64 с.
7. Мицык А.В. Повышение эффективности обработки крупногабаритных плоскостных изделий активизацией движения рабочей среды в колеблющихся «U» – образных контейнерах: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Мицык Андрей Владимирович. – Харьков, 2008. – 331 с.

8. Новая разновидность способа отделочно-зачистной обработки и агрегатированный вибростанок вибрационного и центробежного динамического воздействия / Мицык А.В., Федорович В.А. // Резание и инструмент в технологических системах: сб. науч. прай. – Х.: НТУ «ХП», 2012. – Вип. 86. – С. 96 – 102.
9. Аналітика, коментарії і класифікація технологій отделочно-зачистної виброобработки, созданных комбинированием различных схем энергетического воздействия / Мицык А.В., Федорович В.А. // Сучасні технології в машинобудуванні: сб. науч. прай. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – Вип. 11. – С. 175 – 189.
10. 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.
11. Мицык А.В., Федорович В.А. Развитие новых технологий вибрационной отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей общемашиностроительного применения. // Вісник НТУ «ХП». Серія Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків НТУ «ХП». – 2012. – № 47 (953). – С. 226 – 233.
12. Batchelor G.K. An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2000. – 615 p.
13. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учебное пособие. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. – 5-е изд., стер. – М.: Физматлит, 2006. – 736 с.
14. Tun Muint-U, Lokenath Debnath. Linear Partial Differential Equations for Scientists and Engineers. Boston: Birkhäuser, 2007. – 778 p.
15. Watson G.K. A treatise on the theory of Bessel Functions. England: Cambridge University Press, 1995. – 794 p.
16. Эффективность новых разновидностей способа вибрационной обработки деталей / Мицык А.В., Федорович В.А., Фадеев В.А. // Сучасні технології в машинобудуванні: сб. науч. прай. – Х.: НТУ «ХП», 2012. – Вип. 7. – С. 74 – 81.
- red. A.P. Babicheva. – Rostov n/D: Izdatel'skij centr DGTU, 2010. – 289 s.
6. Babichev A.P. Naladka i jekspluatacija stankov dlja vibracionnoj obrabotki / A.P. Babichev, T.N. Ryseva, V.A. Samodurov, M.A. Tamarkin. – M.: Mashinostroenie, 1988. – 64 s.
7. Mitsyk A.V. Povyshenie jeffektivnosti obrabotki krupnogabaritnyh ploskostnyh izdelij aktivizaciej dvizhenija rabochej sredy v kolebljushhihsja «U» – obraznyh kontejnerah: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.03.01 / Mitsyk Andrej Vladimirovich. – Kharkov, 2008. – 331 s.
8. Novaja raznovidnost' sposoba otdelochno-zachistnoj obrabotki i agregatirovannyj vibrostanok vibracionnogo i centrobezhnogo dinamicheskogo vozdejstviya / Mitsyk A.V., Fedorovich V.A. // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah: zb. nauk. prac'. – K.: NTU «KPI», 2012. – Vip. 86. – S. 96 – 102.
9. Analitika, komentarii i klassifikacija tehnologij otdelochno-zachistnoj vibroobrabotki, sozdannyh kombinirovaniem razlichnyh shem jenergeticheskogo vozdejstviya / Mitsyk A.V., Fedorovich V.A. // Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni: zb. nauk. prac'. – K.: NTU «KPI», 2016. – Vip. 11. – S. 175 – 189.
10. Mitsyk A.V. Puti intensifikacii vibracionnoj otdelochno-zachistnoj obrabotki kombinirovaniem shem jenergeticheskikh vozdejstvij na rabochuju sredu i detali / A.V. Mitsyk, V.A. Fedorovich // Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologija. – 2011. – № 6 (83). – S. 26 – 34.
11. Mitsyk A.V., Fedorovich V.A. Razvitie novyh tehnologij vibracionnoj otdelochno-zachistnoj i uprochnjajushhej obrabotki detalej obshhemashinostroitel'nogo primeneniya. // Visnik NTU «KPI». Serija Novi rishennja v suchasni tehnologijah. – Kharkov NTU «KPI». – 2012. – № 47 (953). – S. 226 – 233.
12. Batchelor G.K. An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2000. – 615 p.
13. Landau L.D., Lifshic E.M. Teoreticheskaja fizika: Uchebnoe posobie. V 10 t. T. VI. Gidrodinamika. – 5-е изд., стер. – М.: Физматлит, 2006. – 736 с.
14. Tun Muint-U, Lokenath Debnath. Linear Partial Differential Equations for Scientists and Engineers. Boston: Birkhäuser, 2007. – 778 p.
15. Watson G.K. A treatise on the theory of Bessel Functions. England: Cambridge University Press, 1995. – 794 p.
16. Jefferktivnost' novyh raznovidnostej sposoba vibracionnoj obrabotki detalej / Mitsyk A.V., Fedorovich V.A., Fadeev V.A. // Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni: zb. nauk. prac'. – K.: NTU «KPI», 2012. – Vip. 7. – S. 74 – 81.

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. Obrabotka detalej svobodnymi abrazivami v vibrirujushhih rezervuarah: monogr. / I.N. Kartashov, M.E. Shainskij, V.A. Vlasov i dr. – K.: Vishha shkola, 1975. – 188 s.
3. Razvitie voprosov kinematiki i dinamiki processov otdelochno-zachistnoj obrabotki v kolebljushhemsja rezervuare / Mitsyk A.V., Fadeev V.A., Fedorovich V.A. // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah: zb. nauk. prac'. – K.: NTU «KPI», 2012. – Vip. 82. – S. 171 – 182.
4. Mitsyk A.V., Fedorovich V.A., Mamalis A.G., Kundrak J Development of Modular Machine Design and Technologies of Dynamic Action for Finishing-Grinding Treatment by an Oscillating Abrasive Medium. Journal of Machining and Forming Technologies. 2015. 7, 1-10.
5. 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

Міцник А.В. Наукові основи визначення та математичне моделювання критеріїв операцій віброобробки та області раціональних параметрів технологічного процесу для їх досягнення

Дана фізична сутність процесу віброобробки, а також особливості механіки робочого середовища і технологічні можливості віброобробки. Вказані відмітні ознаки віброобробки, отримана механо-фізико-хімічна модель руйнування поверхні деталі. Наведено критерії операції віброобробки та аналітичні вирази для їх розрахунку. Дано технологічні рекомендації щодо вибору параметрів для різних операцій віброобробки. Проведено математичне моделювання кінематики робочого середовища. Наведено вихідні рівняння і граничні умови руху робочого середовища. Запропоновано рішення спрощених рівнянь Нав'є-Стокса.

Ключові слова: операції віброобробки, робоче середовище, зйом металу, шорсткість поверхні, циркуляція середовища, механо-фізико-хімічна модель, критерії операцій, схеми енергетичного впливу, рівняння Нав'є-Стокса.

Mitsyk A.V. Scientific basis for determining the criteria and mathematical simulation of vibration treatment operations and the field of rationale parameters of technological process to achieve them

A physical nature of vibration treatment process as well as the special features of the mechanics of working medium and technological possibilities of vibration treatment are described. It is established that as a result of mutual relative movement and the pressure of medium granules and processed parts the microcutting processes and the elastoplastic deformation take place. It ensures removal of the defective metal layer as well as reducing the surface roughness of the parts. The distinctive indications of vibration treatment are shown, mechanical and physical-chemical model of the part surface fracture is obtained. The vibration treatment operations criteria and the analytic expressions for their calculation are given. The technological recommendations on

the choice of parameters for different vibration treatment operations are given. The mathematical simulation of working medium kinematics is conducted. The original equations and boundary conditions of working medium movement are presented. The solutions of simplified Navier-Stokes equations are offered.

Key words: vibration treatment operations; working medium; metal removal; surface roughness; medium circulation; mechanical and physical-chemical model; criteria of operations; the schemes of energy action; Navier-Stokes equations.

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

Рецензент: д.т.н., проф. **Носко П.Л.**

Стаття подана 17.09.2016

УДК 621.039

INCREASING OF DETAILS SURFACE QUALITY BY VIBRATING PROCESSING

Nikolaenko A.P.

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ДЕТАЛЕЙ
МЕТОДОМ ВІБРАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ

Ніколаєнко А.П.

The questions of surface quality increasing is considering in the article. An improvement of quality, increase of reliability and longevity of the produced machines and wares are among the major tasks of modern engineering. One of methods to increase the productivity and quality in metal-treatment is the vibrating finishing. The results of experimental researchers of vibrating treatment influence on details surface are presented in the article.

Key words: vibrating treatment, surface quality, surface roughness, increase of productivity, microhardness

Introduction. A modern world consumes vast amounts of power generated by engines and motors, transferred by gear boxes and drivetrains all of which have component parts that are subject to heat, abrasion, vibration, wear, combustion and accumulated deposits. A world of vehicles and transport systems operating in extremes of temperature, humidity, harsh salt and chemical environmental attack, causes corrosion, paint and coating deterioration and the seizing of component parts. The followings technological methods of increase of durability, wearproofness and wear resistance of machine parts are most widespread:

- chemicothermal treatment: cementation, nitriding chrome-plating, cyanidation, silicification, alitizing, sulphurizing and others;
- heat treatment: flaming hard-facing, high-frequency tempering, hard-facing with heating in an electrolyte, laser work-hardening;
- chemical treatment: deep anodization, oxidizing, phosphating;
- superficial flowage: rolling by marbles and hard-alloy rollers, shot-peening, vibroabrasive consolidating treatment;
- diamond burnley, work-hardening, hydrofinishing, treatment of surface an explosive ladening a coinage;
- electric-spark work-hardening;
- galvanic coverages: chrome-plating, nickelage, borating, silvering, tinning, leading and coverage alloys;

– chemical coverages: nickelage, chrome-plating, coverage a cobalt and alloys a nickel is a cobalt;

– methods of giving the surface of anti-friction properties: graphitization, rolling (deepenings, ditches), overcoating in a vacuum, causing of molykote, friction brassing and bronzing, coverage plastics (vortical and gas-flame methods), metallization with evaporation;

– surfacing: electric arc, electro-slag, vibroarc.

Among the methods of flowage large interest is presented by vibroabrasive consolidating treatment. Vibrating treatment is made on machine-tools with U – shaped form of container. Containers make with a different size alongside, by volume of from 3 to 1000 l and more. Machine-tools provide possibility of work on the different modes (amplitudes from 0,5 to 7-10 mm and frequencies 33-80 Hertz). Thus in a container simultaneously load the far of details. Exactly universality of equipment for vibrating processing provides possibilities of realization with his help of a number of operations, such as cleaning, finishing, and including hardening.

The analysis of researches and publications.

One of methods to increase the productivity and quality in metal-treatment is the vibroabrasive finishing. Its advantages consist in large technological possibilities. It allows to carry out the wide range of operations: from crude felling workmanships, removal of dross and welding burr, to polishing and decorative finishing. It provides a quick reconditioning, reclamation and renewal of dirty, corroded, worn machined components. And is of vital importance to mechanical engineers, in the process of maintenance, component re-claim, rebuilders and re-manufacturers. Maintenance, cleaning and refurbishment of private and commercial transport components for passengers and cargo. These include rockets, satellites, aircraft, trains, ships, cars, vans, trucks, buses and coaches. A modern world consumes vast amounts of power generated by engines and motors, transferred by gear boxes and drivetrains all of which have component parts that are subject to heat,

abrasion, vibration, wear, combustion and accumulated deposits. A world of vehicles and transport systems operating in extremes of temperature, humidity, harsh salt and chemical environmental attack, causes corrosion, paint and coating deterioration and the seizing of component parts (fig. 1) [1, 2].



Fig. 1. Examples of details with complex surfaces, which can be treated in vibrating machine-tools

Vibrotreatment of steel plate, profiles, construction, and fabrications is a process to clean, descale, provide a specified surface profile and edge break as a surface preparation. This process takes place prior to a coating or paint application to maximise the adherence potential and corrosion control. High indexes on universality, productivity, quality of the got surface, firmly fastened the place of perspective methods of making of details of machines and devices after it, and also commodities of folk consumption.

Consolidating vibrotreatment improves operating properties of details, promoting wearproofness and tireless durability due to the increase of microhardness and creation of squeezing tensions in a superficial layer. The arrived at level of properties of material of the deformed details is related to the change macro - and microstructures. It is set that structure of material of details, exposed to the oscillation loading, in the area of treatment more even and fine-grained [3, 4].

In literature these experimental influences of vibrating processing are widely presented on quality of superficial layer of details, got different researchers [1 – 5]. However, their failing is that they over are brought for different materials of details, working environments, technological liquids, types of machine-tools, types of treatment (rough cleaning, polishing, polishing or work-hardening), that cause complication of analysis and comparison of these information [3, 4]. Thus possibilities of oscillation treatment as backer-ups of the required operating properties of details will be realized not to a full degree.

It ensues from the analysis of a priori information resulted higher, that to date contradictory results are present on research of vibrating treatment process, that is related above all things to that researches were conducted on a different equipment and different modes, with the use of different processing environments-instruments [1, 3 – 5]. The task of increase of the vibrating treatment productivity without the increase of power-hungryness of process is possible

to decide by the choice of optimum parameters of instrument and amount of his loading depending on the form of workparts, their initial state, material which they are made from.

The real surface of solid is always rough. It has burries regardless of method of their receipt. It is explained: 1) by nature of physical surface, conditioned by the discrete, atomic-molecular structure of solid; 2) after tooling on-the-spot there always are tracks of instrument cutting edge action as ledges and cavities of different form and sizes.

Under the roughness of surface, ensuing treatment, the aggregate of burries is understood with relatively by small steps, formative relief of surface and examined within the limits of area length of which gets out depending on character of surface and equal to base length.

Roughness of surface after tooling – it is, foremost, geometrical track of toolpiece (metallic or abrasive), distorted as a result of plastic and resilient deformations and concomitant to the process of cutting of vibration of the technological system.

Results of experimental researches. The task of experimental researches is to establish the influence of vibrating processing on quality of details surface. The treatment of the parts was held on vibrating machine-tool *VMI-1003*, the parameters of which are resulted in a table 1.

Table 1

Parameters of machine-tool of VMI-1003

Parameters of machine-tool	Range of size
1. Volume of container V , m^3	15
2. Amplitude of vibrations A , mm	0,5-2,0
3. Frequency of vibrations f , Hertz	35, 63
4. Power N , kW	0,7
5. Mass m , kg	200

At researches an equipment and rigging of research laboratory of the V. Dahl East-Ukrainian national university was used. This laboratory has a row of operating oscillation machine-tools with the U-shaped containers of different volume and inertia vibroexciters the general of principle chart of which is presented on a fig. 2.

During carrying out tests the followings permanent terms were accepted:

- filling of working chamber content on 75 % from his general volume;
- simultaneous treatment of ten standards of the accepted material and size.

In order to determine micro hardness of the treated surface a metallography microscope MIM-7 was used. It consists of the optical, lighting and mechanical systems. On him it is possible to probe not only the structure of metal but also to get the pictures of microstructures. General view of microscope on a fig. 3.

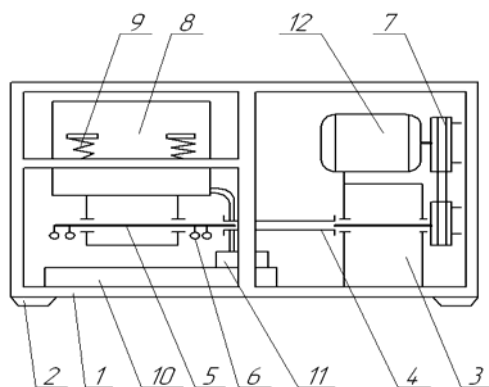


Fig. 2. A principle chart of machine-tool of model VMI-1003:

- 1 – framework with foundation; 2 – shock absorbers;
 3 – an electromechanics drive; 4 – a flexible muff;
 5 – a bellow of vibroexciter; 6 – loads;
 7 – a V-belt transmission; 8 – a container;
 9 – a spring pendant; 10 – settler;
 11 – an electromagnetic valve; 12 – is an electric motor

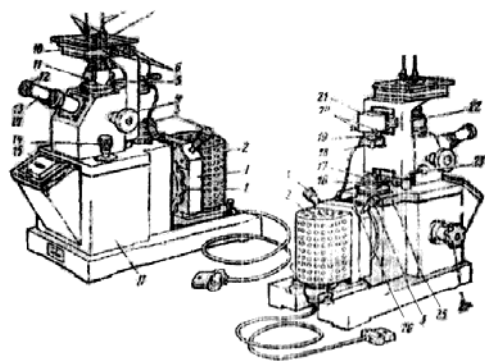


Fig. 3. General view of microscope MIM-7

A microsection is set on lining 7 (fig. 3) objective table 10 by the polished surface downward, preliminary making sure, that the ray of light, passing through a lens, gets in opening on an objective table. Aiming on a sharpness (focusing) is conducted at first by a macrometric screw 4, preliminary wringing out a stop screw 23. Looking after in an eyepiece 12, by the rotation of macrometric screw 4 to make the rough aiming, whereupon to clutch a stop screw 23.

The scopes of grains under a microscope look dark, because as in the places of deepenings the rays of light disperse.

In order to determine influence of vibrating processing on durability and wear resistance of details a machine of friction was used (fig. 4).

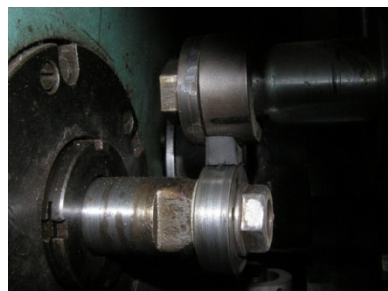


Fig. 4. Tests of materials on a wear at sliding and rolling friction with the pair of samples disk-rubber pad

The machine of model of SMC-2 is intended for the test of materials on a wear and determination of their anti-friction properties at sliding and rolling friction at normal temperatures with the pair of sample disk-disk, disk-rubber pad and hob-billow.

Determination of microstructure and hardening of material.

A purpose of treatment is study of macro- and microgeometry, diminishing of parameter of surface roughness, change of sizes of purveyance to possible, change of structure of material without his complete recrystallization (superficial peening), creation of the certain tense state (tense superficial peening).

A purpose of work is an estimation of possibility of receipt of peening on details without fixing. For this purpose next experimental researches were conducted with the use of microstructure method.

30 standards from steel 45 (table. 2) were selected. Their form was cylindrical with sizes: diameter $d=16$ mm, length $L=50$ mm, they were got from a bar with the diameter $d=16$ mm.

Table 2

Chemical composition of materials of the processed samples

Material	σ_B , N/mm ²	$\sigma_{0.2}$, N/mm ²	Chemical composition	Hardness	
				On-the-spot purveyance	On the cut line
Steel 45	600	355	0,45% With; 0,72% Mn; 0,29% Si; 0,020% S; 0,028% P	HB 234	HB 240

Steel 45 belong to the pearlitic class.

Treatment of samples was conducted during 3 hours on the machine-tool of VMI-1003: the volume of container $V = 15$ l, power $N = 0,7$ kWt, mass $m = 200$ kg. On the followings modes: vibrations amplitude $A = 1$ mm, vibrations frequency $f = 63$ Hz; in an environment, consisting of the steel hard-tempered polished balls with the diameter of 3 mm and chemically active solution (a soda ash, triethanolamine, olein acid).

Treatment was conducted with weighing of samples before and after treatment on the analytical scales.

As is generally known, microanalysis allows to explain reasons of change of properties of metals and alloys depending on the change of chemical composition and terms of treatment, because between a microstructure and properties of metals there is certain dependence.

A task was put:

- determinations of form and size of crystalline grains which a metal or alloy consists of;
- establishments changes of internal structure, what be going on in the probed material under influence of different sort of influences at treatment pressure;
- exposures of nonmetallics (sulfides, oxides et cetera);
- exposure of defects of metal – micro cracks, shells, pores et cetera

The microstructure method of research of metals and alloys consists of the followings; stages:

1. preparation of microsections;
2. etching of microsections;
3. study of structure and vices of metals and alloys under a microscope.

1) Preparation of microsections was conducted in the following order:

First, a selection of samples and his undercut. A sample got out from that part of metal, which most characterizes the structure of all detail. Samples were cut out standard sizes so that the structure of metal did not change (table 2); Second, sample was polished on sandpaper with grains of different sizes with a transition from more large grain to more shallow. Marks, which were left after polishing, retired with finishing. As is generally known, it is possible to apply the mechanical, chemi-mechanical or electrochemical methods of polishing. In this case a mechanical polish was made on thick felt circles, fastened on the circle of the special polishing machine-tool, on which inflicted the shallow particles of abrasive materials.

For the protection of samples' edges from heaping up, because in this case there was of interest a border layer, the following method was used: part of sample was placed in the ring of greater diameter and inundated epoxid rubber (TU-U 24.6–2558309112–004–2003) to the complete hardening, the repeated polishing and polishing of sample (fig. 5) was whereupon conducted on the machine-tool.

As is generally known [2], the special attention is required by an etch and cleaning of sample's surface after an etching. Samples were polished mechanically very carefully, that at a 500-multiple increase an optical microscope it was not visible scratches.

2) Etching of microsections. The turning out after polishing mirror surface of sample under a microscope has the appearance of light circle and does not allow to judge a metal or alloy about a structure. Only the nonmetallics (for example, sulfides in steel, rules in cast-iron) due to their painting in different colors are selected on the light background of the polished microsection [2]. For the exposure of structure a microsections was exposed to the etching. Most widespread etches for steels and cast-irons is 4 % natal. An etch was carried out causing of reagent (4 % natal) on the polished surface of sample by a wadding tampon.



Fig. 5. Samples in steel rings

Under the action of reagent as a result of different intensity of dissolution of separate structural constituents and their scopes on-the-spot microsections relief appears. The scopes of grains take poison stronger than grains, because the superficial layers of grain are enriched admixtures, in connection, what galvanic pair appear with, a crystalline grate at scopes grains is in more distorted and tense state, than at back of grain. Therefore in places, proper the scopes of grains, deepenings turn out after an etch. Structural constituents with high electrode potential poorly take poison and come forward above the surface of structural constituents with more low electrode potential, which take poison stronger. Thus, numerous cavities and ledges appear on the microsection surface.

At illumination of microsection falling light on a metallography microscope the rays of light are variously reflected from the differently stained areas. That of them, which were etching poorly, reflect in sign of microscope more light and under a microscope will seem light. Other, stained strongly, will seem dark because of dispersion of light (the less rays of light will get in sign of microscope).

For research of microstructure of metals and alloys utilize optical and electronic microscopes. The choice of multipleness of increase of microscope depends on the size of the studied element of structure. The size of grains, size and location of nonmetallics, is set at multipleness by increases in 100 times. The structure of separate grains is studied at an increase in 200 – 300 times, and sometimes and at greater multipleness [2]. This experiment was conducted on a metallography.

To estimate the size of the work-hardened layer after vibrating an experiment on determination of microhardness of material of that sample was conducted. An experiment was conducted on the device of PMT – 3 by pressing of diamond pyramid in the ferritic constituent of sample surface (fig. 6), on-loading

50 g. Measurements were conducted from the center of sample to the edge, on a radius.

A research purpose is an estimation of vibrating treatment influence on the microhardness of coating surface of sample.

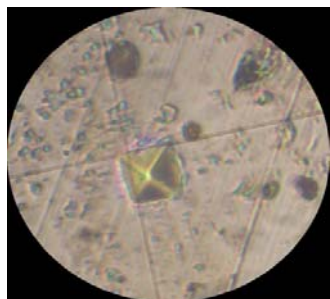


Fig. 6. Imprint of diamond pyramid at measuring of microhardness ($\times 100$)

The microstructure method of research was used to confirm the possibility to get high microhardness of coating surface.

As imitators of details were samples, made from flats, cut on plates with sizes $10 \times 30 \times 50$ mm from materials: steel 3, steel 20 and steel 45 (fig. 7). The first group of samples were polished on the machine-tool model «ПШСМ-2», second – processed on the machine-tool «UVI-25» during 40 minutes in an environment, consisting of breakage of abrasive disc (AN-2), and then during 20 minutes on the machine-tool of «VMI-1003», in an environment, consisting of the steel chilled polished balls, 5 mm diameter.

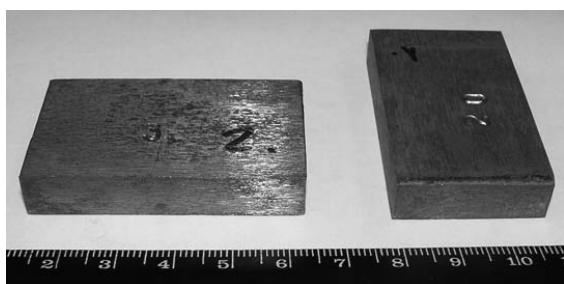


Fig. 7. Samples before treatment with pointing of brand

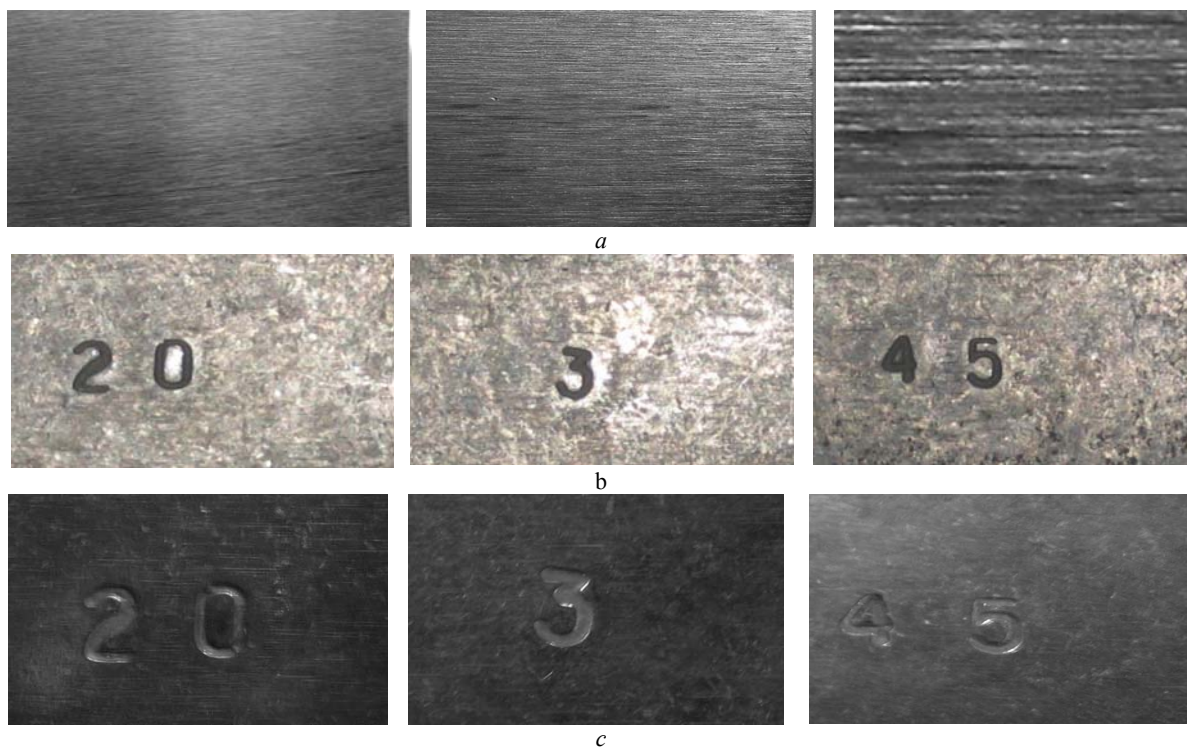


Fig. 8. Samples after the different methods of treatment:
a – after the traditional polishing; b – after the vibrating polishing in AN-2 (40 minutes);
c – after vibrating polishing in steel balls (20 minutes)

Quality of sample's surface before treatment, after the traditional polishing, vibropolishing (in AN-2) and vibropolishing (in steel chilled polished balls) is resulted on a fig. 8.

Tracks of corrosion, contaminations, and also local defects as pores and shallow scratches are obviously visible on the surface of sample before treatment.

After the traditional polishing the surface of samples (fig. 8, a) is covered by even tracks from a polishing instrument as circular marks or furrows with the height of relief roughness from 6,3 to 25 mkm, wire-edge were saved.

The material changes on the details surface observed after the vibrating polishing. The treated surface is smooth, mat, without tracks of treatment with the height of burries of relief of Ra from 0,32 mkm to 6 mkm, nicks-and-burrs absent contoured, the directed tracks from an instrument are not observed (fig. 8, b).

The received structures of samples before and after treatment are resulted accordingly on a fig. 9.

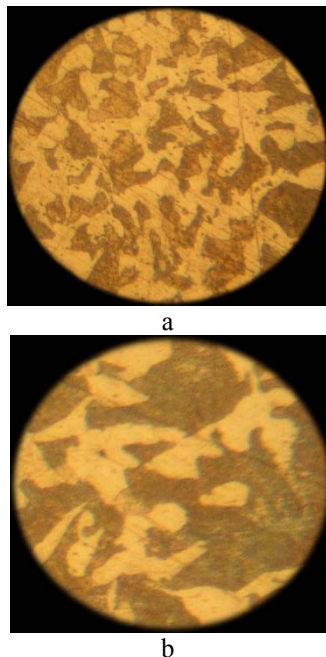


Fig. 9. Structure of metal:
a – before treatment; b – after vibrating (100)

As be obvious from a fig. 9, the structure of steel did not change substantially, remained even on all surface of samples. However much obvious changes happened in the structure of border-line layer. On a fig. 10 the border-line layers of samples are shown before and after treatment.

On the pictures evidently, that samples after treatment have a sharp-edged even border-line layer with the close-settled structure of grains. Oscillation treatment creates work-hardening of superficial layer (peening) the size of which makes 0,03...0,05 mm, that in 10 times there is a less size, offered by other authors [1, 5]. However necessary it is to take into account that vibrating treatment was conducted on the machine-tool of VMI-1003 with the volume of container 15 l, with amplitude 1,0 mm, that on the soft modes.

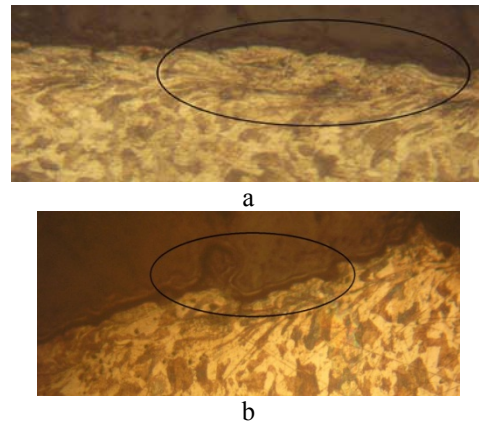


Fig. 10. Border-line layer of detail:
a – before treatment; b – after vibrating

To estimate the size of the work-hardened layer after vibrating treatment, an experiment on determination of microhardness of material of that sample was conducted. An experiment was conducted on the device of «PMT-3» by pressing of diamond pyramid in the ferritic constituent of surface of standard (fig. 11), on-loading 0,5 N. Measurements were conducted from the center of standard to the edge, on a radius. Estimation of microhardness of superficial layers was conducted before and after vibrating treatment (through 60, 240 and 480 mines). The results measuring presented in a table. 3.

Table 3

Surface microhardness of samples

Points	Hardness, MPa
1	927 – 929
2	927 – 929
3	927 – 929
4	927 – 929
5	927 – 929
6	927 – 929
7	927 – 929
8	927 – 929
9	929 – 933
10	930 – 933

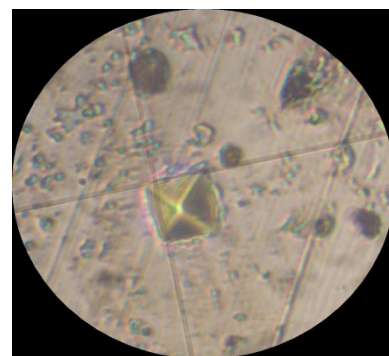


Fig. 11. An imprint of diamond pyramid at measuring of microhardness ($\times 100$)

By an experiment existence of the work-hardened border-line layer was well-proven even on the "soft"

modes of treatment. Nearer to the border of sample large hardness was got, what in a center is talks about peening of superficial layer of metal, that corresponds to presentations in [1, 2]. For achievement of stable result it is necessary to produce the choice of the modes of this operation, and, exactly, to pick up frequency and main amplitude of vibrations of environment, and also sizes of instrument – steel balls.

Determination of durability and wear resistance of details.

Damage of details and workings parts of machines at normal external environments is investigation of physical wear of different kinds: tireless destructions, creep of materials, mechanical wear, corrosion, erosion, senescence of material and other. Therefore the increase of his wear resistance is very important for the improvement of quality of good (it is property of material to offer resistance to the wear in the certain terms of friction, estimated a size, to reverse speed of wear or intensity of wear).

A microhardness Nm is very important making description of physic-machanical properties of superficial layer, and it is necessary to examine it as a result of elastoplastic deformations, shock wave processes accompanying oscillation influence caused an action [1].

Influence of working environment was also investigational on a change the microhardness of superficial layer of samples in the environment of steel hard-tempered balls of $d=(3-4)$ mm (1), porcelain balls of $d=(20-25)$ mm (2) and abrasive granules (AN-2) (3).

Mode and duration of treatment: $A=1,5$ mm, $f=63$ Hertz, $t=120$ mins. The processed samples had a rectangular form $10 \times 20 \times 5$ mm and were made from hard-tempered and anneal steel 45. A microhardness was measured on the depth of 10 mkm for hard-tempered samples and on the depth of 20 mkm for anneal.

For determination of influence of vibrating treatment on wear resistance of details the row of researches was conducted.

Two complete sets of samples (fig. 12) were made from three types of material: steel 3, steel 45 and steel R9. The first group of samples after lathe clean treatment ($R_a = 6,3$ mkm) was precipitated polishing on the machine-tool ($R_a = 3,2$ mkm), second - after lathe clean treatment ($R_a = 6,3$ mkm) processed on the vibrating machine-tool of VMI-1003 during 180 mines in the steel hard-tempered marbles of $d=5$ mm ($R_a = 3,2$ mkm).



Fig. 12. Samples for measuring of wear resistance of details

These samples in a form of rollers were used as a disk in the ground pair «disk-rubber pad». As pads samples from rubber were used. There hardness was (on Shor A – $A = 65-80$) GOST 7338-77.

An experiment was conducted in a few stages:

1. The prepared samples were weighed on analytical scales.

2. Samples were processed on the machine of friction dry-sand, without cooling, during 78 seconds (to the moment began melting of rubber) for 20 approaches for every sample.

3. After completion of treatment weighing was repeated.

During the hardness of samples was also certain on Brinell before and after treatment.

Hardness of material in a starting condition of samples from steel 3 was 170...187 HB. For steel 45 hardness had the followings values: 124...131 HB. For steel R9 hardness was 179...187 HB. An initial roughness of all samples was 6,3 mkm.

Steel 3 was not expose to heat treatment. Steel 45 exposed to tempering to the microhardness 270...320 HB. High-speed steel R9 was exposed to tempering with subsequent 4-th multiple vacation to HRC 63...66.

Further part of samples was exposed to the traditional polishing, and other part – to vibrating processing to the roughness of surface, equal 3,2 mkm.

After treatment on the machine of friction next results were got. For steel 3 after the traditional polishing the wear of material made ~0,0135 gr. After vibrating processing the size of material wear did not change and made also ~0,0135 gr.

For steel 45 after the traditional polishing the wear of material made 0,015 gr. After vibrating processing there was dimension of material wear to 0,0061 gr.

For steel R9 the wear of material after the traditional polishing not found out, and after vibrating processing there was an increase of mass of samples (due to sticking of rubber).

This experiment rotined that for steel 3 the wear of material does not depend on the type of treatment. For steel 45 the wear of material diminished in 2,46 time. For steel of R9 the wear of material not found out.

During the second experiment samples in a form of rollers with an internal diameter 15 mm, external – 50 mm and in 10 mm high from steel 40X were used. Tests with 80 rollers on the identical modes were made. Wear resistance was measured through every fifteen minute. Experimental samples after lathe treatment were exposed to cementation with the subsequent tempering to hardness of HRC = 52...56.

After heat treatment rollers were polished at the abundant cooling with taking to the required sizes and removal of allowance from an outward surface 0,3 mm on a side. The polishing modes were used $V = 30$ m/s, $S_{\text{прод.}} = 8$ m/min, $S_{\text{поп.}} = 0,02$ mm, number of turns of detail of $n = 175$ rps at 15 passes. At polishing samples were set on mounting and polished from one setting, that provided the identity of terms of formation of

superficial layer at every group of samples, subject to the test on a wear.

Further 60 samples from the 80 made was exposed to vibrating treatment. It consisted in the following. As an equipment the vibrating machine-tool of UVI-25 was used with the capacity of container of $V=25$ litres. The followings modes were set: frequency of vibrations $n = 50$ Hertz, amplitude $A = 2$ mm. These modes it is suggested to use in future for treatment of row of wares, for example parts of valve of boring pump, cog-wheels of hauling reducing gear and other, as they allow for minimum time to get the enough low surface roughness. Samples were polished in a container during 90 minutes.

The breakage of abrasive disc was used as an instrument with the sizes of granules 20...30 mm, grittiness of 6 – 8 mkm.

Part of samples, passing vibrotreatment in the environment of abrasive disc breakage, and part of samples, not undergoing early to vibrotreatment, after exposed to the vibrating hardening. As an instrument-working environment – steel balls were used with sizes 5...6 mm. For providing of the vibrating hardening the followings modes of treatment were used: frequency of vibrations $n = 50$ Hertz, amplitude $A = 3,5$ mm. Samples were consolidated during 30 minutes.

The further tested samples were set on a machine MI-1M, intended for the tests of metals on a wear and determinations of their corrosion resistances at the sliding friction and rolling friction.

The size of wear was estimated on the depth of ditch, leaved a hard-alloy roller on the surface of sample after 15, 30, 45, 60 and 90 minutes of wear. Thus every sample was tested three times to get average values of depth of ditch and taking to the minimum of percent of errors at measuring.

The sample, treated on a round-grinding lathe, was the first. After including of machine depth of ditch was measured through each 15 minutes of work.

Then sample, polished and hardened in the environment of steel balls, polished and treated on a vibromachine-tool in the environment of breakage of

abrasive disc, polished and treated on a vibromachine-tool in the environment of breakage of abrasive disc and in the environment of steel balls, were set one after another, and measurings were accordingly produced. In this experiment as a criterion of wear resistance the change of depth of ditch was accepted from pressing of hard-alloy roller depending on time of rolling-off of him and sample.

Measuring is resulted in a table. 4 and on their results graphic dependences, resulted on a fig. 13., are built.

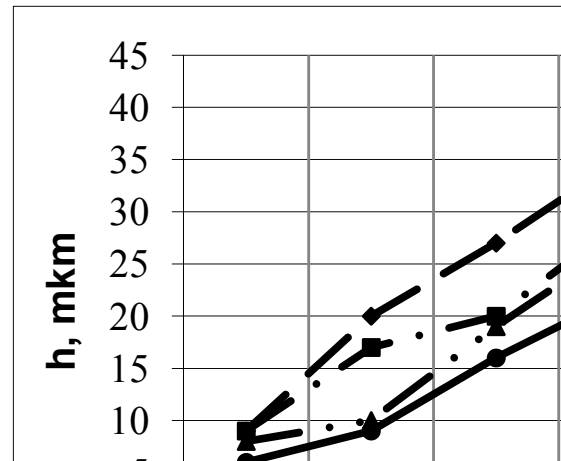


Fig. 13. Changes in samples' wear resistance depending on the method of their surface treatment

- ◆— polishing;
- polishing and vibrotreatment in the environment of steel balls;
- ▲— polishing and vibrotreatment in an environment of AN-2;
- polishing and vibrotreatment in an environment of AN-2 and in the environment of steel balls.

Table 4

Results of the experiment on wear resistance

Time, min	Methods of final treatment of specimens surface															
	Polishing				Polishing and vibrotreatment in the environment of steel balls				Polishing and vibrotreatment in an environment of AN-2				Polishing and vibrotreatment in an environment of AN-2 and in the environment of steel balls			
	Results of measuring of ditch depth h, mm															
1	2	3	middle	1	2	3	middle	1	2	3	middle	1	2	3	middle	
15	10	8	9	9	8,5	10	7,5	9	7,5	9	7	8	5	6,5	6	6
30	19	19,5	21	20	13,5	12,5	15,5	17	9	10,5	9,5	10	9,5	8	8,5	9
45	29,5	26	25,5	27	19	21	19,5	20	17,5	20	18,5	19	15,5	16,5	15,5	16
60	36	35	34,5	35	29,5	28	27,5	29	26,5	26	28	27	21	22,5	21,5	22
90	43	40	41,5	42	41	39	40	40	34,5	37,5	35	36	34	32,5	33	33

The analysis of graphic shows the stable increase of samples' wear resistance at additional introduction of vibrotreatment of surface after polishing.

Depth of ditch on sample, which was not exposed to vibrotreatment, at identical time of test and loading of the tested sample made 25 kg to 0,042 mm.

Vibrotreatment in the environment of steel balls improved surface wear resistance (the depth of ditch h was 0,038...0,04 mm). Balls consolidated a superficial layer, but practically did not change the roughness of surface.

Treatment of surface in the environment of AN-2 considerably diminishes the roughness of surface and wearproofness of surface as compared to polished ($h = 0,032...0,036$ mm).

From the results of experimental researches evidently, that vibrotreatment in an environment of AN-2 with the subsequent hardening in the environment of steel balls considerably, to 15...20% increases wearproofness of surface. It is explained by that a roughness, stopping behind after polishing, diminishes at treatment in an environment AN-2, and here a few strengthened, and then strengthened at vibrotreatment in the environment of steel balls.

Test after 90 minutes of work rotated identical results on all samples, in connection with that a hard-alloy roller already passed the treated, hardened superficial layer and further the structure of metal on all samples was identical.

Conclusions. Experimental researches on wear resistance of samples' superficial layer allowed to make next conclusions:

1. The wear resistance of samples' surface rises to 15...20% after vibroprocessing of workings surfaces.

2. Both the size of surface roughness and depth of hardened layer influence on wear resistance of superficial layer.

3. Tests on wear resistance showed positive results on application of vibrating method of treatment of details as finish operation.

4. The analysis of results shows, that with growth of mass and hardness of granules of working environment, at the unchanging modes of treatment, there is a surface plastic deformation and increase of microhardness of superficial layer of details.

5. Structure of steel – one of basic parameters, influencing on quality of superficial layer, including his wear resistance:

– Steel 3. Structure of this steel: ferrite + pearlite, with predominance exactly of ferrite, loose, soft, that does not undergo and to work-hardening, what was approved by results (the wear of material is relatively permanent). There is a steady decline of surface roughness, therefore vibrating is recommended for treatment of details from this steel both on finishing operations and on a finish.

– Steel 45. Structure of this steel: ferrite + pearlite, easily exposed to hardening by vibrating, that is confirmed experimentally. Hardness of material rises

after vibrating on 15...22%, and the wear of material diminishes in 2,46 time. Consequently, as finish operations for the receipt of low roughness and work-hardened superficial layer it is possible to recommend oscillation methods, and it is necessary to continue research on the choice of the optimum modes of treatment and optimum arrangement of structural parameters of equipment.

– Steel of R9. This steel possesses a high thermostability, that by ability to save a martensite structure and accordingly high hardness, durability and wear resistance at enhanceable temperatures. It saves a martensite structure at heating to 600...620°C. Therefore in the area of contact (to the area of dry friction) at high speed of rotation of details a temperature rises and holds out exactly in a superficial layer (not spreading deep into). After vibrating the roughness of samples' surface diminishes, hardened comes, the area of contact of roller with rubber is increased on 26...34%, and as a result, there is the mutual grasping of surfaces, that sticking of rubber on a steel roller. For this reason there was an increase of mass of samples. Wear of detail here was not discovered. Taking into account hardness of steel and traced decline of roughness at vibrating, it is necessary to conduct research on the choice of optimum form and sizes of granules of working environment.

The wear resistance of samples' surface for construction steels rises to 15...20%. Both the size of roughness of surface and depth of hardened layer influence on wear resistance of superficial layer.

Preliminary tests on wear resistance approved positive results on application of oscillation method of treatment of details as that obligates a finish operation, complex making better the state surface, to continue research works in this direction.

Taking into account universality of oscillation equipment, this method it is recommended to use for the increase of operating properties of good, including wear resistance.

References

1. Sandra Banks, 2015. Surface Preparation and Surface Finishing – <https://roslerblog.com/>
2. Ko Buijs, 2016: The optimisation of stainless steel surfaces. Innomet. – The Netherlands. - Stainless Steel World – Vol.11. – 25 – 36.
3. Mamalis A.G., Mitsyk A.V., Grabchenko A.I., 2013: Mathematical simulation of motion of working medium at finishing-grinding treatment in the oscillating reservoir The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – Vol. 68. 1 – 4. – 1 – 14 Springer-Verlag, London
4. Mitsyk A.V., Fedorovich V.A., 2014: Mathematical simulation of kinematics of vibrating boiling granular medium at treatment in the oscillating reservoir Key Engineering Materials. – Switzerland. – Vol. 581 (Precision Machining VII). – 456 – 461 Trans Tech Publications Inc., Switzerland

5. Zhu ZQ, Chen LG, Rao DL. 2005: Relieving welding; residuals stresses by applying vibratory weld conditioning; Mater Sci Forum 490-491:475-80.

Nikolaienko A.P. Increasing of details surface quality by vibrating processing.

The questions of surface quality increasing is considering in the article. An improvement of quality, increase of reliability and longevity of the produced machines and wares are among the major tasks of modern engineering. One of methods to increase the productivity and quality in metal-treatment is the vibrating finishing. The results of experimental researchers of vibrating treatment influence on details surface are presented in the article.

Key words: vibrating treatment, surface quality, surface roughness, increase of productivity, microhardness

Ніколаєнко А.П. Підвищення якості поверхневого шару деталей методом вібраційної обробки

У статті розглянуті питання підвищення якості поверхневого шару виробів машинобудування. Забезпечення якості поверхні є вельми актуальним завданням при виготовленні деталей машин. Приведено огляд наукових досліджень, в тому числі іноземних, присвячених дослідженню впливу параметрів якості поверхні деталей на їх зносостійкість, довговічність та

інші експлуатаційні характеристики. Розглянуто вібраційну обробку деталей, як ефективний метод забезпечення якості поверхні. Представлені результати експериментальних досліджень впливу вібраційної обробки на показники якості поверхні та експлуатаційні характеристики зразків із різних марок сталі. В ході експериментальних досліджень вивчався вплив різних параметрів вібраційної обробки, а саме робочі середовища, початковий стан поверхні, параметри вібраційного верстата, на отримання поверхні потрібної якості.

Ключові слова: вібраційна обробка, поверхневий шар, якість поверхні, шорсткість, мікротвердість, експлуатаційні властивості.

Ніколаєнко Анна Павлівна – к.т.н., доцент, доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк). 125anna@mail.ru

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

Стаття подана 23.09.2016

УДК 621.646

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРИВОДА ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ С ОБЪЕМНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

Рассказова Ю.Б.

MATHEMATICAL MODEL OF A HYDRAULIC DRIVE OF ROTARY MOTION VOLUME CONTROL

Rasskazova Yu.B.

Представлена математическая модель динамических характеристик силовой части автоматического гидравлического привода вращательного движения с объемным регулированием. Приведена структурная схема передачи управляющего сигнала. Получена передаточная функция привода.

Ключевые слова: насос, гидромотор, давление, расход, объемное регулирование, структурная схема, передаточная функция.

Постановка проблемы. Современные технологии машиностроения и материалобработки предъявляют всевозрастающие требования к техническим и функциональным характеристикам станков и специального технологического оборудования. Качество получаемых изделий при механической обработке, обработке давлением, пластическом формовании во многом зависит от возможности реализации оптимальных законов движения рабочих органов, точности регулирования их перемещений, стабильности скоростей в условиях переменной нагрузки. Поэтому актуальной является научно-техническая задача повышения точности и расширения функциональных возможностей станков и оборудования для обработки материалов.

Достижение произвольной кинематики рабочего органа, возможности программной реализации оптимальных законов его движения обеспечивается применением автоматических гидравлических приводов и, в частности, гидроприводов вращательного движения с объемным регулированием в оборудовании мощностью свыше 8 кВт. Вместе с тем, в настоящее время отсутствуют типовые математические модели рабочих процессов, протекающих в приводах, нет общепринятых методик их расчета, адаптированных на приводы станков и специального технологического оборудования для обработки

материалов, позволяющие производить оценку и выбор параметров элементов и устройств привода, прогнозировать его статические и динамические характеристики.

Анализ последних исследований и публикаций. Силовая часть гидравлического привода с объемным регулированием включает объемный насос с регулируемой подачей, вспомогательные устройства и исполнительный гидродвигатель объемного типа [1, 2]. Наибольшее применение в гидроприводах получили аксиально-поршневые насосы, подача которых регулируется изменением угла наклона блока цилиндров или изменением угла наклона шайбы. В качестве исполнительных гидродвигателей обычно используют гидроцилиндры с линейным перемещением выходного звена, гидроцилиндры с поворотным движением выходного звена и аксиально-поршневые или радиально-поршневые гидромоторы. К вспомогательным устройствам относятся клапаны, фильтр, насос и бак системы подпитки рабочей жидкостью силовой части гидропривода.

Цель статьи. Целью данной работы является разработка математической модели динамических характеристик силовой части автоматического гидравлического привода вращательного движения с объемным регулированием и получение передаточной функции привода по управляющему сигналу.

Материалы и результаты исследования. На рис. 1 приведена типовая принципиальная схема силовой части гидравлического привода вращательного движения с объемным регулированием, содержащая две аксиально-поршневые гидромашины: основной насос 2 и гидромотор 5. Вал насоса приводится во вращение от асинхронного электродвигателя 1. Подача насоса регулируется изменением угла наклона блока

цилиндров (или угла наклона шайбы) с помощью механизма 3, которым может быть также гидроусилитель, состоящий из гидроцилиндра и золотника. Насос двумя трубопроводами 4 соединен с гидромотором. Вал гидромотора через редуктор 6 соединен с управляющим объектом 7. Для восполнения утечек рабочей жидкости служит вспомогательный насос (обычно шестеренный или пластинчатый) 13, приводимый во вращение от вала основного насоса. Если угол наклона блока цилиндров (угла наклона шайбы) основного насоса регулируется с помощью гидроусилителя, то вспомогательный насос используется также для питания гидроусилителя жидкостью под давлением. Давление в напорной магистрали вспомогательного насоса поддерживается переливным клапаном 10. Эта магистраль через два подпиточных клапана 9 подключена к трубопроводам, соединяющим основной насос и гидромотор. При падении давления в одном из трубопроводов ниже допустимого значения соответствующий подпиточный клапан открывается и пропускает жидкость под давлением из напорной магистрали вспомогательного насоса до тех пор, пока в трубопроводе не восстановится необходимый уровень давления. После этого подпиточный клапан под действием давления в трубопроводе закрывается. Подпиточные клапаны должны поддерживать в трубопроводе такое минимальное давление, чтобы в основном насосе не возникла кавитация. Для этого устанавливается необходимое давление в напорной магистрали вспомогательного насоса путем регулирования натяжения пружины (давления срабатывания) переливного клапана 10.

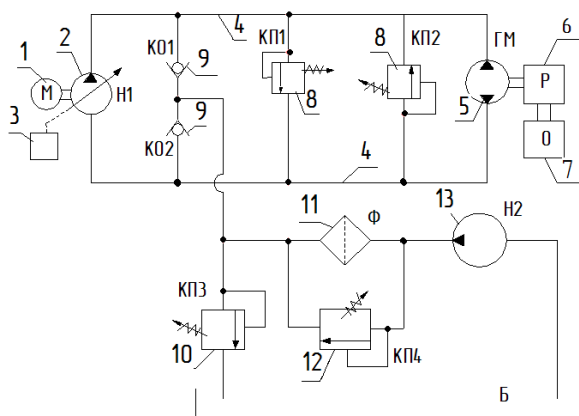


Рис. 1. Схема силовой части ЭГП
с объемным регулированием

От возникновения чрезмерно высокого давления трубопроводы гидропривода защищены двумя предохранительными клапанами 8. При недопустимом повышении давления в одном из трубопроводов открывается соответствующий предохранительный клапан, пропускающий жидкость в другой трубопровод с низким давлением. В линии нагнетания вспомогательного

насоса также имеется предохранительный клапан 12, который защищает насос от повышения давления при засорении фильтра 11.

Отметим обозначения гидромашин и гидроаппаратов на рис. 1. Здесь $H1...H2$ – насосы; $ГМ$ – гидромотор; $KO1...KO2$ – клапаны обратные; $KП1...KП4$ – клапаны предохранительные; Φ – фильтр.

Перед построением математического описания силовой части ЭГП с объемным регулированием, составим расчетную схему, учитывая следующие основные допущения:

1. Асинхронный электродвигатель 1 вращает вал насоса с угловой скоростью Ω_n , величина которой не зависит мощности, развиваемой насосом.

2. При работе гидропривода давления в трубопроводах 4 не достигают значений, при которых открываются предохранительные клапаны 8.

3. Давление p_m в магистральной перед подпиточным клапанами поддерживается постоянным.

4. Усилия, преодолеваемые гидромотором 5 при управлении объектом 7, могут быть представлены суммой моментов от действия приведенных к валу гидромотора инерционной нагрузки, позиционной нагрузки и гидравлического трения.

5. Трубопроводы будем принимать настолько короткими, чтобы можно было в них пренебрегать инерцией жидкости и потерями давления из-за сопротивления трения.

Расчетная схема представлена на рис. 2. На этой схеме стрелками показаны направления потоков жидкости в тот момент времени, когда давление p_1 больше давления p_2 .

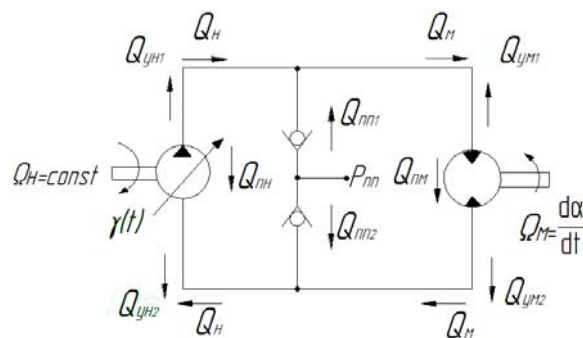


Рис. 2. Расчетная схема силовой части гидропривода

При всех принятых выше допущениях получению линейной математической модели силовой части ЭГП с объемным регулированием препятствует одна существенно нелинейная характеристика, определяющая зависимость расходов подпитки Q_{nn1} и Q_{nn2} через подпиточные клапаны от давлений p_1 и p_2 в трубопроводах. Если уровень давления в трубопроводах оказывается ниже давления подпитки p_{nn} перед подпиточными

клапанами, то при малых изменениях давлений можно применить соотношения

$$Q_{nn1} = k_{кл} (p_{nn} - p_1); \quad (1)$$

$$Q_{nn2} = k_{кл} (p_{nn} - p_2); \quad (2)$$

где $k_{кл}$ – проводимость подпиточного клапана [3, 4].

Если уровень давления в трубопроводах превышает давление подпитки p_{nn} , то

$$Q_{nn1} = Q_{nn2} = 0 \quad (3)$$

так как подпиточные клапаны закрыты под действием давления в трубопроводах.

При равновесном состоянии гидропривода, для которого ненагруженный вал гидромотора не вращается, уровень давления в трубопроводах вследствие утечек жидкости из насоса и гидромотора и конечного значения проводимости клапанов устанавливается ниже p_{nn} . При колебаниях в каждый трубопровод через определенный подпиточный клапан на одном полупериоде при низком давлении поступает количество жидкости, компенсирующее не только утечки, но и сжимаемость жидкости. На следующем полупериоде происходит сжатие большого объема жидкости в трубопроводе, что приводит к увеличению в нем давления. Поступление жидкости в гидропривод через подпиточные клапаны сопровождается повышением среднего за период колебания давления в трубопроводах или повышением уровня давления в них. Количество жидкости, поступившей в трубопроводы за период колебания, зависит от амплитуды колебания давлений p_1 и p_2 , поэтому средняя за период проводимость клапанов зависит от амплитуды колебаний давления в трубопроводах.

При исследовании динамики гидропривода с малыми отклонениями переменных от установившихся значений уровень давления в трубопроводах может быть принят ниже давления p_{nn} , поэтому допустимо использовать линейные соотношения (1, 2). При исследовании динамики гидропривода с большими изменениями переменных приходится учитывать нелинейность характеристики подпиточных клапанов.

Для момента времени, когда при малом отклонении блока цилиндров (или наклонной шайбы) от положения равновесия насос подает жидкость по трубопроводу с давлением p_1 и всасывает жидкость из трубопровода с давлением p_2 , уравнения расходов запишем, используя подход Попова Д.Н. [4], в виде:

для трубопровода с давлением p_1 расход насоса

$$Q_n = Q_m + Q_{nn} + Q_{nm} + Q_{yn1} + Q_{ym1} + Q_{сж1} - Q_{nn1}; \quad (4)$$

для трубопровода с давлением p_2 расход насоса

$$Q_n = Q_m + Q_{nn} + Q_{nm} - Q_{yn2} - Q_{ym2} - Q_{сж2} + Q_{nn2}. \quad (5)$$

В уравнениях (4) и (5) расходы $Q_{сж1}$ и $Q_{сж2}$ являются теми составляющими расхода, которые связаны с компенсацией сжимаемости жидкости. Остальные составляющие обозначены в соответствии с расчетной схемой (рис. 2). Для некоторого упрощения выражений, определяющих коэффициенты в последующих уравнениях, считаем насос и гидромотор гидромашинами одинакового типа, например аксиально-поршневыми, отличающиеся только тем, что у насоса регулируется угол наклона блока цилиндров (или шайбы) не регулируется. В этом случае можно принять

$$Q_{nn} = Q_{nm} = Q_{nep};$$

$$Q_{yn1} = Q_{ym1} = Q_{ym1};$$

$$Q_{yn2} = Q_{ym2} = Q_{ym2}.$$

Учитывая эти соотношения, определим составляющие расхода насоса в виде

$$Q_m = \frac{q_m}{2\pi} \Omega_m = \frac{q_m}{2\pi} \frac{d\alpha}{dt}; \quad (6)$$

$$Q_{nep} = k_{nep} (p_1 - p_2); \quad (7)$$

$$Q_{ym1} = k_{ym} p_1; \quad (8)$$

$$Q_{ym2} = k_{ym} p_2; \quad (9)$$

где q_m – рабочий объем гидромотора; Ω_m – угловая скорость вала гидромотора; α – угол поворота вала гидромотора; k_{nep} – проводимость щелей, по которым в насосе и гидромоторе происходит перетечка жидкости из полостей с высоким давлением в полости с низким давлением; k_{ym} – проводимость щелей, по которым происходит утечка жидкости из насоса и гидромотора.

Расходы Q_{nn1} и Q_{nn2} определяем по соотношениям (1) и (2), а расходы $Q_{сж1}$ и $Q_{сж2}$ в предположении абсолютно жестких стенок трубопроводов находим по следующим зависимостям [5]

$$Q_{сж1} = \frac{W_0}{E_{жс}} \frac{dp_1}{dt}; \quad (10)$$

$$Q_{сж2} = \frac{W_0}{E_{жс}} \frac{dp_2}{dt}; \quad (11)$$

где W_0 – внутренний объем трубопроводов с подключенными к нему объемами полостей насоса и гидромотора;

$E_{жс}$ – объемный модуль упругости рабочей жидкости.

Подставим составляющие расходов согласно соотношениям (1, 2, 6 – 11) в уравнения (4, 5). Затем сложим эти уравнения и преобразуем

$$Q_m = \frac{q_m}{2\pi} \frac{d\alpha}{dt} + 2k_{пер}(p_1 - p_2) + k_{ум}(p_1 - p_2) + \frac{k_{кл}}{2}(p_1 - p_2) + \frac{W_0}{2E_{жс}} \frac{d(p_1 - p_2)}{dt}. \quad (12)$$

Идеальную подачу насоса Q_n представим в виде зависимости от угла γ наклона блоков цилиндров или угла наклона шайбы насоса

$$Q_n = \frac{q_n}{2\pi} \Omega_n, \quad (13)$$

где q_n – рабочий объем насоса.

Для аксиально-поршневого насоса

$$q_n = F_n z_n D_n \operatorname{tg} \gamma \quad (14)$$

где F_n – рабочая площадь одного поршня (плунжера) насоса; z_n – число поршней; D_n – диаметр окружности, на которой расположены оси поршней насоса.

Как видно, функция $q_n(\gamma)$ является нелинейной. При малых отклонениях блока цилиндров (шайбы) насоса от нейтрального положения указанная функция может быть линеаризована и уравнение (14) записано в виде

$$Q_n = k_{Q\gamma} \gamma, \quad (15)$$

где

$$k_{Q\gamma} = \frac{\partial Q_n}{\partial \gamma}.$$

Для аксиально-поршневого насоса

$$k_{Q\gamma} = \frac{F_n z_n D_n \Omega_n}{2\pi}.$$

Применяя соотношение (15), приведем уравнение (12) к виду

$$\frac{q_m}{2\pi k_{Q\gamma}} \frac{d\alpha}{dt} + \frac{W_0}{2E_{жс} k_{Q\gamma}} \frac{dp_m}{dt} + \frac{k_{\Sigma}}{k_{Q\gamma}} p_m = \gamma, \quad (16)$$

где

$$k_{\Sigma} = k_{ум} + 2k_{пер} + \frac{k_{кл}}{2};$$

$$p_m = p_1 - p_2. \quad (17)$$

В уравнении (16), кроме входной величины γ и выходной α , содержится изменяющийся во времени перепад давления p_m , который зависит от

преодолеваемой гидромотором нагрузки. При действии инерционной нагрузки величина p_m определяется по крутящему моменту M_m , который входит в уравнение вращательного движения вала гидромотора

$$M_m - M_{mp1} - M_{mp2} - M_{noz} = J \frac{d^2 \alpha}{dt^2}, \quad (18)$$

где J – момент инерции вращающихся с валом гидромотора частей (приведенный момент инерции нагрузки и ротора мотора). В дальнейшем данную величину будем называть приведенным моментом инерции гидромотора.

Крутящий момент для объемной гидромашины [6 – 8] определяется соотношением

$$M_m = \frac{q_m}{2\pi} p_m. \quad (19)$$

Момент трения M_{mp1} создается трением в гидромоторе. В общем случае трение в гидромоторе может быть смешанным. Для упрощения математической модели гидропривода будем учитывать только гидравлическое трение [9, 10], полагая

$$M_{mp1} = k_{mp1} \frac{d\alpha}{dt}, \quad (20)$$

где k_{mp1} вычисляется по наклону аппроксимирующей характеристики $M_{mp1} = M_{mp1}(\Omega_m)$.

Момент трения M_{mp2} , возникающий вследствие трения в нагрузке, представим аналогичной зависимостью

$$M_{mp2} = k_{mp2} \frac{d\alpha}{dt}. \quad (21)$$

Момент от действия позиционной нагрузки

$$M_{noz} = k_{noz} \alpha, \quad (22)$$

где k_{noz} – жесткость позиционной нагрузки.

Используя соотношения (19 – 22), из уравнения (18) получаем

$$\frac{2\pi J}{q_m} \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{2\pi k_{mp}}{q_m} \frac{d\alpha}{dt} + \frac{2\pi k_{noz}}{q_m} \alpha = p_m, \quad (23)$$

где $k_{mp} = k_{mp1} + k_{mp2}$.

Рассматривая совместно уравнения (16) и (23), находим

$$\frac{\pi J W_0}{E_{жс} q_m k_{Q\gamma}} \frac{d^3 \alpha}{dt^3} + \left(\frac{\pi k_{mp} W_0}{E_{жс} q_m k_{Q\gamma}} + \frac{2\pi k_{\Sigma} J}{q_m k_{Q\gamma}} \right) \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{q_m}{2\pi k_{Q\gamma}} \left(1 + \frac{2\pi^2 k_{noz} W_0}{E_{жс} q_m^2} + \frac{4\pi^2 k_{\Sigma} k_{mp}}{q_m^2} \right) \frac{d\alpha}{dt} + \frac{2\pi k_{\Sigma} k_{noz}}{q_m k_{Q\gamma}} \alpha = \gamma. \quad (24)$$

В реальных гидроприводах обычно

$$1 + \frac{2\pi^2 k_{noz} W_0}{E_{жс} q_M^2} + \frac{4\pi^2 k_{\Sigma} k_{mp}}{q_M^2} \approx 1. \quad (25)$$

Поэтому, вместо (24) имеем

$$\frac{\pi J W_0}{E_{жс} q_M k_{QY}} \frac{d^3 \alpha}{dt^3} + \left(\frac{\pi k_{mp} W_0}{E_{жс} q_M k_{QY}} + \frac{2\pi k_{\Sigma} J}{q_M k_{QY}} \right) \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{q_M}{2\pi k_{QY}} \frac{d\alpha}{dt} = \gamma - \frac{2\pi k_{\Sigma} k_{noz}}{q_M k_{QY}} \alpha. \quad (26)$$

Введем в рассмотрение следующие параметры: постоянная времени гидропривода

$$T_{zn} = \frac{q_M}{2\pi k_{QY}}. \quad (27)$$

постоянная времени гидромотора

$$T_M = \sqrt{\frac{2\pi^2 J W_0}{q_M^2 E_{жс}}}. \quad (28)$$

коэффициент относительного демпфирования гидромотора

$$\zeta = \frac{\pi(2JE_{жс}k_{\Sigma} + k_{mp}W_0)}{\sqrt{2JW_0E_{жс}q_M^2}}. \quad (29)$$

коэффициент собственной обратной связи

$$k_{coc} = \frac{2\pi k_{\Sigma} k_{noz}}{q_M k_{QY}}. \quad (30)$$

Как видно из данного выражения, коэффициент собственной обратной связи силовой части гидропривода вызван совместным действием позиционной нагрузки и негерметичности гидромашин.

С учетом введенных параметров уравнение (26) преобразуем по Лапласу [11, 12] к виду:

$$T_{zn} s(T_M^2 s^2 + 2\zeta_M T_M s + 1) \alpha(s) = \gamma(s) - k_{coc} \alpha(s) \quad (31)$$

Структурная схема силовой части ЭГП в соответствии с уравнением (31) представлена на рис. 3.

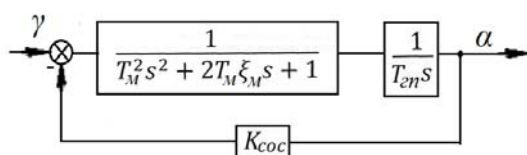


Рис. 3. Структурная схема силовой части ЭГП

В случае отсутствия позиционной нагрузки (22), либо полной герметичности гидропривода, или при несущественном моменте от действия сил позиционной нагрузки и высокой герметичности гидромашин (что обычно имеет место на практике) коэффициентом собственной обратной связи можно пренебречь. Следует отметить, что данный коэффициент в случае его заметного влияния можно учесть во внешней обратной связи автоматического гидропривода.

Тогда, структурная схема силовой части привода примет вид, представленный на рис. 4. Данная схема, по сути, отражает передачу управляющего сигнала – угла наклона блока цилиндров (или шайбы) γ – и воздействие его на выходной сигнал – угол поворота вала гидромотора α.

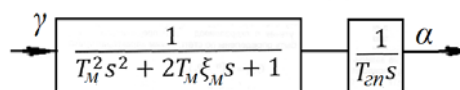


Рис. 4. Структурная схема передачи управляющего сигнала в силовой части ЭГП с объемным регулированием

В дальнейшем рассматриваем структурную схему силовой части гидравлического привода вращательного движения с объемным регулированием согласно рис. 4. В соответствии с данной структурной схемой получаем передаточную функцию привода для угла поворота вала гидромотора α по углу наклона блока цилиндров (или шайбы) γ

$$W_{\alpha\gamma}(s) = \frac{\alpha(s)}{\gamma(s)} = \frac{1}{T_{zn} s(T_M^2 s^2 + 2\zeta_M T_M s + 1)}. \quad (32)$$

Выводы.

Таким образом, разработана математическая модель динамических характеристик силовой части автоматического гидравлического вращательного движения с объемным регулированием. Представлена структурная схема передачи управляющего сигнала. Получена передаточная функция привода для выходного сигнала угла поворота вала гидромотора по управляющему сигналу (углу наклона блока цилиндров или шайбы).

Литература

1. Андрийчук Н.Д. Гидравлика и гидропневмоприводы: учебное пособие [Текст] / Андрийчук Н.Д., Вялых А.В., Коваленко А.А., Мальцев Я.И., Ремень В.И., Соколов В.И. Под общ. ред. Коваленко А.А. – Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2008. – 320 с.
2. Мандрус В.І., Лещій Н.П., Звягін В.М. Машинобудівна гідроліка. [Текст] Задачі та приклади розрахунку. – Львів: Світ, 1995. – 264 с.

3. Навроцкий К.Л. Теория и проектирование гидро- и пневмоприводов. [Текст] – М.: Машиностроение, 1991. – 384 с.
4. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. [Текст] – М.: машиностроение, 1987. – 464 с.
5. Попов Д.Н. Нестационарные гидромеханические процессы. [Текст] – М.: Машиностроение, 1982. – 240 с.
6. Богданович Л.Б. Гидравлические приводы: учебное пособие. [Текст] – К.: Выща школа, 1980. – 232 с.
7. Свешников В.К., Усов А.А. Станочные гидроприводы: справочник. [Текст] – М.: Машиностроение, 1988. – 512 с.
8. Основы объемного гидравлического привода строительных и дорожных машин. [Текст] Коваленко А.А., Соколов В.И., Уваров П.Е., Пазин В.В. - Луганск: ДонГАСА, 1999. – 138 с.
9. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. [Текст] – М.: Наука, 1987. – 840 с.
10. Основы технической механики жидкостей и газов: учебное пособие. [Текст] Коваленко А.А., Соколов В.И., Дымнич. А.Х., Уваров П.Е. – Луганск: ВУГУ, 1998. – 272 с.
11. Зайцев Г.Ф. Теория автоматического управления и регулирования: учебное пособие. [Текст] – К.: Выща школа, 1989. – 431 с.
12. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.1. Линейные системы: учебное пособие. [Текст] – М.: Физматлит, 2003. – 288 с.
7. Sveshnikov V.K., Usov A.A. Stanochnye ghydropryvody: spravochnyk. [Tekst] – M.: Mashynostroenye, 1988. – 512 s.
8. Osnovy ob'ємnogo ghydryavlycheskogho pryvoda stroytel'nykh y dorozhnykh mashyn. [Tekst] Kovalenko A.A., Sokolov V.Y., Uvarov P.E., Pazyn V.V. - Lughansk: DonGhASA, 1999. – 138 s.
9. Lojtsjanskij L.Gh. Mekhanyka zhydkosty y ghaza. [Tekst] – M.: Nauka, 1987. – 840 s.
10. Osnovy tekhnicheskoy mekhaniky zhydkostej y ghazov: uchebnoe posobyе. [Tekst] Kovalenko A.A., Sokolov V.Y. Dymnych. A.Kh., Uvarov P.E. – Lughansk: VUGhU, 1998. – 272 s.
11. Zajcev Gh.F. Teoryja avtomatycheskogho upravlenija y reghulyrovanyja: uchebnoe posobyе. [Tekst] – K.: Vyshha shkola, 1989. – 431 s.
12. Kym D.P. Teoryja avtomatycheskogho upravlenija. T.1. Lyneijnye systemy: uchebnoe posobyе. [Tekst] – M.: Fyzmatlyt, 2003. – 288 s.

References

1. Andryjchuk N.D. Ghydryavlyka y ghydropnevmoptyvody: uchebnoe posobyе [Tekst]/ Andryjchuk N.D., Vjal'nykh A.V., Kovalenko A.A., Maljcev Ja.Y., Remenj V.Y., Sokolov V.Y. Pod obshh. red. Kovalenko A.A. – Lughansk: VNU ym. V. Dalja, 2008. – 320 s.
2. Mandrus V.I., Leshhij N.P., Zvjaghin V.M. Mashynobudivna ghidravlika. [Tekst] Zadachi ta pryklady rozrakhunku. – Ljviv: Svit, 1995. – 264 s.
3. Navrockij K.L. Teoryja y proektyrovanye ghydro- y pnevmopryvodov. [Tekst] – M.: Mashynostroenye, 1991. – 384 s.
4. Popov D.N. Dynamyka y reghulyrovanye ghydro- y pnevmosystem. [Tekst] – M.: mashynostroenye, 1987. – 464 s.
5. Popov D.N. Nestacyonarnye ghydromekhanicheskye processy. [Tekst] – M.: Mashynostroenye, 1982. – 240 s.
6. Boghdanovych L.B. Ghydryavlycheskye pryvody: uchebnoe posobyе. [Tekst] – K.: Vyshha shkola, 1980. – 232 s.

Рассказова Ю.Б. Математична модель гідралічного приводу оберального руху з об'ємним регулюванням.

Представлено математичну модель динамічних характеристик силової частини автоматичного гідралічного приводу оберального руху з об'ємним регулюванням. Наведено структурну схему передачі сигналу. Отримано передавальна функція приводу.

Ключові слова: насос, гідромотор, тиск, витрата, об'ємне регулювання, структурна схема, передавальна функція.

Rasskazova Yu.B. Mathematical model of a hydraulic drive of rotary motion volume control

A mathematical model of the dynamic characteristics of the power of the automatic hydraulic drive rotary motion with variable displacement. The block diagram of the transmission control signal. Get the transfer function of the drive.

Keywords: pump, hydraulic motor, pressure, flow, volume control, a block diagram, the transfer function.

Рассказова Юлія Борисівна – аспірант кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк) urass.snu.edu@gmail.com

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

Стаття подана 14.09.2016

УДК 621.9.048

ОБЗОР ПРИСПОСОБЛЕНИЙ ДЛЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Романченко А.В., Романченко Ю.А.

REVIEW OF DEVICES FOR VIBRATION TREATMENT SUPPORT OPERATIONS

Romanchenko A.V., Romanchenko J.A.

В работе представлен обзор механизированных приспособлений предназначенных для вспомогательных операций вибрационной обработки деталей. На основе анализа информационных источников рассмотрены функциональные и конструктивные особенности существующих разновидностей приспособлений для разделения рабочей среды и обрабатываемых деталей. Установлено, что рациональной, является разработка вспомогательных приспособлений на этапе конструкторского проектирования. Указаны достоинства и недостатки представленных устройств.
Ключевые слова: вибрационная обработка, сепарация, приспособления, механизация, вспомогательная операция, станок.

1. Введение. Применение вибрационной обработки как одного из наиболее прогрессивных методов финишной обработки с целью улучшения качества поверхности выпускаемой продукции, позволяет отказаться от малоэффективных способов обработки и значительно повысить общую производительность технологического процесса [1, 2].

Технологический процесс вибрационной обработки является сложным и многофакторным, он состоит из основных и ряда вспомогательных операций. К вспомогательным операциям относятся загрузка, разгрузка, сепарация деталей и абразивного наполнителя, добавление химических растворов и т.д., а они, как правило, не механизированы и выполняются вручную.

На ранних этапах развития вибрационных станков конструкторские цели были направлены на интенсификацию производительности процесса вибрационной обработки и тем самым на сокращение основного времени технологического процесса, но при этом сокращению вспомогательного времени, не менее важно, не уделялось должного внимания. Однако в современных условиях при значительно возросших объемах производства, возникает острая

необходимость в сокращение вспомогательного времени, которое является дополнительным резервом для повышения производительности

2. Анализ исследований и публикаций. Как уже указывалось ранее, для повышения производительности метода вибрационной обработки деталей необходима механизация приспособлений для вспомогательных процессов (загрузки, выгрузки сепарации обработанных деталей и абразивного наполнителя и т.д.), способствующая сокращению вспомогательного времени, облегчению обслуживания вибрационных станков. Совершенствование таких приспособлений ведется по следующим направлениям: механизация вспомогательных переходов (создание индивидуальных, групповых и интегрированных в конструкцию вибрационных станков вспомогательных приспособлений); полная автоматизация вибрационных станков.

Создание вспомогательных механизированных устройств существенно затрудняется многообразием конструктивных форм обрабатываемых деталей и материалов, из которых они выполнены, а также разнообразием их габаритных размеров [3]. Существует много работ, в которых авторы применяли различные приспособления для интенсификации процесса обработки деталей [4, 5, 6, 7]. Механизация вспомогательных операций может решаться с применением различного рода унифицированных конструкций и средств (подъемно-транспортных средств, нормализованной тары, стандартных сит и магнитов) [8].

Вспомогательные приспособления могут выполнять различные функции, рациональным является разделение таких приспособлений на следующие группы:

1. Приспособления для разделения деталей и абразивного наполнителя (сепараторы).
2. Подъемно-транспортные средства.
3. Тара для деталей.

4. Ванны для подготовки поверхностей деталей.

5. Оборудование для сушки деталей.

6. Бункера (емкости) для абразивного наполнителя.

7. Устройства подачи растворов.

8. Устройства сортировки абразивного наполнителя.

Анализ цикла операций вибрационной обработки показал, что его значительную часть составляет время разделения обрабатываемых деталей от гранул рабочей среды. При этом операция разделения требует применения специальных механизмов.

Разделение обрабатывающей среды и деталей осуществляется различными способами в зависимости от следующих факторов [2, 3, 9]:

а) тип производства;

б) удельная масса, габаритные размеры и материал обрабатываемых деталей;

в) материал и грануляция рабочей среды;

г) технологические требования к обрабатываемым деталям.

Для разделения рабочих тел и деталей существует несколько путей:

- отсеивание;
- ручное извлечение деталей;
- магнитная сепарация;
- разделение по массе;
- разделение по геометрическим параметрам.

В данной работе рассматриваются приспособления для сепарации деталей от абразивного наполнителя (рабочей среды).

3. Цель исследования. Обзор механизированных приспособлений предназначенных для сепарации деталей от абразивного наполнителя на этапе вспомогательных операций процесса вибрационной обработки.

Задачи исследования. Анализ функциональных и конструктивных особенностей существующих разновидностей приспособлений для разделения рабочей среды и обрабатываемых деталей с целью определения оптимальных параметров таких приспособлений, а также формулировкой требований к разрабатываемым приспособлениям.

4. Материалы и результаты исследования. Разделение стальных полированных шариков и деталей осуществляют отсеиванием или ручным извлечением крупных деталей, а также с применением грузоподъемных устройств. Загрузка и выгрузка деталей, с габаритными размерами более 200 мм в индивидуальном и мелкосерийном производстве осуществляется вручную или с применением грузоподъемных устройств.

Разделители могут быть стационарными, перемещаемыми или представлять собой составную часть вибрационной машины. По видам разделители (сепараторы) делятся на:

1. Ситовые разделители:

а) сита универсальные на пружинах: неподвижные, подвижные;

в) сита встряхивающие (качающиеся);

г) сита барабанные: цилиндрические и призматические; конические или в виде усеченной пирамиды;

д) сита вибрационные;

е) сита – корзины с жестким или гибким решетом.

2. Вибрационные манипуляторы.

3. Магнитные сепараторы.

4. Пневматические сепараторы.

В ситовых разделителях детали и гранулы рабочей среды засыпаются на сито и вручную просеиваются.

Неподвижные сита малопроизводительны, поэтому применяются редко и в основном для отделения от абразивных или неабразивных гранул мелких деталей, а также отсева мелких фракций гранул рабочей среды [10]. Пример передвижного сита представлен на рисунке 1.

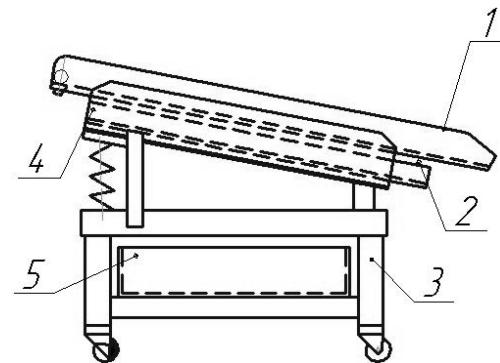


Рис. 1. Передвижное сито: 1, 2 – стенные решетки; 3 – рама; 4 – пружина; 5 – сборник абразива

Плоские механические сита выполняются с приводом от электромотора. В представленном на рисунке 2 плоском встряхивающем сите качение осуществляется от коленчатого вала или эксцентрикового механизма [10]. Шатунный механизм дает возвратно-поступательное движение платформе, на которой расположен сетчатый настил.

Сита для отделения деталей от стальных шариков и абразива могут встраиваться в механизированную линию вибрационной обработки деталей.

На рисунке 3 изображен пневматический сепаратор, состоящий из пневматического цилиндра и вилки, связанных системой рычагов.

После окончания цикла обработки, не выключая станок, пневматический цилиндр через систему рычагов приводит в движение сепарирующую решетку, выполненную в виде вилки, через пазы которой просеиваются гранулы рабочей среды, а детали выгружаются. Преимуществом выше указанного устройства является его простота. В практике разделения пневматические сепараторы используются очень редко [3].

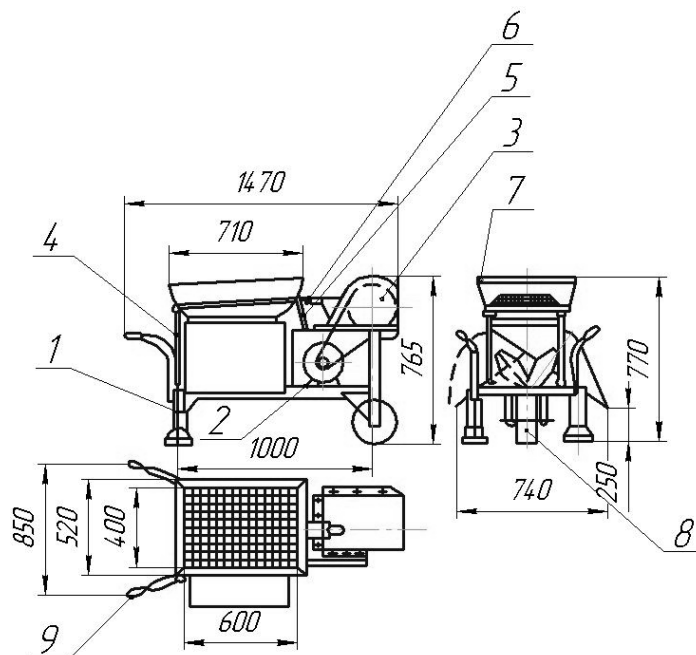


Рис. 2. Сито плоское встряхивающее:

1 – каркас; 2 – электродвигатель; 3 – шкив; 4, 5 – шарнирные стойки; 6 – шатун; 7 – сито; 8 – колесо; 9 – ручки

Для упрощения разделения деталей от гранул рабочей среды без остановки вибрационного станка были предложены несколько разделительных устройств с гибкой решеткой. Одно из них показано на рисунке 4, устройство состоит из рамки 8, 7 с прутьями жесткости 1, которые связаны с шарнирно-соединительными звеньями 2, 3 и 4. Кольцом 9 приспособление одевается на крюк подъемно-транспортного устройства.

Для упрощения разделения деталей от гранул рабочей среды без остановки вибрационного станка были предложены несколько разделительных устройств с гибкой решеткой.

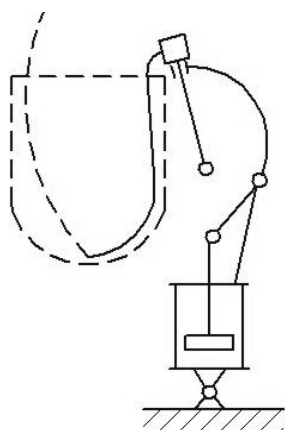


Рис. 3. Пневматический сепаратор

Одно из них показано на рисунке 4, устройство состоит из рамки 8, 7 с прутьями жесткости 1, которые связаны с шарнирно-соединительными звеньями 2, 3 и 4. Кольцом 9 приспособление одевается на крюк подъемно-транспортного устройства.

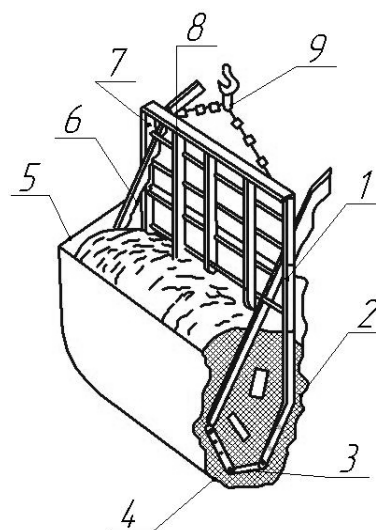


Рис. 4. Разгрузочное приспособление типа "Невод":

1 – прутья жесткости;
2, 3, 4 – шарнирно-соединительные звенья;
5 – контейнер; 6 – рычаги; 7, 8 – рамка; 9 – кольцо

После того, как обработка деталей в контейнере будет закончена, приспособление, носящее условное название "Невод", рычагами 6 и крайними звеньями 4 вводится в вибрирующий контейнер. Под действием вращательного движения среды многозвенная часть приспособления затягивается в контейнер, причем вся система звеньев скользит по стенкам контейнера. Через некоторое время крайние звенья 4 и рычаги 6 устройства показываются над поверхностью среды со стороны, противоположной той, где приспособление заводилось в контейнер. Рычаги 6 набрасываются на прутья 1 решетки. Затем, надев

кольцо 9 цепи на крюк подъемника и дав ему движение вверх, приспособление извлекается из контейнера.

Гранулы среды, которые должны быть меньше пазов между звеньями решетки приспособления, проходят сквозь зазоры "Невода", а обрабатываемые детали извлекаются из контейнера [3, **Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Вибрационное разделительное устройство, показанное на рис. 5, предназначено для разделения деталей и обрабатывающей среды (в частности, стальных шариков диаметром 5-7 мм) после операции виброполирования [12].

Вибрационное разделительное устройство состоит из рамы 4, на которой на 4-х парах С-образных плоских пружин 3 крепится платформа 2. Колебательное движение платформы сообщается вибровозбудителями 5. В разделительном устройстве для возбуждения колебаний используют вибровозбудитель общего назначения с круговыми колебаниями модели С795 (ИБ-22).

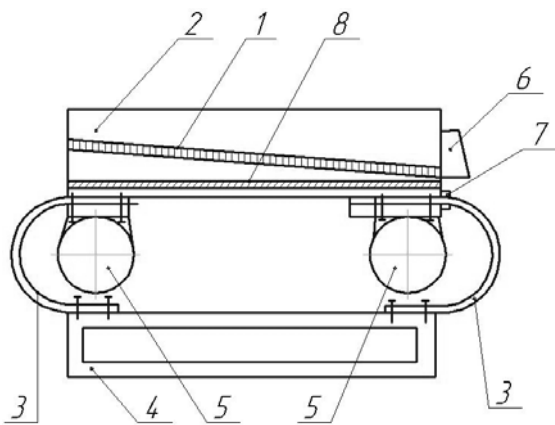


Рис. 5. Вибрационное разделительное устройство:

1 – настил сетчатый; 2 – платформа; 3 – рессора;
4 – рама; 5 – вибровозбудитель;
6 – желоб для выгрузки деталей;
7 – желоб для выгрузки гранул рабочей среды; 8 – настил

7 – желоб для выгрузки гранул рабочей среды; 8 – настил

На рис. 6 изображен сепаратор [13], который выполнен в виде вибрационного устройства, снабженного двумя винтовыми поверхностями, расположенными в виде двухзаходного винта. Одна из поверхностей снабжена сепарирующими отверстиями, гранулы проваливаются через отверстия и по нижней винтовой поверхности, двигаясь вверх под действием колебаний, возвращаются в бункер вибрационного станка. Детали по верхней винтовой поверхности отводятся в сторону.

Данные сепараторы можно использовать лишь для разделения деталей и гранул среды определенных размеров и конфигурации. Они обладают недостатками ситовых разделителей. Кроме того, они сложны конструктивно и неустойчивы в работе, требуют поддержания строго определенных условий эксплуатации.

На рис. 7 изображен вибрационный станок [14], у которого над контейнером установлено устройство для сепарации и отделения деталей от обрабатывающей среды в виде барабана. Барабан установлен на приводном валу. Он выполнен полым, перфорированным. На периферийной части барабана установлены ковши – сита, в основании которых расположены окна со створками. С целью возможности просеивания гранул рабочей среды за счет передачи колебаний от контейнера к барабану, приводной вал барабана установлен в вертикальных пазах боковых стенок контейнера на шарнирных подвесках. На внутренней поверхности барабана установлены шнековые пластины.

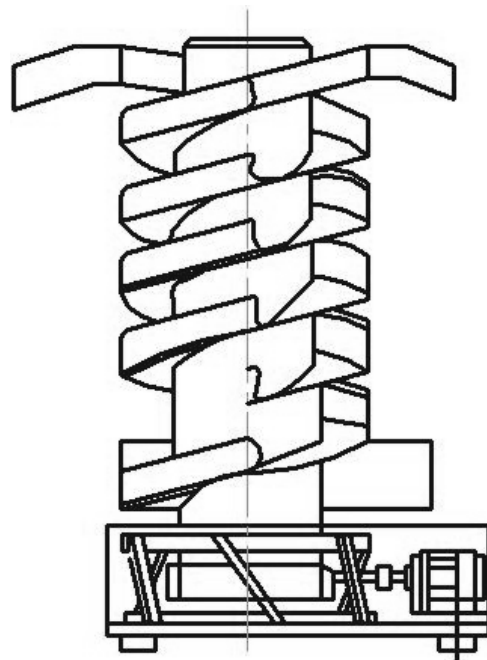


Рис. 6. Вибрационный сепаратор

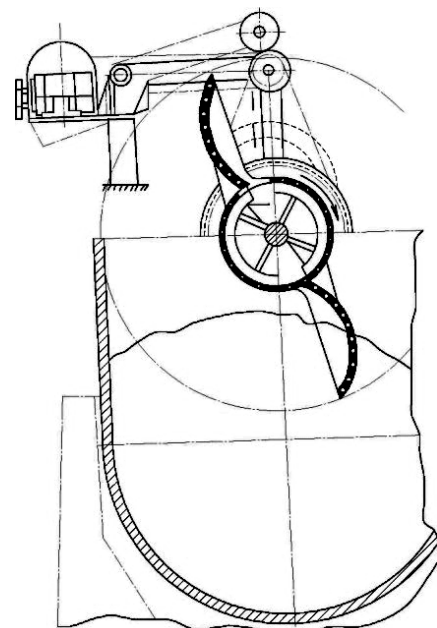


Рис. 7. Вибрационный станок с барабанным сепаратором

Для регулировки высоты погружения и фиксации в контейнере устройства для сепарации и разделения оно выполнено в виде рамы, которая состоит из двух рычагов, жестко связанных штангой. Рама закреплена шарнирно на стойках, одна из которых оборудована фиксатором. Отделение деталей от гранул рабочей среды производится при работающем вибрационном станке. Объем извлекаемых деталей с гранулами рабочей среды регулируется изменением скорости вращения барабана и глубины погружения барабана с ковшами в рабочую среду.

Выше описанное разделительное устройство обладает всеми недостатками разделителей, оборудованных ситами и, кроме того, оно сложно конструктивно, а также эксплуатационно несовершенно и ненадежно, так как предусматривает перевод барабана в рабочее положение вручную.

На рис. 8 показан один из вибрационных манипуляторов, который осуществляет извлечение изделий из контейнера после вибрационной обработки.

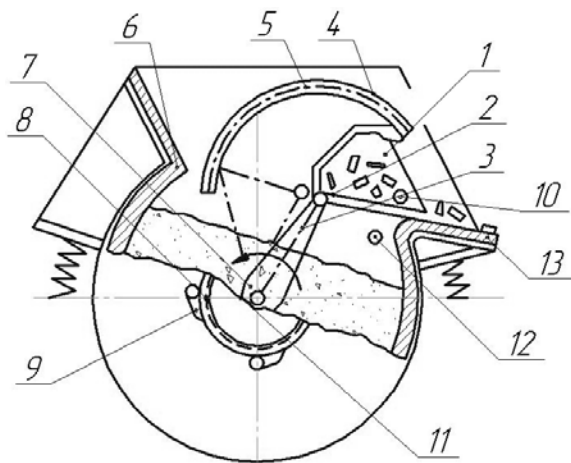


Рис. 8. Сепарация деталей с помощью вибрационного манипулятора

Манипулятор имеет захватный орган в виде сетчатого ковша 1, шарнирно закрепленного на осях 2 рычагов 3. На конце установлены собачки 4, контактирующие с дугвыми зубчатыми рейками 5, закрепленными на внутренних торцевых стенках контейнера 6. Оси 7 рычагов выведены наружу контейнера и на них закреплены храповые колеса 8, контактирующие с подпружиненными собачками.

Автоматическое управление движениями манипулятора осуществляется с помощью выдвижного пневмокамерного упора 10, подпружиненного упора 11 и неподвижного направляющего кулачка 12.

В процессе вибрационной обработки и загрузки изделий ковш опирается на разгрузочную плоскость 13 контейнера и фиксируется упорами 10 и 11. Манипулятор включается в работу при автоматическом установлении упора 10, ковш

получает возможность совершать колебания под действием сил инерции вокруг оси 2. Дугвые рейки 5 и собачки 4 вместе с ковшом образуют механизм свободного хода, который преобразует колебания ковша во вращательное движение, при котором он устанавливается в положение захвата, показанное пунктиром. Приняв положение захвата, ковш устанавливает подпружиненный упор 11 и тем самым включает другой механизм свободного хода, образованный рычагами 3, храповыми колесками 8 и собачками 9. Колебания рычагов 3 совместно с ковшом вокруг оси 7 механизмом свободного хода преобразуется во вращательное движение, при котором входная полость ковша перемещается навстречу потоку циркулирующей среды. При выходе из среды ковш взаимодействует с кулачком 12 и упором 10 и, поворачиваясь вокруг оси 2, приводится в положение разгрузки.

Использование вышеприведенных способов разделения деталей и гранул рабочей среды без остановки станка при помощи вибрационных манипуляторов целесообразно в тех случаях, когда без них невозможна эффективная вибрационная обработка деталей, так как они еще не обладают высокой эксплуатационной надежностью и представляют скорее теоретический, чем практический интерес.

Вибрационный станок, изображенный на рис. 9 [15], содержит контейнер на упругих опорах, приводимых в колебательное движение вибровозбудителем.

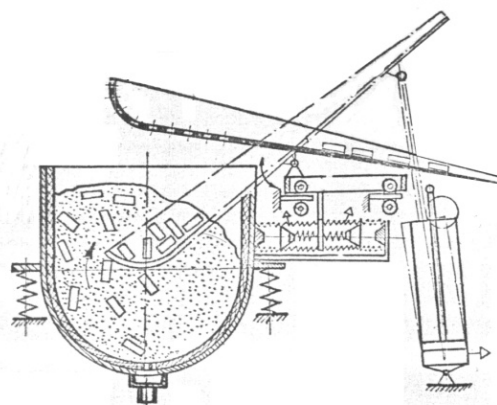


Рис. 9. Вибрационный станок с сепарирующим устройством

Контейнер оснащен сепарирующим устройством с шарнирно закрепленной разделительной решеткой. Сепарирующее устройство имеет механизм ввода и вывода решетки из внутренней полости контейнера в виде силового цилиндра. Для обеспечения плавного дистанционного регулирования режима сепарации, станок снабжен рамой. На раме шарнирно закреплена разделительная решетка. Упругое звено связывает раму с контейнером через жестко связанный с ней консольный элемент. Для обеспечения сепарации обрабатываемых деталей,

размеры которых меньше размеров обрабатываемой среды, разделительная решетка снабжается перфорированной крышкой.

Данный станок работает следующим образом. После окончания обработки в силовой цилиндр подается рабочая среда, и ковш своей левой частью опускается в контейнер, за счет циркуляции среды загрузки на него набегают детали и обрабатываемая среда. Гранулы рабочей среды просыпаются через отверстия в днище ковша, а детали при подъеме ковша высыпаются в тару для готовой продукции. Контейнер соединен со станиной сепарирующего устройства при помощи сифона и передает колебания ковшу последнего с амплитудой, которая будет зависеть от давления рабочей среды в сифоне и которую можно регулировать.

По замыслу данное устройство должно обеспечивать надежность разделения, механизуя процесс вибрационной обработки. Однако, обладая недостатками ситовых отделителей, оно конструктивно сложно, ненадежно в эксплуатации, имеет повышенный износ [16].

Отделение деталей от обрабатываемой среды может осуществляться различными магнитными средствами [8, 17]. Выбор конструкции магнитных средств зависит от типа производства; от массы, формы, габаритных размеров обрабатываемых деталей; от металлов деталей, обладающих свойством магнитопроводности. В практике для отделения деталей массой 0,050 кг, обрабатываемых в вибрационных станках (с емкостью контейнера от 10-80 дм³), используются постоянные магниты или ручные электромагниты. Для отделения деталей массой 0,03-3,0 кг, обрабатываемых большими партиями общим весом 30-300 кг, используются электромагнитные устройства.

Основными частями грузового электромагнита, представленного на рисунке 10, являются стальной литой корпус 1 и размещенные в нем соленоидные катушки 2, электрический ток к обмоткам которых подводится гибким кабелем 3. Снизу катушки защищены от повреждения листом 4 из немагнитного материала (латунь или высокомарганцовистая сталь). При опускании в контейнер электромагнита, подвешенного к грузовому крюку, и при подключении катушки к источнику тока образующийся магнитный силовой поток проходит по корпусу и замыкается через магнитопроводящий груз (обрабатываемые детали), который притягивается электромагнитом и удерживается до тех пор, пока катушка не будет отключена от сети.

В случае извлечения из контейнера сложных объемных деталей могут применяться электромагниты с подвижными (выдвигающимися книзу) полюсами; такие электромагниты обеспечивают лучшее соприкосновение с поднимаемыми деталями, но характеризуются увеличенным собственным весом и повышенным расходом электроэнергии.

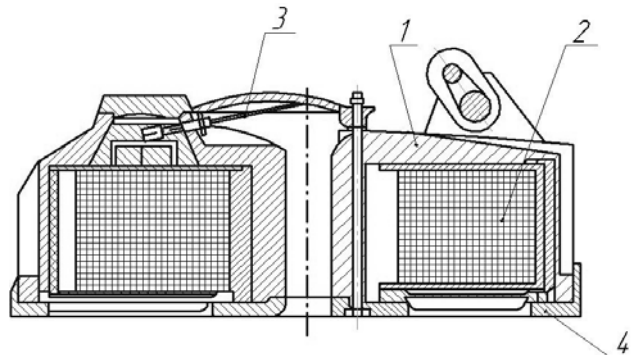


Рис. 10. Грузовой электромагнит:
1 – стальной корпус; 2 – электрокатушки;
3 – гибкий кабель;
4 – лист (из немагнитного материала)

В случае извлечения из контейнера сложных объемных деталей могут применяться электромагниты с подвижными (выдвигающимися книзу) полюсами; такие электромагниты обеспечивают лучшее соприкосновение с поднимаемыми деталями, но характеризуются увеличенным собственным весом и повышенным расходом электроэнергии.

Подъемная сила (грузоподъемность) каждого электромагнита не остается постоянной. Она в большей степени зависит от формы и размеров отделяемых деталей, а также от формы и размеров воздушных промежутков между грузовыми частицами (детальями).

Грузоподъемность электромагнитов снижается по мере ухудшения магнитных свойств отделяемых деталей (например, при повышении процентного содержания марганца и никеля в стали).

Недостатком подъемника для разделения и выгрузки деталей, описанного устройства, можно считать необходимость неоднократного введения электромагнита в контейнер для полного извлечения деталей, а также невозможность применения для отделения немагнитных деталей.

В устройстве В.О. Карташана предложен электромагнитный сепаратор с бегущим магнитным полем. Представленный на рисунке 11, он состоит из магнитопровода 1, намагничивающих катушек постоянного тока 2, полюсных наконечников 3 и дополнительной трехфазной системы с зубчатым магнитопроводом 5. Полюсные наконечники закрыты жесткой немагнитной прокладкой 7, располагающейся по всей длине трехфазной системы.

При включении намагничивающих катушек 2 в межполюсном объеме создается стационарное магнитное поле достаточной глубины, необходимой для извлечения ферромагнитных предметов из сепарируемого материала, расположенного на транспортере 6. Катушки трехфазной системы 4 подключаются к сети трехфазного тока, в результате по длине полюсных наконечников создается бегущее магнитное поле.

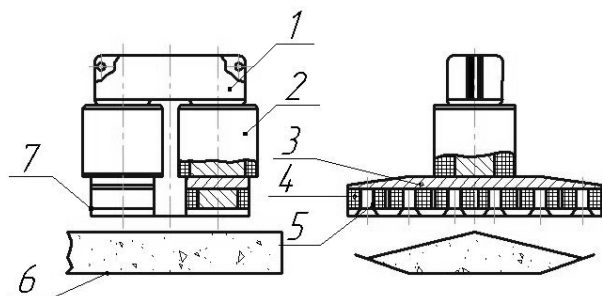


Рис. 11. Электромагнитный сепаратор с бегущим магнитным полем

Извлекаемые (с помощью стационарного магнитного поля) из сепарируемого материала ферромагнитные предметы, притягиваясь к немагнитной прокладке 7, попадают в зону действия бегущего магнитного поля, создаваемого двумя параллельно работающими трехфазными электромагнитными системами, которое выносит извлеченные ферромагнитные предметы (детали) из зоны извлечения в зону разгрузки за пределы контейнера.

Достоинством этого разделителя является отсутствие механически движущихся частей, недостатком является наличие трения деталей о неподвижный экран.

В Львовском национальном университете «Львовская политехника», был разработан принципиально новый универсальный виброструйный разделитель рабочей среды и деталей [18]. Разделение производится по удельной массе, независимо от размеров и магнитных свойств компонентов.

Виброструйный сепаратор изображен на рис. 12. Он представляет собой вибрационный бункерный питатель 1 с герметизированной чашей 2, заполненной жидкостью. Чаша имеет внутреннюю 3 и внешнюю 4 дорожки. Нижняя часть внутренней дорожки полая и служит насосом, а верхняя сплошная и служит для вывода более тяжелого компонента рабочей среды из чаши на лоток 5 через окно 6. Лоток 7 предназначен для вывода через окно 8 в тару легкого компонента рабочей среды.

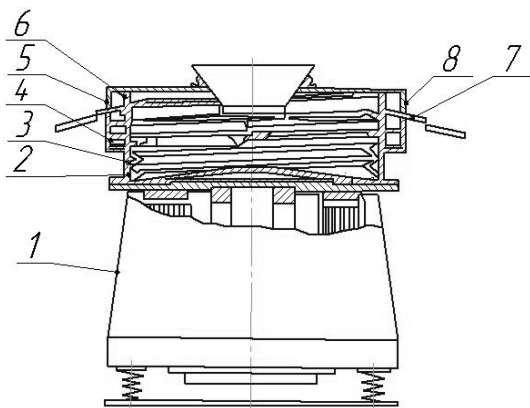


Рис. 12. Виброструйный сепаратор

Под действием направленной вибрации рабочая среда перемещается к дорожке 3 и движется вверх. Менее плотные тела под действием струй выносятся на наружную винтовую дорожку 4 и далее под действием вибрации к окну 8 и лотку 7, а плотные тела – к окну 6 и далее на лоток 5.

Следует полагать, что конструктивная сложность такого устройства является серьезным препятствием для ее практического применения.

Вибрационный станок, изображенный на рисунке 13 [19], может работать в двух режимах: рабочем и режиме отделения обрабатываемых изделий от рабочей среды.

В рабочем режиме вибровозбудители 9 вращаются синхронно в одну сторону. Под действием этих колебаний рабочая среда и детали, рассредоточенные в ней, приобретают колебательные и круговые движения вокруг осей контейнеров 1.

При работе в режиме отделения деталей от рабочей среды нижняя звездочка 14 цепной передачи 12 посредством сцепной кулачковой муфты 15 с одним фиксированным положением разъединяется с валом и одним из электродвигателей 11.

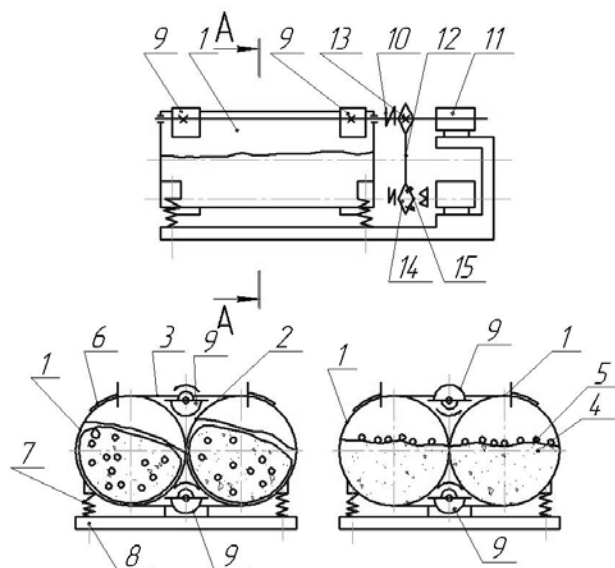


Рис. 13. Вибрационный станок с разделением направленной вибрацией

Рабочий орган станка приобретает прямолинейные колебания в горизонтальной плоскости. Под действием этих колебаний обрабатываемые детали, будучи легче рабочей среды, всплывают на поверхность, то есть происходит отделение деталей от рабочей среды. Такое устройство вибрационного станка решает вопрос разделения, но не предусматривает извлечение деталей из контейнера.

На рисунке 14 представлена схема устройства, у которого замкнутая резиновая лента 1 установлена с возможностью наклона ее в двух плоскостях под углами, обеспечивающими самоскатывание гранул

рабочей среды в установленный по длине ленты лоток 6.

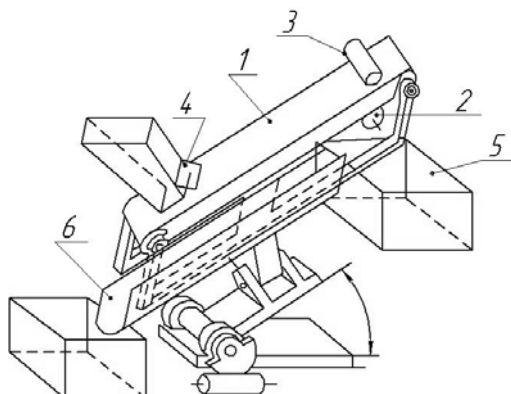


Рис. 14. Устройство для транспортировки и отделения деталей от гранул рабочей среды

Для создания равномерного слоя на движущейся ленте устройства, загруженный бункер снабжен регулируемой подпружиненной створкой 4.

Влажные детали прилипают к сепарирующей поверхности и движутся вверх. Затем они сбрасываются вращающейся щеткой 2 в бункер 5. Рабочая среда скатывается в лоток 6. Оставшиеся на ленте гранулы сбрасываются вращающимся валиком 3.

Обобщая вышеизложенный материал, важно отметить, что в современных условиях заказчик требует от производителя не один станок, а технологический комплекс, позволяющий реализовать весь технологический процесс при этом, такой комплекс должен быть универсальным и механизированным. Сегодня все ведущие производители предлагают готовые технологические решения для различных задач, пример такого комплекса представлен на рисунке 15 [19].

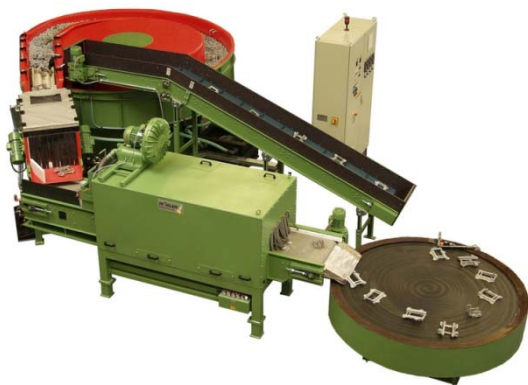


Рис. 15. Вибрационный комплекс

5. Выводы. Сепарация деталей от абразивного наполнителя на этапе вспомогательных операций процесса вибрационной обработки должна быть механизирована. Приспособления, предназначенные для разделения деталей и рабочей среды, а также других вспомогательных операций,

интегрированные в конструкцию вибрационного станка или являющиеся частью технологического комплекса являются наиболее эффективными. Целесообразно производить разработку таких приспособлений (механизированных устройств) на этапе конструкторского проектирования.

Л и т е р а т у р а

1. Применение вибрационных технологий на операциях отделочно-зачистной обработки деталей (очистка, мойка, удаление облоя и заусенцев, обработка кромок) [Текст] / Под ред. А. П. Бабичева. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2010. – 287 с.
2. Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах [Текст] / И. Н. Карташов, М. Е. Шаинский, В. А. Власов и др. – К.: Высшая школа, 1975. – 179 с.
3. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии [Текст] / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Ростов-на-Дону, 1999. – 622 с.
4. Мічик А.В. Підвищення ефективності обробки великогабаритних плоскісних виробів активізацією руху робочого середовища у коливних U-подібних контейнерах [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Мічик Андрій Володимирович. – Х., 2008. – 20 с.
5. Бранспиз Е.В. Повышение эффективности виброабразивной обработки путем рационального выбора ее основных параметров [Текст]: дис... канд. тех. наук / Е.В. Бранспиз. – Луганск, 2001. – 265 с.
6. Романченко А.В. Расширение технологических возможностей вибрационного оборудования за счет создания условий обработки длинномерных деталей [Текст]: дис... канд. тех. наук / А.В. Романченко. – Чернигов, 2011. – 203 с.
7. Берник, П. С. Вибрационные технологические машины с пространственными колебаниями рабочих органов [Текст] / П. С. Берник, Л. В. Ярошенко. – Винница, 1998. – 116 с.
8. Александров М.П. Подъемно-транспортные машины [Текст] / М.П. Александров. – М.: Высшая школа, 1985 г. – 520 с.
9. Политов И.В. Вибрационная обработка деталей машин и приборов [Текст] / И.В. Политов, Н.А. Кузнецов. – Л.: Лениздат, 1965. – 180 с.
10. Конструкция и эксплуатация сит просеивающих машин [Текст] / Л.И. Котляр, Н.Я. Кестельман, Н.В. Остапчук, А.А. Вайнберг; под ред. А.Я.Соколова. – М.: Машгиз, 1963. – 132 с.
11. А.с. 231342 СССР, МКИ В 24 В 31/06. Устройство для виброабразивной обработки металлических деталей [Текст] / М.И. Шаинский (СССР). – № 1005785/25-08; заявл 05.05.66; опубл. 15.09.68, Бюл. № 35. – 2 с.
12. Попов А.С. Применение вибрационной обработки в машиностроении. [Текст] / А.С. Попов, В.Д. Жердочкин. – М.: Машиностроение, 1974. – 140 с.
13. А.с. 429937 СССР, МКИ В24б 31/06. Сепаратор [Текст] / В.С. Сердюков, В.Б. Трунин (СССР) – № 16696333/25 – 8; заявл. 07.06.1971; опубл. 30.05.1974, Бюл. № 20 – 2с.
14. А.с. 467818 СССР, МКИ В24б 31/06. Вибрационная машина [Текст] / Е.В. Суботин (СССР) – № 1769398/25-8; заявл. 06.04.1972; опубл. 25.04.1975, Бюл. № 15 – 4с.

15. А.с. 691281 СССР, МКИ В24В 31/06. Вибрационная установка [Текст] / П.Д. Денисов, И.Ф. Брайлян, В.П. Чайка, В.Г. Дубовой, И.Е. Космина (СССР) – № 2509952/25-08; заявл. 18.07.1977; опубл. 15.10.1979, Бюл. № 38 – 4с.
16. Шаинский М.Е. Проблемы развития виброабразивной обработки в стране [Текст] / М.Е. Шаинский, Виброабразивная обработка деталей: Сб. материалов Всесоюзного научно-техн. семинара. Ворошиловград, 1978. – С.3-8.
17. Загирняк, М. В. Магнитные сепараторы. Проблемы проектирования [Текст]: монография / М. В. Загирняк, Ю. А. Бранспиз, И. А. Шведчикова; под ред. М. В. Загирняка. – К.: Техніка, 2011. – 224 с.
18. А.с. 294715 СССР, МКИ В24В 31/06. Сепаратор [Текст] / В.А. Повидайло, Р.Я. Сахно (СССР) – № 1325927/25-08; заявл. 22.04.1969; опубл. 04.02.1971, Бюл. № 7 – 3с.
19. А.с. 575210 СССР, МКИ В24В 31/06. Машина двухконтейнерная для вибрационной обработки [Текст] / В.А. Повидайло, В.А. Щигель, И.Ф. Заневский, Б.Д. Белин (СССР) – № 2375770/25-08; заявл. 24.06.1976; опубл. 05.10.1977, Бюл. № 37 – 3с.
20. ROSLER finding a better way... [Электронный ресурс]: Галтовочная техника / Линейные проходные установки. – Режим доступа http://www.rosler.ru/produkte/gleitschlifftechnik/linear_du_rchlaufenlagen/, свободный. – Загл. с экрана.
9. Politov, I. V. and Kuznecov, N. A. (1965), *Vibracionnaja obrabotka detalej mashin i priborov* [Vibration treatment of details and devices], Lenizdat, Saint-Petersburg, Russia.
10. Kotljars, L.I., Kestel'man, N.Ja., Ostapchuk, N.V., Vajnberg, A.A. and Sokolov, A.Ja. (1963), *Konstrukcija i jekspluatacija sit proseivajushhih mashin* [Sieve design and exploitation of sieve machines], Mashgiz, Moscow, Russia.
11. Shainsij, M.I. "Device for metal details vibration treatment", *A.s. 231342 SSSR*, *zajavl.* 05.05.1966, *opubl.* 15.09.1968, *Bjul.* No 35.
12. Popov, A.S. and Zherdochkin, V.D. (1974), *Primenenie vibracionnoj obrabotki v mashinostroenii* [Application of vibration treatment in mechanical engineering], Mashinostroenie, Moscow, Russia.
13. Serdjukov, V.S. and Trunin, V.B. "Separator", *A.s. 429937 SSSR*, *zajavl.* 07.06.1971, *opubl.* 30.05.1974, *Bjul.* No 20.
14. Subotin, E.V. "Vibrating machine", *A.s. 467818 SSSR*, *zajavl.* 06.04.1972, *opubl.* 25.04.1975, *Bjul.* No 15.
15. Denisov, P.D., Brajljan, I.F., Chajka, V.P., Dubovoj, V.G. and Kos'mina, I.E. "Vibrating machine", *A.s. 691281 SSSR*, *zajavl.* 18.07.1977, *opubl.* 15.10.1979, *Bjul.* No 38.
16. Shainskij, M.E. (1978), "Problems of vibration treatment development in country", *Vibroabrazivnaja obrabotka detalej* [Vibration treatment of details], *Vsesojuznyj nauchno-tehn. seminar* [All-Union Scientific and Technical. seminar], Lugansk, pp. 3-8.
17. Zagirnjak, M. V., Branspiz, Ju. A. and Shvedchikova, I. A. (2011), *Magnitnye separatory. Problemy proektirovanija* [Magnetic separators. Problems of design], Tehnika, Kiev, Ukraine.
18. Povidajlo, V.A. and Sahno, R.Ja. "Separator", *A.s. 294715 SSSR*, *zajavl.* 22.04.1969, *opubl.* 04.02.1971, *Bjul.* No 7.
19. Povidajlo, V.A., Shhigel', V.A., Zanevskij, I.F. and Belin, B.D. "Two containers machine for vibration treatment", *A.s. 575210 SSSR*, *zajavl.* 24.06.1976, *opubl.* 05.10.1977, *Bjul.* No 37.
20. ROSLER finding a better way... "Tumbling equipment / Linear bushing installation", available at: http://www.rosler.ru/produkte/gleitschlifftechnik/linear_du_rchlaufenlagen/.

References

1. Babichev, A. P. (2010), *Primenenie vibracionnyh tehnologij na operacijah otdelochno-zachistnoj obrabotki detalej (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.
2. Kartashov, I. N., Shainskij, M. E. and Vlasov, V. A. (1975), *Obrabotka detalej svobodnymi abrazivami v vibrirujushhih rezervuarah* [Free abrasives treatment of details in vibrating tanks], Vysshaja shkola, Kiev, Ukraine.
3. Babichev, A.P. and Babichev, I.A. (1999), *Osnovy vibracionnoj tehnologii* [Fundamentals of vibration technology], Rostov-on-Don, Russia.
4. Micyk, A.V. (2008), "Processing Improvement of large-sized products treatment by movement activation of the working environment in the oscillating U-shaped containers", Abstract of Cand. Sci. (Tech.) dissertation, 05.03.01, Kharkov, Ukraine.
5. Branspiz, E.V. (2001), "Improvement of vibration treatment efficiency by rational choice of its basic parameters", Cand. Sci. (Tech.) dissertation, Lugansk, Ukraine.
6. Romanchenko, A.V. (2011), "Expansion of vibration equipment technological possibilities by creation of conditions for long details treatment", Cand. Sci. (Tech.) dissertation, Chernihiv, Ukraine.
7. Bernik, P. S. and Jaroshenko, L. V. (1998), *Vibracionnye tehnologicheskie mashiny s prostranstvennymi kolebanijami rabochih organov* [Vibration machines with spatial fluctuations of the working bodies], Vinnitsa, Ukraine.
8. Aleksandrov, M.P. (1985), *Pod'emno-transportnye mashiny* [Handling machinery], Vysshaja shkola, Moscow, Russia.

Романченко О.В. Романченко Ю.А. Обзор устройств для вспомогательных операций вибрационной обработки.

У роботі представлено огляд механізованих пристосувань призначених для допоміжних операцій вібраційної обробки деталей. На основі аналізу інформаційних джерел розглянуті функціональні і конструктивні особливості існуючих різновидів пристосувань для поділу робочого середовища і оброблюваних деталей. Встановлено, що раціональною є розробка допоміжних пристосувань на етапі конструкторського проектування. Вказані переваги і недоліки представлених пристроїв.

Ключові слова: вібраційна обробка, сепарація, пристосування, механізація, допоміжна операція, верстат.

Romanchenko A.V., Romanchenko J.A. Review of devices for vibration treatment support operations.

The article provides an overview of mechanized devices designed for vibration treatment support operations. It is set that separation of details from abrasive on stage of vibration treatment support operations should be mechanized. Based on

the analysis of information sources functional and structural features of existing varieties of devices for separation of working environment and machined parts are considered. It is shown that integrated into vibrating machine or technological complex devices for separation and other support operations are the most effective. It is set that development of support devices at the stage of construction engineering is rational. Advantages and disadvantages of presented devices are shown.

Keywords: vibration treatment, separation, appliances, mechanization, support operation, the machine-tool.

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

Романченко Юлія Андріївна – аспірант кафедри електричної інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк).

Рецензент: д.т.н., проф. **Носко П.Л.**

Стаття подана 08.09.2016

УДК 697

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИХ ОБЪЕКТНОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ

Соколов В.И.

MODELING OF GAS DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE VENTILATION SYSTEMS BASED ON THEIR OBJECT-ORIENTED DECOMPOSITION

Sokolov V.I.

Представлена методика расчета газодинамических характеристик промышленных вентиляционных систем на основе их объектной декомпозиции. В системе выделены типовые расчетные элементы, структуры и связи, на основании чего построена обобщенная математическая модель. Рассмотрены исходные данные для моделирования характеристик системы.

Ключевые слова: вентиляционная система, декомпозиция, давление, расход, расчетный элемент, конструктивный узел, замкнутый контур.

Постановка проблемы.

Составной частью любого промышленного предприятия являются такие инженерно-технические сооружения, как вентиляционные системы [1–3], обеспечивающие требуемые санитарно-технические нормы в производственных помещениях, безопасность труда и соблюдение технологических процессов. Вентиляция и кондиционирование воздуха играют важнейшую роль на ряде предприятий машиностроительной, химической, текстильной промышленности, в шахтах, где без них невозможно ведение многих технологических процессов.

Системы вентиляции и кондиционирования современных промышленных предприятий и объектов, атомных станций представляют собой сложные инженерные сооружения и требуют на свое создание больших материальных затрат. Кроме того, доля эксплуатационных затрат на их функционирование может составлять 50–60 % общих расходов на эксплуатацию здания. Поэтому важно не только обеспечить нормальные санитарно-технические нормы в помещениях, но и добиваться рационального и экономичного инженерного решения при устройстве системы вентиляции еще на стадии проектирования. Решение этой проблемы может дать существенный положительный эффект в техническом, экономическом и социальном аспекте

– обеспечить работу агрегатов в расчетных режимах, уменьшить стоимость вентиляционной системы, повысить безопасность труда.

Анализ последних исследований и публикаций.

Рост требований к эффективности вентиляционных систем при современной тенденции сокращения времени на разработку проектируемых объектов предполагает пересмотр методов подхода к их расчету [1, 4–6]. Проблемы подготовки данных для проектирования, доводки и наладки готовых объектов, реконструкции существующих систем, как правило, решаются на основе многовариантных расчетов и поиска наиболее оптимальных решений с использованием математических моделей. Экспериментальной проверке и доводке подвергается весьма ограниченное число вариантов, отобранных на основе компьютерного моделирования системы. Такой подход к проектированию позволяет быстрее и надежнее находить оптимальные решения и экономически является наиболее оправданным. Кроме того, исследования, проведенные на математической модели с учетом реальных характеристик элементов систем, дают возможность обоснованно подойти к вопросу проведения ремонтно-восстановительных и профилактических работ, анализировать возможные аварийные ситуации и т.д.

Цель статьи.

Целью данной работы разработка методики расчета газодинамических характеристик промышленных вентиляционных систем на основе их объектной декомпозиции на типовые расчетные элементы, структуры и связи.

Материалы и результаты исследования.

Для моделирования газодинамических характеристик произвольной вентиляционной

системы выполним ее объектную декомпозицию, т.е. расчленим систему на расчетные элементы. Под расчетным элементом системы подразумеваем одно из конструктивных устройств реальной системы. Понятие элемента системы является относительным, так как под ним может подразумеваться и совокупность нескольких простых устройств.

По конструктивным и технологическим принципам в каждой вентиляционной системе могут быть выделены следующие типовые расчетные элементы:

- источники напора или нагнетатели (вентиляторы, воздуходувки, дымососы, компрессоры и т.д.);
- участки воздуховодов, по которым осуществляется движение газовой среды;
- запорно-регулирующие устройства (завдвижки, местные сопротивления и т.д.);
- технологические устройства, осуществляющие выброс или отбор рабочей среды из системы (например, канал выброса в атмосферу).

Моделью источника напора примем математическую зависимость между полным давлением p_v , развиваемым нагнетателем, и расходом Q

$$p_v = f_1(Q). \quad (1)$$

Характеристики нагнетателей в зоне рабочих режимов достаточно точно описываются параболой, которую по результатам паспортных данных или стендовых испытаний будем аппроксимировать в виде трехчлена

$$p_v = a + bQ + cQ^2, \quad (2)$$

где a, b, c – постоянные для данного вентилятора коэффициенты.

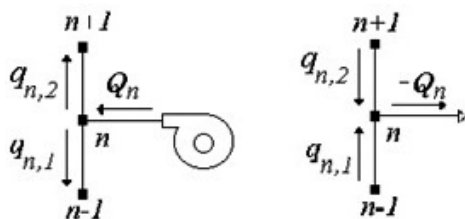


Рис. 1. Конструктивный узел

В качестве расчетной модели участка воздуховода вентиляционной системы используем зависимость потерь давления на трение и местных аэродинамических сопротивлений на рассматриваемом участке от расхода с учетом, в общем случае, режима течения рабочей среды, характеризуемого числом Рейнольдса Re

$$\Delta p = f_2(Q, \Delta, \zeta, Re), \quad (3)$$

где Δ – шероховатость внутренней поверхности воздуховода; ζ – коэффициент местного сопротивления [4 – 6].

Характеристики запорно-регулирующих устройств и технологических устройств, осуществляющих выброс или отбор рабочей среды, представляем в виде

$$\Delta p_{py} = f_3(Q, R). \quad (4)$$

На основании анализа пространственной и технологической структуры в произвольной вентиляционной системе могут быть выделены конструктивные узлы и замкнутые контура. В качестве конструктивного узла примем места разветвления и слияния воздуховодов (рис. 1). Для каждого из них должно соблюдаться уравнение неразрывности

$$Q_n + \sum_{p=1}^{MU} q_{n,p} = 0. \quad (5)$$

Здесь Q_n – расход рабочей среды, подаваемый нагнетателем или отбираемый (выбрасываемый) из n -го узла; $q_{n,p}$ – расход, вытекающий или втекающий из этого узла по участку воздуховода, подключенному к этому узлу; MU – число участков, подключенных к узлу. Можно условиться давать положительное значение расходу, если он направлен к узлу (см. рис. 1).

Связь полных давлений между двумя соседними узлами при наличии между ними, в общем случае, нагнетателей (см. рис. 2) можно представить в виде

$$\begin{aligned} p_n + \sum_{s=1}^{SV} (p_{v,n,n+1})_s = \\ = p_{n+1} + \Delta p_{cm,n,n+1} + \sum_{s=1}^{SP} (p_{py,n,n+1})_s + \sum_{s=1}^{SK} (\Delta p_{n,n+1})_s \end{aligned} \quad (6)$$

где p_n, p_{n+1} – полные давления в узлах; $\sum p_{v,n,n+1}$ – сумма характеристик источников напора, установленных между узлами; $\Delta p_{cm,n,n+1}$ – потребный статический перепад давлений между узлами; $\sum \Delta p_{py,n,n+1}$ – сумма перепадов давлений на запорно-регулирующих устройствах; $\sum \Delta p_{n,n+1}$ – сумма потерь давления на участках воздуховодов; SV – число источников напора между узлами; SP – число запорно-регулирующих устройств; SK – число участков воздуховодов.

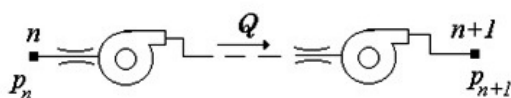


Рис. 2. Связь двух соседних узлов

Для каждого i -го замкнутого контура в системе (рис. 3)

$$\sum_{j=1}^{NK} \left[\sum_{s=1}^{SK} (\Delta p)_{s,j,i} + \sum_{s=1}^{SP} (\Delta p_{py})_{s,j,i} - \sum_{s=1}^{SV} (p_v)_{s,j,i} \right] = 0 \quad (7)$$

Здесь NK – число линейных (межузловых) участков, входящих в состав замкнутого контура; $\sum (\Delta p)_{s,j,i}$, $\sum (\Delta p_{py})_{s,j,i}$, $\sum (p_v)_{s,j,i}$ – соответственно суммы потерь давлений на участках воздухопроводов, запорно-регулирующих устройствах, сумма полных давлений источников напора на j -ом линейном участке.

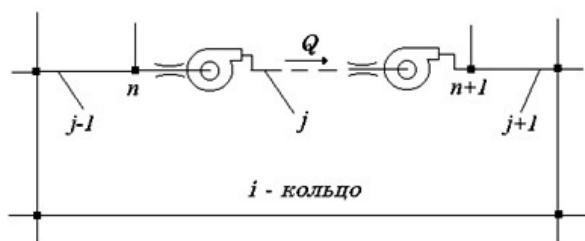


Рис. 3. Замкнутый контур (кольцо)

Выделим в произвольной вентиляционной системе согласно вышеизложенной методике типовые расчетные элементы, конструктивные узлы и замкнутые контура. В общем случае будем иметь KU узлов и KK замкнутых контуров. Тогда, для всей системы можно составить обобщенную математическую модель, в которую войдут: KU уравнений неразрывности (баланса расходов) в узловых точках; уравнений потерь давления в замкнутых контурах системы; $KU-1$ уравнений связи полных давлений в узловых точках. С учетом принятых математических моделей типовых расчетных элементов уравнения (3 – 7) можно свести к системе из M линейных и N нелинейных уравнений

$$F_1(q) = \begin{cases} q_{1,1} + q_{1,2} + \dots + q_{1,k} + \dots + Q_1 = 0; \\ q_{2,1} + q_{2,2} + \dots + q_{2,k} + \dots + Q_2 = 0; \\ \dots \\ q_{n,1} + q_{n,2} + \dots + q_{n,k} + \dots + Q_n = 0; \\ \dots \\ q_{M,1} + q_{M,2} + \dots + q_{M,k} + \dots + Q_M = 0; \end{cases} \quad (8)$$

$$F_2(q) = \begin{cases} B_{1,1}q_{1,1} + \dots + B_{1,j}q_{1,j} + \dots + C_{1,1}q_{1,1}^2 + \dots + C_{1,j}q_{1,j}^2 + \dots \\ + R_{1,1}q_{1,1}^m + \dots + R_{1,j}q_{1,j}^m + \dots = A_1; \\ B_{2,1}q_{2,1} + \dots + B_{2,j}q_{2,j} + \dots + C_{2,1}q_{2,1}^2 + \dots + C_{2,j}q_{2,j}^2 + \dots \\ + R_{2,1}q_{2,1}^m + \dots + R_{2,j}q_{2,j}^m + \dots = A_2; \\ \dots \\ B_{i,1}q_{i,1} + \dots + B_{i,j}q_{i,j} + \dots + C_{i,1}q_{i,1}^2 + \dots + C_{i,j}q_{i,j}^2 + \dots \\ + R_{i,1}q_{i,1}^m + \dots + R_{i,j}q_{i,j}^m + \dots = A_i; \\ \dots \\ B_{N,1}q_{N,1} + \dots + B_{N,j}q_{N,j} + \dots + C_{N,1}q_{N,1}^2 + \dots + C_{N,j}q_{N,j}^2 + \dots \\ + R_{N,1}q_{N,1}^m + \dots + R_{N,j}q_{N,j}^m + \dots = A_N; \end{cases} \quad (9)$$

где m – показатель степени в уравнении потерь давления для участка воздуховода (принимается при турбулентном режиме течения, который является рабочим для реальных систем, равным 2); A_i , $B_{i,j}$, $C_{i,j}$ – постоянные коэффициенты, определяемые суммированием коэффициентов характеристик источников напора, а также добавлением статических давлений к коэффициенту A_i при записи связи между двумя соседними узлами; $R_{i,j}$ – приведенные сопротивления.

Использование предложенной обобщенной математической модели для расчета параметров стационарного режима произвольной системы предполагает задание следующих исходных данных: схема расположения элементов в системе; геометрические характеристики конструктивных участков и коэффициенты установленных местных сопротивлений; аэродинамические характеристики запорно-регулирующих устройств; характеристики источников напора; высотные отметки и значения температуры в узловых точках; физические свойства рабочей среды; граничные условия (величины давлений и температуры в местах забора и выброса рабочей среды).

Выполнен анализ и обоснование численных методов расчета характеристик вентиляционных систем на обобщенной математической модели, в частности, показана эффективность методов Ньютона и Зайделя, метода итераций и половинного деления. Обобщенная математическая модель апробировалась при расчетах конкретных промышленных вентиляционных систем. При этом, достигались адекватные результаты [7 – 10], что позволяет рекомендовать данную методику в качестве инструмента для расчета сложных вентиляционных систем как при их проектировании, так и диагностики в процессе эксплуатации.

Выводы.

Таким образом, разработана методика расчета газодинамических характеристик промышленных вентиляционных систем на основе их объектной декомпозиции на типовые расчетные элементы, структуры и связи. Для моделирования характеристик предложена обобщенная математическая модель и рассмотрены основные исходные данные.

Л и т е р а т у р а

1. Соколов В.И. Аэродинамика газовых потоков в каналах сложных вентиляционных систем. [Текст] – Луганск: ВУГУ, 1999. – 200 с.
2. Меклер В.Я. Вентиляция и кондиционирование воздуха на машиностроительных заводах [Текст]: Справочник. – М.: Машиностроение, 1980. – 335 с.
3. Мясников А.Ф., Миллер Ю.А., Комаров Н.Е. Вентиляционные сооружения в угольных шахтах. [Текст] – М.: Недра, 1983. – 270 с.
4. Эльтерман В.М. Вентиляция химических производств. [Текст] – М.: Химия, 1980. – 284 с.
5. А.А. Коваленко Основы технической механики жидкостей и газов: учебное пособие для вузов / А.А. Коваленко, В.И. Соколов и др. - Луганск: ВУГУ, 1998. - 278 с.
6. Коваленко А.А. Аэрогидромеханика. Ч. 7. Одномерные течения идеального газа: учебное пособие для вузов / А.А. Коваленко, Соколов В.И. и др. – Луганск: ВНУ, 2001. – 48 с.
7. Андрийчук Н.Д. Пути совершенствования систем теплоснабжения / Н.Д. Андрийчук, В.И. Соколов и др. – Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2003. – 244 с.
8. Недопекин Ф.В. Диффузионные процессы в стационарных газовых потоках / Ф.В. Недопекин, В.И. Соколов и др. – Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2007. 224 с.
9. Андрийчук Н.Д. Аэрогидромеханика: учебное пособие для вузов / Н.Д. Андрийчук, В.И. Соколов и др. – Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2009. – 516 с.
10. Недопекин Ф.В. Основы механики сплошных сред: учебное пособие для вузов / Ф.В. Недопекин, В.И. Соколов и др. – Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2010. – 277 с.

R e f e r e n c e s

1. Sokolov V.Y. Aerodynamika hazovyykh potokov v kanalakh slozhnykh ventilyatsionnykh system. [Tekst] – Luhansk: VUHU, 1999. – 200 s.
2. Mekler V.Ya. Ventilyatsiya y kondytsionirovaniye vozdukha na mashynostroytelnykh zavodakh [Tekst]: Spravochnik. – M.: Mashynostroeniye, 1980. – 335 s.
3. Miasnykov A.F., Myller Yu.A., Komarov N.E. Ventilyatsionnyye sooruzheniya v uholnykh shakhtakh. [Tekst] – M.: Nedra, 1983. – 270 s.
4. El'terman V.M. Ventilyatsiya khymicheskyykh proyzvodstv. [Tekst] – M.: Khymiya, 1980. – 284 s.
5. Kovalenko A.A. Osnovy tekhnicheskoi mekhaniky zhydkostey y hazov: uchebnoye posobyе dlia vuzov / A.A. Kovalenko, V.Y. Sokolov y dr. - Luhansk: VUHU, 1998. - 278 s.
6. Kovalenko A.A. Aэрогидромеханика. Ч. 7. Oдномерные tечения yдеального газа: uchebnoye posobyе dlia vuzov / A.A. Kovalenko, Sokolov V.Y. y dr. – Luhansk: VNU, 2001. – 48 s.

7. Andryichuk N.D. Puty sovershenstvovaniya system teplosnabzheniya / N.D. Andryichuk, V.Y. Sokolov y dr. – Luhansk: VNU ym. V. Dalia, 2003. – 244 s.
8. Nedopekyn F.V. Dyffuzyonnyye protsessy v statsyonarnyykh hazovyykh potokakh / F.V. Nedopekyn, V.Y. Sokolov y dr. – Luhansk: VNU ym. V. Dalia, 2007. 224 s.
9. Andryichuk N.D. Aэрогидромеханика: uchebnoye posobyе dlia vuzov / N.D. Andryichuk, V.Y. Sokolov y dr. – Luhansk: VNU ym. V. Dalia, 2009. – 516 s.
10. Nedopekyn F.V. Osnovy mekhaniky sploshnykh sred: uchebnoye posobyе dlia vuzov / F.V. Nedopekyn, V.Y. Sokolov y dr. – Luhansk: VNU ym. V. Dalia, 2010. – 277 s.

Соколов В.І. Моделювання газодинамічних характеристик вентиляційних систем на основі їх об'єктної декомпозиції

Представлена методика розрахунку газодинамічних характеристик промислових вентиляційних систем на основі їх об'єктної декомпозиції. В системі виділені типові розрахункові елементи, структури і зв'язку, на підставі чого побудована узагальнена математична модель. Розглянуто вихідні дані для моделювання характеристик системи.

Ключові слова: вентиляційна система, декомпозиція, тиск, витрата, розрахунковий елемент, конструктивний вузол, замкнений контур.

Sokolov V.I. Modeling of gas dynamic characteristics of the ventilation systems based on their object-oriented decomposition

The technique of calculating the gas dynamic characteristics of industrial ventilation systems based on their object decomposition. The system highlighted the typical elements of the design, structure and communication, on the basis of which the generalized mathematical model is built. We consider the initial data for modeling of system performance.

Keywords: ventilation system, decomposition, pressure, flow, billing element, structural unit, a closed circuit.

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

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

Стаття подана 22.09.2016

УДК 621.646 : 62-83

**СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫМ
ОБОРУДОВАНИЕМ С ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ****Соколова Я.В.****AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF ENGINEERING EQUIPMENT
WITH ELECTRO-HYDRAULIC DRIVE****Sokolova Ya.V.**

Предложена типовая математическая модель машиностроительного оборудования с электрогидравлическим приводом оборудования как объекта автоматического управления. Разработана система автоматического управления оборудованием, учитывающая стохастическое возмущение и шум наблюдения. Выполнен анализ качества регулирования системы автоматического управления.

Ключевые слова: машиностроительное оборудование, электрогидравлический привод, насос, гидродвигатель, математическая модель, динамические характеристики, система автоматического управления

Постановка проблемы.

Достижение произвольной кинематики рабочих органов машиностроительного оборудования, возможность программной реализации оптимальных законов движения обеспечивается применением автоматических электрогидравлических приводов (ЭГП). Широкое распространение гидравлических приводов в машиностроительном оборудовании определяется такими важными преимуществами [1 – 4], к которым, прежде всего, относят возможности получать большие силы и моменты при сравнительно малых размерах гидродвигателей, плавность перемещения и бесступенчатое регулирование скорости в большом диапазоне, малая инерционность, возможность управлять режимами обработки во время движения рабочих органов, простота осуществления прямолинейных возвратно-поступательных движений и автоматического управления рабочими органами, легкость предохранения от перегрузок и высокая эксплуатационная надежность.

Анализ уровня автоматизации машиностроительного оборудования с ЭГП показывает, что существующие системы используют упрощенные математические модели рабочих процессов, не учитывают стохастическое

возмущение и шум наблюдения. Поэтому, для автоматизации процессов управления и синтеза САУ требуют развития математические модели рабочих процессов, которые протекают в приводах и учитывают особенности технологического назначения оборудования.

Анализ последних исследований и публикаций.

При математическом моделировании динамических характеристик машиностроительного оборудования с ЭГП возникают определенные трудности с описанием рабочих процессов, протекающих в них [5 – 9]. Кроме процессов, возникающих при выполнении системами запланированных операций в гидроприводе, имеют место колебания давлений, расходов, отдельных деталей вследствие сжимаемости рабочей среды, воздействия рабочей среды на регулирующие устройства, утечки по зазорам и других причин. Сочетание всех этих явлений приводит к сложным нестационарным гидромеханическим процессам, которые необходимо учитывать при проектировании оборудования с ЭГП.

Проблематика расчета и проектирования автоматических ЭГП машиностроительного оборудования, синтеза и исследования САУ оборудованием представлена в работах Навроцкого К.Л., Петракова Ю.В., Попова Д.Н., Струтинского В.Б., Федорца В.А. и др. [1 – 3].

Следует отметить, что известные подходы к описанию рабочих процессов в машиностроительном оборудовании используют упрощенные математические модели характеристик, не учитывают стохастическое возмущающее действие и шум наблюдения, вследствие чего отсутствуют возможности дальнейшего совершенствования оборудования.

Цель статьи.

Целью данной работы является разработка типовой математической модели ЭГП машиностроительного оборудования как объекта автоматического управления и САУ оборудованием, учитывающей стохастическое возмущение и шум наблюдения.

Материалы и результаты исследования.

В гидравлических приводах машиностроительного оборудования наибольшее распространение получили объемный (машинный) и дроссельный способы регулирования скорости выходного звена гидродвигателя. Сущность объемного управления скоростью рабочего органа состоит в том, что подача жидкости к гидродвигателю изменяется за счет изменения подачи регулируемого насоса, питающего систему. Принцип дроссельного регулирования заключается в том, что часть подачи нерегулируемого насоса отводится через клапан или дроссель на слив, минуя гидродвигатель. В отличие от объемного способа регулирования в системах с дроссельным регулированием подача жидкости насосом всегда больше подачи, необходимой для получения заданной скорости.

В расчетной схеме оборудования с ЭГП с дроссельным регулированием (рис. 1) отображены: электрический блок (ЕБ), электрохимический преобразователь (ЕМП), гидроусилитель (ГП), гидродвигатель (ГД). ЕБ содержит суммирующий (сравнивающий) усилитель, усилитель напряжения, корректирующий контур и усилитель мощности. ЕМП та ГП обычно составляют одно устройство – электрогидравлический усилитель (ЕГПУ). В выходном каскаде усиления ЕГПУ рассмотрен золотниковый гидроусилитель.

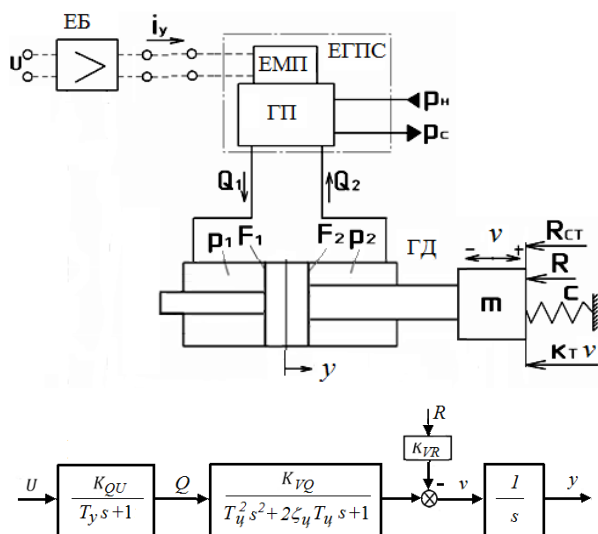


Рис. 1. Расчетная схема ЭГП с дроссельным регулированием и структурная схема его математической модели как объекта автоматического управления

Математическая модель включает следующие уравнения и зависимости [6, 7]:

$$L_y \frac{di_y}{dt} + R_3 i_y = k_{yc} U; \quad (1)$$

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

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

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

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

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

$$\frac{W_{no} + F_1(H/2 + y)}{E_{жс}} \frac{dp_1}{dt} = Q_1 - F_1 v; \quad (7)$$

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

где y, v – перемещение и скорость поршня; p_1, p_2 – давления в полостях гидроцилиндра; m – приведенная масса подвижных частей; F_1, F_2 – эффективные площади; c – жесткость позиционной нагрузки; k_T – коэффициент силы вязкого трения; R_{cm} – сила сухого трения; R – нагрузка; H – ход поршня; $E_{жс}$ – модуль упругости рабочей жидкости; W_{no}, W_{co} – «мертвые» объемы напорной и сливной магистралей; k_{xi} – коэффициент передачи ЕГПУ; T_{2y}, T_{1y} – постоянные времени ЕГПУ; p_n, p_c – давление насосной станции и на сливе; x_3 – перемещение золотника; h_n – величина положительного перекрытия; μ_3 – коэффициент расхода щели золотника; d_3 – диаметр золотника; k_n – коэффициент полноты использования периметра золотника; ρ – плотность рабочей жидкости; U – входное (управляющее) напряжение; k_{yc} – коэффициент усиления ЕБ; L_y – индуктивность обмотки управления; R_3 – активное сопротивление электрической цепи.

На основе исследования характеристик рабочих процессов разработана типовая математическая модель оборудования с ЭГП с дроссельным регулированием как объекта автоматического управления. Структурная схема математической модели показана на рис. 2, где введены следующие

параметры: T_y – постоянная времени управляющей части привода; T_u – механическая постоянная времени гидроцилиндра; ζ_m – коэффициент относительного демпфирования гидроцилиндра; k_{QU} – коэффициент передачи управляющей части привода; k_{vQ} – коэффициент передачи для скорости по расходу; k_{vR} – коэффициент передачи для скорости по нагрузке.

В расчетной схеме ЭГП с объемным регулированием (рис. 2) обозначены: Ω_n – угловая скорость вала насоса; γ – угол наклона шайбы (блока цилиндров) аксиально-поршневого насоса; Ω – угловая скорость вала гидромотора; α – угол поворота вала гидромотора; Q_n , Q_m – идеальные расходы насоса и гидромотора; Q_{nn} , Q_{nm} – расходы перетечек в насосе и в гидромоторе; Q_{yn1} , Q_{yn2} , Q_{ym1} , Q_{ym2} – расходы утечек в линиях насоса и гидромотора; Q_{nn1} , Q_{nn2} – расходы подпитки через подпиточные клапаны; p_1 , p_2 – давления в трубопроводах высокого и низкого давлений; p_{nn} – давление в магистрали перед подпиточным клапанами.

Уточненная математическая модель (без процесса регулирования рабочего объема насоса) включает следующие уравнения и зависимости [8, 9]:

$$Q_m + Q_{nn} + Q_{nm} + Q_{yn1} + Q_{ym1} + Q_{сж1} - Q_{nn1} - Q_n = 0; \quad (9)$$

$$Q_m + Q_{nn} + Q_{nm} - Q_{yn2} - Q_{ym2} - Q_{сж2} + Q_{nn2} - Q_n = 0 \quad (10)$$

$$Q_{nn} = Q_{nm} = Q_{nep}; \quad Q_{yn1} = Q_{ym1} = Q_{ym1}; \quad Q_{yn2} = Q_{ym2} = Q_{ym2}; \quad (11)$$

$$Q_m = \frac{q_m}{2\pi} \Omega = \frac{q_m}{2\pi} \frac{d\alpha}{dt}; \quad Q_n = \frac{q_n}{2\pi} \Omega_n; \\ q_n = F_n z_n D_n \operatorname{tg} \gamma; \quad (12)$$

$$Q_{nep} = k_{nep} (p_1 - p_2); \quad Q_{ym1} = k_{ym} p_1; \\ Q_{ym2} = k_{ym} p_2; \quad (13)$$

$$Q_{сж1} = \frac{W_0}{E_{сж}} \frac{dp_1}{dt}; \quad Q_{сж2} = \frac{W_0}{E_{сж}} \frac{dp_2}{dt}; \quad (14)$$

$$M_M - M_{mp} - M_{noz} - M = J \frac{d\Omega}{dt}; \quad \Omega = \frac{d\alpha}{dt}; \quad (15)$$

$$M_M = \frac{q_M}{2\pi} (p_1 - p_2) p_M; \quad M_{noz} = k_{noz} \alpha; \\ M_{mp} = k_{mp} \frac{d\alpha}{dt}; \quad (16)$$

где $Q_{сж1}$, $Q_{сж2}$ – составляющие расхода, которые связаны с компенсацией сжимаемости жидкости (расходы сжатия); $k_{кл}$ – проводимость подпиточного клапана; q_m – рабочий объем гидромотора; q_n – рабочий объем насоса; F_n – рабочая площадь одного поршня (плунжера) насоса; z_n – число поршней; D_n – диаметр окружности, на которой расположены оси

поршней насоса; k_{nep} – проводимость щелей, по которым в насосе и гидромоторе происходит перетекание жидкости из полостей с высоким давлением в полости с низким давлением; k_{ym} – проводимость щелей, по которым происходит утечка жидкости из насоса и гидромотора; J – момент инерции вращающихся с валом гидромотора частей (приведенный момент инерции нагрузки и ротора мотора); W_0 – внутренний объем трубопроводов с подключенными к нему объемами полостей насоса и гидромотора; M_{mp} – момент от сил трения; M_{noz} – момент от действия позиционной нагрузки; M – момент нагрузки; M_M – крутящий момент; k_{noz} – коэффициент жесткости позиционной нагрузки; $k_{mp} = k_{mp1} + k_{mp2}$; k_{mp1} – коэффициент момента от сил трения в гидромоторе; k_{mp2} – коэффициент момента от сил трения в нагрузке.

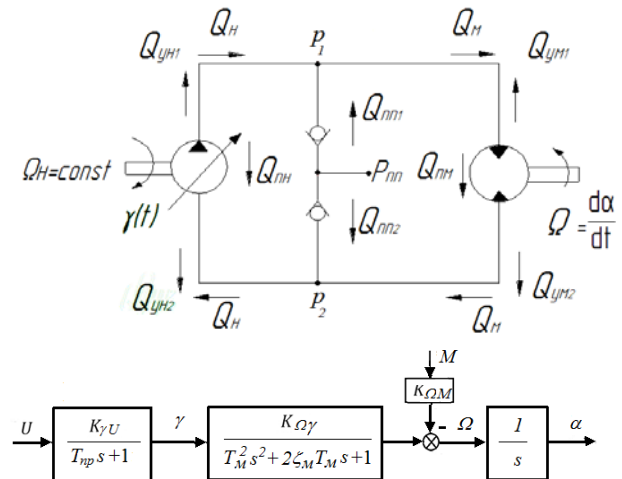


Рис. 2. Расчетная схема ЭГП с объемным регулированием и структурная схема его математической модели как объекта автоматического управления

На основе исследования характеристик рабочих процессов разработана типовая математическая модель машиностроительного оборудования с ЭГП с объемным регулированием как объекта автоматического управления. Структурная схема математической модели показана на рис. 2, где введены следующие параметры: T_{np} – постоянная времени процесса регулирования рабочего объема насоса; T_M – постоянная времени гидромотора; ζ_M – коэффициент относительного демпфирования гидромотора; k_{yU} – коэффициент передачи для угла наклона шайбы (блока цилиндров) по управляющему напряжению; $k_{Q\gamma}$ – коэффициент передачи силовой части привода; k_{QM} – коэффициент передачи для угловой скорости вращения по нагружающему моменту.

Анализ структурных схем математических моделей ЭГП с дроссельным и объемным способами регулирования (рис. 1, 2) позволил предложить и положить в основу дальнейших исследований единую типовую математическую модель ЭГП

машиностроительного оборудования как объекта автоматического управления. Структурная схема математической модели показана на рис. 3, где обозначены: u – входной сигнал; y – выходная переменная; k_0 , T_0 – коэффициент передачи и постоянная времени блока регулирования привода; k , T_1 , T_2 – коэффициент передачи и постоянные времени объекта; $V_0(t)$ – стохастическое возбуждающее действие (шум объекта).

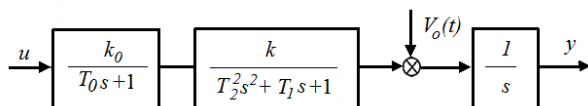


Рис. 3. Структурная схема типовой математической модели

Единая типовая математическая модель стала основой для разработки САУ машиностроительным оборудованием с ЭГП, которая учитывает стохастическое возбуждение объекта и шум наблюдения.

В пространстве состояний уравнения объекта управления были представлены в матричной форме

$$\dot{x} = Ax + Bu + V_0(t), \quad (17)$$

$$y = Cx + V_n(t), \quad (18)$$

де x – фазовый вектор переменных состояния объекта автоматического управления; u – управляющее воздействие; y – выходная переменная; A – матрица параметров объекта управления; B – матрица входных параметров; C – матрица выходных параметров; $V_0(t)$ – «цветной шум» объекта, $V_n(t)$ – шум наблюдения;

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

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

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

Для формирования «цветного шума» объекта рассмотрен формирующий фильтр с передаточной функцией

$$W_\phi(s) = \frac{b_0^* s + b_1^*}{a_0^* s^2 + a_1^* s + a_2^*}, \quad (19)$$

на вход которого подавался стационарный стохастический сигнал $V(t)$ типа «белый шум» со спектральной плотностью $S_V(\omega) = L_V$.

Критерий оптимальности управления рассматривался в виде

$$J = \int_0^{t_f} (\tilde{Q}x^2(t) + \tilde{R}u^2(t))dt \rightarrow \min, \quad (20)$$

де $\tilde{Q}$ – положительно-определенная матрица, характеризующая качество управления; $\tilde{R}$ – величина ограничения управляющего воздействия.

В связи с тем, что стохастическое возмущающее действие, приложенное к объекту управления, проявляет себя независимо от управляющего сигнала, синтез САУ машиностроительным оборудованием с ЭГП выполнен с учетом аддитивной помехи. Таким образом, решение задачи стохастической линейной 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 [10].

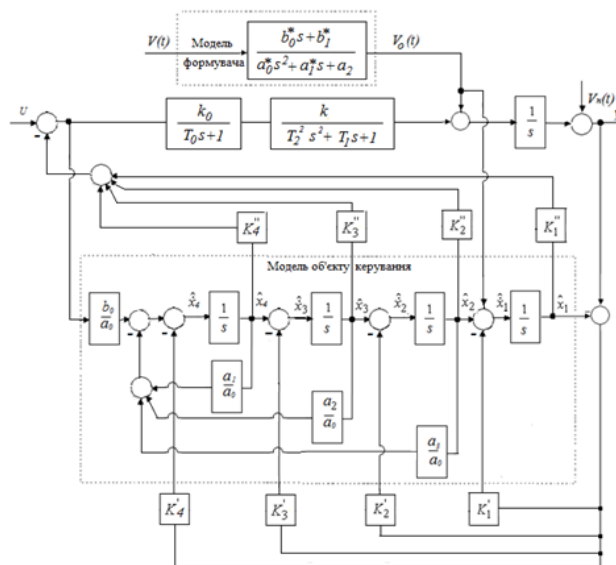


Рис. 4. Структурная схема САУ

Для синтеза оптимального линейного регулятора в соответствии с поставленной задачей использован метод динамического программирования. Функциональное уравнение Беллмана рассматривалось в виде

$$\tilde{Q}x^2 + \tilde{R}u^2 + \frac{\partial S}{\partial x}(A'x + B'u) + \frac{\partial S}{\partial t} = 0. \quad (23)$$

$$2\tilde{R}u + \frac{\partial S}{\partial x}B' = 0. \quad (24)$$

Из уравнения (18) принято выражение для оптимального управления

$$u = -\frac{1}{2} \tilde{R}^{-1} B' \frac{\partial S}{\partial x}. \quad (25)$$

С учетом положительной определенности функции Беллмана для оптимального управления машиностроительным оборудованием с ЭГП получено

$$u = -(K_1'' x_1 + K_2'' x_2 + K_3'' x_3 + K_4'' x_4) \quad (26)$$

где x_1, x_2, x_3, x_4 - фазовые переменные; $K_1'', K_2'', K_3'', K_4''$ - коэффициенты усиления обратной связи.

Структурная схема оптимальной САУ приведена на рис. 4. Отметим, что на схеме обозначены коэффициенты фильтра Калмана-Бьюси - K_1', K_2', K_3', K_4' .

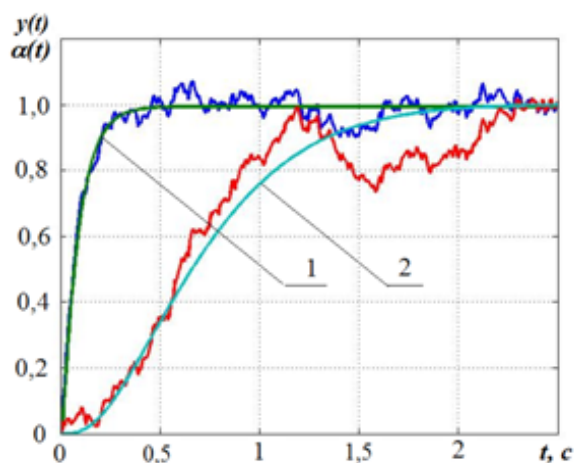


Рис. 5. Переходные процессы в стохастической замкнутой системе без использования и с использованием фильтра Калмана-Бьюси для привода с дроссельным (1) и объемным (2) регулированием

Переходные процессы в стохастической замкнутой САУ машиностроительным оборудованием с ЭГП без использования фильтра Калмана-Бьюси и с использованием фильтра при наличии возмущающего воздействия на объект управления в виде белого шума со спектральной плотностью $S_y(\omega)=1$ и $W_\phi(s)=0,025$ приведены на рис. 5. Исследования показали, что в диапазоне возможных параметров возмущения для приводов как с дроссельным (1), так и с объемным (2) регулированием, фильтр Калмана-Бьюси выполняет функцию оптимальной фильтрации, обеспечивает необходимое качество управления машиностроительным оборудованием и уменьшает длительность переходного процесса.

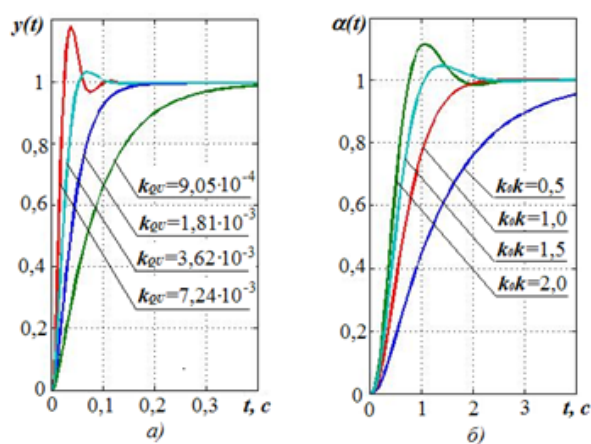


Рис. 6. Влияние на переходные процессы параметров объекта управления:

a – привод с дроссельным регулированием;
 b – привод с объемным регулированием

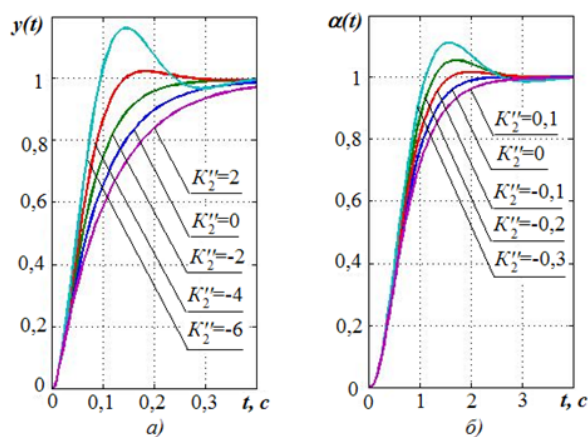


Рис. 7. Влияние на переходные процессы коэффициента K_2'' регулятора:

a – привод с дроссельным регулированием ($K_1''=108$);
 b – привод с объемным регулированием ($K_1''=1,35$)

Выполнено исследование САУ, в частности, влияние параметров объекта управления и оптимального регулятора на качество переходного процесса. На рис. 6 приведены переходные процессы в системе для привода с дроссельным регулированием (а) при разных значениях коэффициента передачи k_{qv} ($m^3/(c \cdot B)$) и привода с объемным регулированием (б) при разных значениях безразмерного коэффициента передачи прямого пути $k_0 k$. На рис. 7 показаны переходные процессы при разных коэффициентах передачи K_2'' регулятора для привода с дроссельным регулированием (а) при $K_1''=108$ и привода с объемным регулированием (б) при $K_1''=1,35$.

Выводы.

Таким образом, предложена типовая математическая модель ЭГП машиностроительного оборудования как объекта автоматического управления и разработана САУ оборудованием, учитывающая стохастическое возмущение и шум наблюдения. Выполнен анализ качества регулирования САУ.

Л и т е р а т у р а

1. Навроцкий К.Л. Теория и проектирование гидро- и пневмоприводов. [Текст] – М.: Машиностроение, 1991. – 384 с.
2. Гидроприводы и гидропневмоавтоматика станков [Текст] / В.А. Федорец, М.Н. Педченко, А.Ф. Пичко, Ю.В. Пересадко, В.С. Лысенко; Под ред. В.А. Федорца. – К.: Вища шк., 1987. – 375 с.
3. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. [Текст] – М.: Машиностроение, 1987. – 464 с.
4. Соколова Я.В. Совершенствование электрогидравлических приводов машиностроительного оборудования [Текст]: монография / Я.В. Соколова, Н.Г. Азаренко, Д.С. Грешной. – Луганск: ВНУ им. В. Даля. – 2014. – 100 с.
5. Попов Д.Н. Нестационарные гидромеханические процессы. [Текст] – М.: Машиностроение, 1982. – 240 с.
6. Соколова Я.В. Моделирование автоматических электрогидравлических приводов специального технологического оборудования [Текст]: монография / Я.В. Соколова, Т.Я. Таванюк. – Донецк: Ноулидж. – 2013. – 52 с.
7. Соколова Я.В. Нелинейная математическая модель электрогидравлического следящего привода с дроссельным регулированием [Текст] / Я.В. Соколова, Т.Я. Таванюк, В.И. Соколов // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. - 2010. - № 10 (152). - С. 168 – 175.
8. Sokolov V. Simulation of the power unit of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation [Text] / V. Sokolov, N. Azarenko, Ya. Sokolova // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 12. – N 4. – 2012. - Lublin, Poland. - pp. 268 - 273.
9. Соколов В.И. Моделирование силовой части автоматического электрогидравлического привода с объемным регулированием [Текст] / В.И. Соколов, Н.Г. Азаренко, Я.В. Соколова // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. – 2012. - № 12 (183). - Ч.1. – С. 260 - 270.
10. Ким Д.П. Теория автоматического управления. [Текст] Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: учебное пособие. – М.: Физматлит, 2004. – 464 с.

R e f e r e n c e s

1. Navrotskyi K.L. Teoryia y proektyrovanye hydro- y pnevmopryvodov. [Tekst] – M.: Mashynostroenye, 1991. – 384 s.
2. Hydropnyvodu y hydropnevmoaavtomatyka stankov [Tekst] / V.A. Fedorets, M.N. Pedchenko, A.F. Pychko, Yu.V. Peresadko, V.S. Lusenko; Pod red. V.A. Fedortsa. – K.: Vyshcha shk., 1987. – 375 s.

3. Popov D.N. Dynamyka y rehulyrovanye hydro- y pnevmosystem. [Tekst] – M.: Mashynostroenye, 1987. – 464 s.
4. Sokolova Ya.V. Sovershenstvovanye elektrohydraulicheskyykh pryvodov mashynostroytelnoho oborudovanyia [Tekst]: monohrafyia / Ya.V. Sokolova, N.H. Azarenko, D.S. Hreshnoi. – Luhansk: VNU ym. V. Dalia. – 2014. – 100 s.
5. Popov D.N. Nestatsyonarnue hydromekhanicheskye protsessy. [Tekst] – M.: Mashynostroenye, 1982. – 240 s.
6. Sokolova Ya.V. Modelyrovanye avtomaticheskyykh elektrohydraulicheskyykh pryvodov spetsyalnoho tekhnolohycheskoho oborudovanyia [Tekst]: monohrafyia / Ya.V. Sokolova, T.Ya. Tavaniuk. – Donetsk: Noulydzh. – 2013. – 52 s.
7. Sokolova Ya. V. Nelyneinaia matematicheskaiia model elektrohydraulicheskoho slediashcheho pryvoda s drosselnum rehulyrovanyem [Tekst] / Ya.V. Sokolova, T.Ya. Tavaniuk, V.Y. Sokolov // Visn. Skhidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dalia. - 2010. - # 10 (152). - S. 168 – 175.
8. Sokolov V. Simulation of the power unit of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation [Text] / V. Sokolov, N. Azarenko, Ya. Sokolova // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 12. – N 4. – 2012. - Lublin, Poland. - pp. 268 - 273.
9. Sokolov V.Y. Modelyrovanye sylovoi chasty avtomaticheskoho elektrohydraulicheskoho pryvoda s obuemnym rehulyrovanyem [Tekst] / V.Y. Sokolov, N.H. Azarenko, Ya.V. Sokolova // Visn. Skhidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dalia. – 2012. - # 12 (183). - Ch.1. – S. 260 - 270.

Соколова Я.В. Система автоматического управления машинобудівного устаткування з електрогидравлічним приводом.

Запропоновано типову математичну модель машинобудівного обладнання з електрогидравлічним приводом обладнання як об'єкту автоматичного управління. Розроблено систему автоматичного управління обладнанням, що враховує стохастичне обурення й шум спостереження. Виконано аналіз якості регулювання системи автоматичного управління.

Ключові слова: машинобудівне обладнання, електрогидравлічний привід, насос, гідродвигун, математична модель, динамічні характеристики, система автоматичного управління

Sokolova Ya.V. Automatic control system engineering equipment Electro-hydraulic

A mathematical model of a typical building equipment with electro-hydraulic automatic control equipment as the object. A system of automatic control equipment, taking into account the stochastic disturbance and noise monitoring. The analysis of the quality of the automatic control system of regulation.

Keywords: engineering equipment, electro-hydraulic pump, hydraulic motor, mathematical model, dynamic performance, automatic control system

Соколова Яна Володимирівна – к.т.н., доц., докторант кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк)
ya.v.sokolova@inbox.ru

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

УДК 621.646-62-82:519.87

МОДЕЛЮВАННЯ ПРИВОДУ СПЕЦІАЛЬНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Таванюк Т.Я.

MATHEMATICAL MODELING OF SERVO DRIVES

Tavanyuk T.Ya.

Представлена типова нелінійна математична модель слідуючого привода с дросельним регулюванням. Математична модель адаптована на приводи спеціального технологічного обладнання, що побудовані на основі стандартних модулів, з використанням паспортних даних пристроїв приводу для оцінки динамічних характеристик.

Ключові слова: слідкуючий привод, електрогідравлічний підсилювач, математична модель, динамічні характеристики.

Вступ. Сучасне спеціальне технологічне обладнання, а саме обладнання для механічної обробки матеріалів висуває високі вимоги до показників приводів за точністю реалізації законів руху вихідної ланки, що досягається за рахунок використання слідкуючого привода (СП).

1. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Важливим етапом в проектуванні ЕГСП є оцінка стійкості, якості регулювання та корекція динамічних властивостей привода. Виконання даного етапу пов'язано з розробкою математичної моделі нестационарних електрогідромеханічних процесів, що протікають в приводі. Математичні моделі динамічних процесів, представлені в літературі [1–4], не можуть бути узагальнені на весь клас даних ЕГСП. Ряд з них орієнтовано на певні конструкції пристроїв приводу, особливо ЕГУ (здебільшого автори розглядають двокаскадні ЕГУ типу сопло-заслінка-золотник з пружинним підпором золотника). У своїй більшості моделі вимагають визначення параметрів, які не можуть бути оцінені з паспортних даних стандартних пристроїв або виявлені на стадії попереднього проектування. Зручні лінійні моделі, що розглядаються, допускають ряд істотних спрощень (апроксимація витратно-перепадних характеристик, виключення зон насичення та нечутливості та ін.). У

зв'язку з цим виникає потреба мати універсальну модель СП. Так як проектування приводів найчастіше здійснюється на базі стандартних модулів [5–7], дана модель повинна гранично відображати характеристики елементів та динамічних процесів для мінімального набору параметрів, що містяться в технічних даних номенклатури пристроїв.

Приклад слідкуючого привода з дросельним регулюванням представлений на рис. 1.

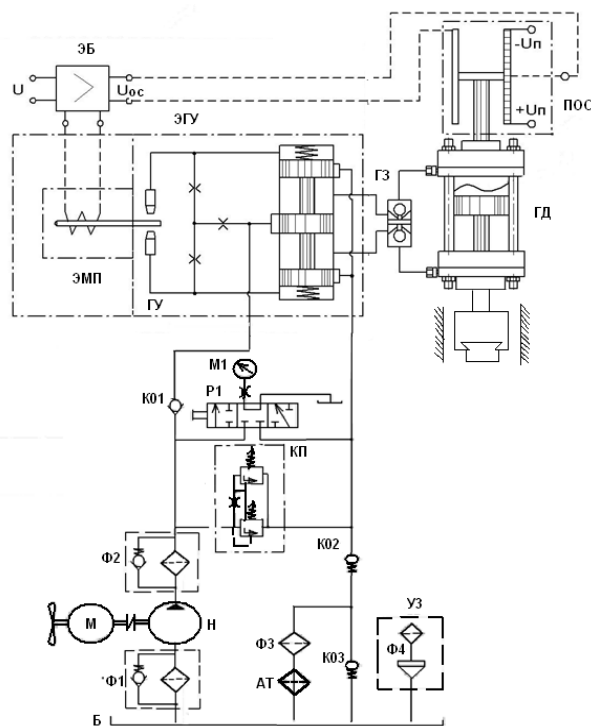


Рис. 1. Принципова схема СП: ЕБ – електричний блок; ЕМП – електромеханічний перетворювач; ГУ – гідропідсилювач; ЕГУ – електрогідравлічний підсилювач; ГД – гідродвигун

Метою роботи є розробка типової нелінійної математичної моделі електрогідравлічного слідуючого приводу з дросельним регулюванням, що адаптована на приводи спеціального технологічного обладнання, які побудовано на основі стандартних модулів, з використанням для оцінки динамічних характеристик паспортних даних пристроїв приводу.

3. Матеріали и результати дослідження.

Виділимо основні елементи ЕГСП: ГД, ЕГУ, ДОС, ЕБ. Надалі розглядаємо розрахункову схему приводу, що наведено на рис. 2, а.

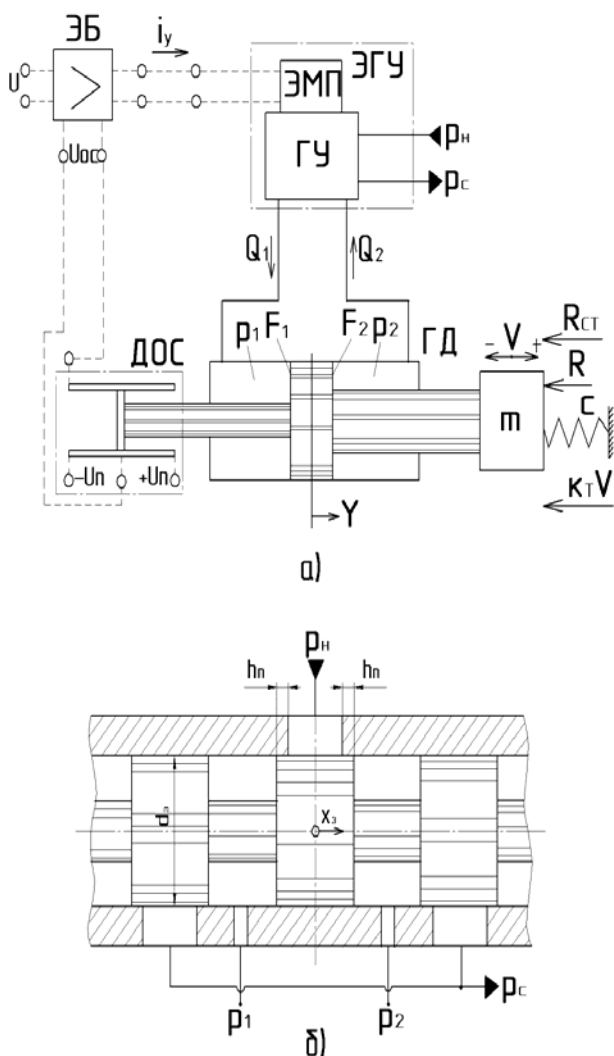


Рис. 2. Розрахункова схема ЕГСП (а) та розрахункова схема вихідного каскаду ЕГУ (б)

Для ГД поступальної дії загальноприйнята динамічна модель [1] яка наведена системою з рівнянь руху поршня і рівнянь балансу витрат в порожнинах гідроциліндра з урахуванням стисливості робочої рідини:

$$\left\{ \begin{aligned} m \frac{dV}{dt} &= p_1 F_1 - p_2 F_2 - cY - k_T V - \\ &- R_{CT} \text{sign} V - R; \\ \frac{dY}{dt} &= V, -H/2 \leq Y \leq H/2; \\ \frac{W_{HO} + F_1(H/2 + Y)}{E_J} \frac{dp_1}{dp_1} &= Q_1 - F_1 V; \\ \frac{W_{HO} + F_2(H/2 - Y)}{E_J} \frac{dp_2}{dp_1} &= -Q_2 + F_2 V. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

В рівняннях:

Y, V – переміщення та швидкість поршня (зазвичай переміщення поршня розраховують від його середнього положення.);

p_1, p_2 – тиск в порожнинах гідроциліндра;

m – наведена вага рухомих частин;

F_1, F_2 – ефективні площі;

c – жорсткість позиційного навантаження;

k_T – коефіцієнт сили в'язкого тертя;

R_{CT} – сила сухого тертя;

R – навантаження;

H – хід поршня;

E_J – модуль пружності робочої рідини;

W_{HO}, W_{CO} – «мертві» об'єми напірної та зливної магістралей.

ДОС прийнято описувати лінійною безінерційною ланкою, що зв'язує напругу зворотного зв'язку U_{OC} з переміщенням Y :

$$U_{OC} = k_{OC} Y, \quad (2)$$

де k_{OC} – коефіцієнт передачі ДОС.

ЕГУ в номенклатурі гідроапаратури що випускається серійно представлені, як дроселюючи гідророзподільники і розподільники з пропорційним управлінням [6]. У вихідному каскаді посилення ЕГУ зазвичай використовується золотниковий гідропідсилювач, розрахункова схема якого приведена на рис. 2, б. Пропонується пов'язувати зміщення золотника від нейтрального положення x_3 зі струмом в обмотці управління I_y лінійною динамічною ланкою другого порядку:

$$T_{2y}^2 \frac{d^2 x_3}{dt^2} + T_{1y} \frac{dx_3}{dt} + x_3 = k_{xi} i_y, \quad (3)$$

де k_{xi} – коефіцієнт передачі ЕГУ.

Постійні часу T_{2y}, T_{1y} відомим чином [8] знаходяться за частотами ν_1, ν_2 :

$$T_{2y} = \frac{1}{2\pi\nu_2}; T_{1y} = \frac{1}{2\pi\nu_1} - \frac{2\pi\nu_1}{(2\pi\nu_2)^2}. \quad (4)$$

Золотник має обмеження за переміщенням, що відображається рівнянням $|x_3| \leq x_{\max}$, де $x_{\max}$ – максимальне переміщення золотника від нейтрального положення.

Рівняння витрат в лініях ЕГУ, що зв'язують його з ГД, з урахуванням позитивного перекриття пасками золотника вікон в розподільчий втулці мають вигляд:

$$Q_1 = \begin{cases} \mu_3 \pi d_3 k_n (x_3 - h_n) \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_n - p_1|}^* \\ \text{sign}(p_n - p_1), x_3 > h_n; \\ 0, |x_3| \leq h_n; \\ \mu_3 \pi d_3 k_n (x_3 + h_n) \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_1 - p_c|}^* \\ \text{sign}(p_1 - p_c), x_3 < -h_n; \end{cases} \quad (5)$$

$$Q_2 = \begin{cases} \mu_3 \pi d_3 k_n (x_3 - h_n) \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_2 - p_c|}^* \\ \text{sign}(p_2 - p_c), x_3 > h_n; \\ 0, |x_3| \leq h_n; \\ \mu_3 \pi d_3 k_n (x_3 + h_n) \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_H - p_2|}^* \\ \text{sign}(p_H - p_2), x_3 < -h_n; \end{cases} \quad (6)$$

де p_H, p_C – тиск насосної станції і на злив;
 h_n – величина позитивного перекриття;
 μ_3 – коефіцієнт витрати щілини золотника;
 d_3 – діаметр золотника;
 k_n – коефіцієнт повноти використання периметра золотника;
 ρ – щільність робочої рідини.

ЕБ на стадії попереднього проектування ЕГСП розглядається як ідеальний підсилювач:

$$U_{yc} = k_{yc}(U - U_{oc}), \quad (7)$$

де U – вхідне (управляюче) напруження;
 U_{yc} – напруження на виході ЕБ;
 k_{yc} – коефіцієнт посилення ЕБ.

Вихідний каскад ЕБ з'єднано з управляючою обмоткою ЕГУ і утворює з нею єдиний електричний ланцюг, що містить як активний, так і індуктивний опір. Тому, без урахування протидії ЕРС, маємо наступне диференціальне рівняння:

$$L_y \frac{di_y}{dt} + R_3 i_y = U_{yc}, \quad (8)$$

де L_y – індуктивність обмотки управління;
 R_3 – активний опір електричного ланцюга.

Також, ЕБ обмежує струм в електричному ланцюзі максимальним значенням $i_{\max}$ для керуючої обмотки ЕГУ:

$$|i_y| \leq i_{\max}. \quad (9)$$

Для скорочення числа вихідних параметрів, спрощення математичної моделі і зручності аналізу

результатів представимо рівняння в безрозмірній формі. З цією метою введемо безрозмірні змінні:

$$\begin{cases} \bar{U} = U / U^*; \bar{U}_{yc} = U_{yc} / U^*; \bar{U}_{oc} = U_{oc} / U^*; \\ \bar{i} = i_y / i^*; \bar{x} = x_3 / x^*; \\ \bar{Q}_1 = Q_1 / Q^*; \bar{Q}_2 = Q_2 / Q^*; \\ \bar{p}_1 = p_1 / p^*; \bar{p}_2 = p_2 / p^*; \bar{R} = R / R^*; \\ \bar{Y} = Y / Y^*; \bar{V} = V / V^*; \end{cases} \quad (10)$$

де масштаби змінних визначенні наступним чином:

$$\begin{cases} U^* = k_{oc} H / 2; i^* = i_{\max}; x^* = x_{\max}; \\ Q^* = \mu_3 \pi d_3 k_n x^* \sqrt{\frac{p_H}{\rho}}; p^* = p_H; \\ Y^* = H / 2; V^* = Q^* / F_1; R^* = p_H F_1. \end{cases} \quad (11)$$

Вважаючи лінійною статистичну характеристику ЕГУ $x_3(i_y)$, можливо припустити, що $k_{xi} = x_{\max} / i_{\max}$. Тоді для безрозмірних змінних (10) з урахуванням (11) маємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} \bar{U}_{oc} = k_{oc}^2 \bar{Y}; \\ \bar{U}_{yc} = k_{yc} (\bar{U} - \bar{U}_{oc}); \\ T_0 \frac{d\bar{i}}{dt} + \bar{i} = k_o \bar{U}_{yc}; \\ |\bar{i}| \leq 1; \\ T_{2y}^2 \frac{d^2 \bar{x}}{dt^2} + T_{1y} \frac{d\bar{x}}{dt} + \bar{x} = \bar{i}; |\bar{x}| \leq 1; \\ |\bar{x}| \leq 1; \\ \bar{Q}_1 = \begin{cases} (\bar{x} - \bar{h}) \sqrt{2 |1 - \bar{p}_1|}^* \\ * \text{sign} (1 - \bar{p}_1), \bar{x} > \bar{h}; \\ 0, |\bar{x}| \leq \bar{h}; \\ (\bar{x} + \bar{h}) \sqrt{2 |\bar{p}_2 - \bar{p}_c|}^* \\ * \text{sign} (\bar{p}_2 - \bar{p}_c), \bar{x} < -\bar{h}; \end{cases} \\ \bar{Q}_2 = \begin{cases} (\bar{x} - \bar{h}) \sqrt{2 |\bar{p}_2 - \bar{p}_c|}^* \\ * \text{sign} (\bar{p}_2 - \bar{p}_c), \bar{x} > \bar{h}; \\ 0, |\bar{x}| \leq \bar{h}; \\ (\bar{x} + \bar{h}) \sqrt{2 |1 - \bar{p}_2|}^* \\ * \text{sign} (1 - \bar{p}_2), \bar{x} < -\bar{h}; \end{cases} \\ T_1 \frac{d\bar{p}_1}{dt} = \frac{1}{1 + \bar{W}_{HO} + \bar{Y}} (\bar{Q}_1 - \bar{V}); \\ T_2 \frac{d\bar{p}_2}{dt} = \frac{1}{1 + \bar{W}_{CO} - \bar{Y}} (-\bar{Q}_2 + k_1 \bar{V}); \\ T_3 \frac{d\bar{V}}{dt} = \bar{p}_1 - k_1 \bar{p}_2 - k_2 \bar{Y} - k_3 \bar{V} - k_4 \text{sign} (\bar{V}) - \bar{R}; \\ T_4 \frac{d\bar{Y}}{dt} = \bar{V}; \\ |\bar{Y}| \leq 1. \end{cases} \quad (12)$$

Тут постійні часу та безрозмірні параметри:

$$\left\{ \begin{aligned} T_0 &= \frac{L_y}{R_3}; T_1 = \frac{F_1 H p_H}{2 E_{ж} Q^*}; T_2 = \frac{F_2 H p_H}{2 E_{ж} Q^*}; \\ T_3 &= \frac{m V^*}{p_H F_1}; T_4 = \frac{H}{2 V^*}; \\ k_0 &= \frac{k_{OC} H}{2 i_{max} R_3}; k_1 = \frac{F_2}{F_1}; k_2 = \frac{c H}{2 p_H F_1}; \\ k_3 &= \frac{k_T V^*}{p_H F_1}; k_4 = \frac{R_{CT}}{p_H F_1}; \\ \bar{h} &= \frac{h_{II}}{x_{max}}; \bar{p}_C = \frac{p_C}{p_H}; \bar{W}_{HO} = \frac{2 W_{HO}}{F_1 H}; \\ \bar{W}_{CO} &= \frac{2 W_{CO}}{F_2 H}. \end{aligned} \right. \quad (13)$$

Для чисельного моделювання по системі (12) відзначимо рекомендації за завданням вихідних параметрів. На стадії попереднього проектування були обрані вузли ЕГСП які випускаються серійно. На даній стадії відомі, або оцінені, такі параметри, як коефіцієнт підсилення ЕБ k_{yc} ; хід поршня H ; приведена маса рухомих частин m ; тиски насосної станції p_H і на злив p_C ; модуль пружності робочої рідини $E_{ж}$; «мертві» обсяги напірної W_{HO} і зливної W_{CO} магістралей; жорсткість позиційного навантаження c . За технічними даними гідроциліндра визначаються значення ефективних площ F_1, F_2 ; коефіцієнт сили в'язкого тертя k_T , сила сухого тертя R_{CT} . Коефіцієнт передачі k_{OC} оцінюється за технічними даними ДЗЗ. За технічними характеристикам ЕГУ встановлюються індуктивність обмотки управління L_y ; постійні часу T_{1y}, T_{2y} (4); активний опір електричного ланцюга R_e (опір обмотки управління ЕГУ з урахуванням опору вихідного каскаду ЕБ); максимальний струм i_{max} (або приймається рівним номінальному току $I_{ном}$ за паспортними даними). Значення масштабу витрат Q^* слід оцінювати по номінальній витраті ЕГУ $Q_{ном}$, який вказується в паспортних даних для номінального перепаду тисків в каналах харчування і зливу ЕГУ.

Оскільки згідно (11):

$$Q^* = \mu_3 \pi d_3 k_{II} x_{max} \sqrt{\frac{p_H}{\rho}}, \quad (14)$$

а номінальна витрата є:

$$Q_{ном} = \mu_3 \pi d_3 k_{II} (x_{max} - h_n) \sqrt{\frac{\Delta p_{ном}}{\rho}}, \quad (15)$$

цьому:

$$Q^* = Q_{ном} \sqrt{\frac{p_H}{\Delta p_{ном}}} \frac{1}{1-h} \quad (16)$$

Величину безрозмірного перекриття допустимо взяти рівної відносному току зони нечутливості (в серійному виробництві ЕГУ не більше 0,02). Масштаб швидкості V^* розраховується по Q^* згідно (11). Необхідні для підстановки в систему (12) додаткові параметри визначаються за виразами (13).

Також, для чисельного моделювання необхідна підстановка граничних умов для вхідної напруги U і навантаження R , вигляд яких визначається характером досліджуваного процесу. Граничні умови підставляються в безрозмірному вигляді згідно (11) з масштабами змінних (12).

За необхідності результати моделювання за виразами (11, 12) можна представити в розмірному вигляді (за винятком переміщення золотника, оскільки максимальне переміщення x_{max} введено умовно для спрощення математичної моделі).

У порівнянні з відомими нелінійними моделями ЕГСП [1, 7, 8], які враховують основні фактори, що обумовлюють нестационарні процеси (стисливість робочої рідини, інерційність вихідної ланки, індуктивність електричного ланцюга, динамічні властивості ЕГУ), представлена модель має мінімальний набір вихідних параметрів і є універсальною для приводів, побудованих за типовою схемою (рис. 2, б). Разом з тим, облік основних нелінійностей дає помітний виграв в точності розрахунку в порівнянні з лінійними моделями. Це показали результати чисельного моделювання перехідних процесів при різних рівнях вхідного сигналу, представлені на рис. 3 та рис. 4. Як видно, від величини стрибка керуючої напруги залежить не тільки тривалість процесу, а й його якість.

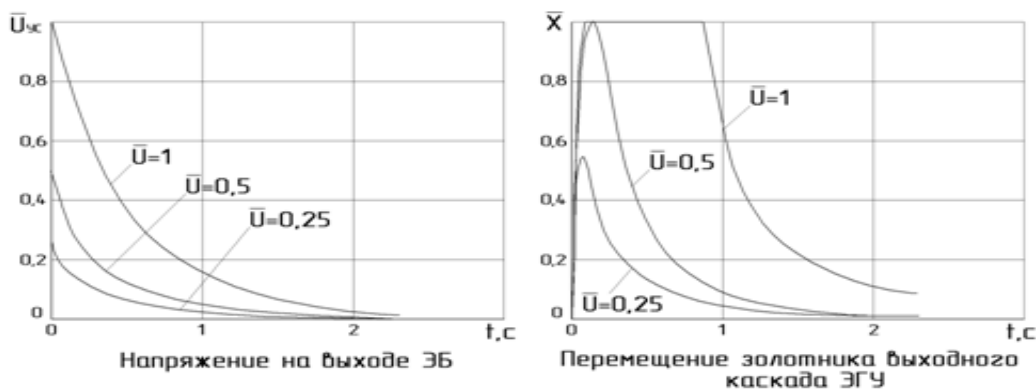


Рис. 3. Результати чисельного моделювання динамічних процесів в ЕГСП

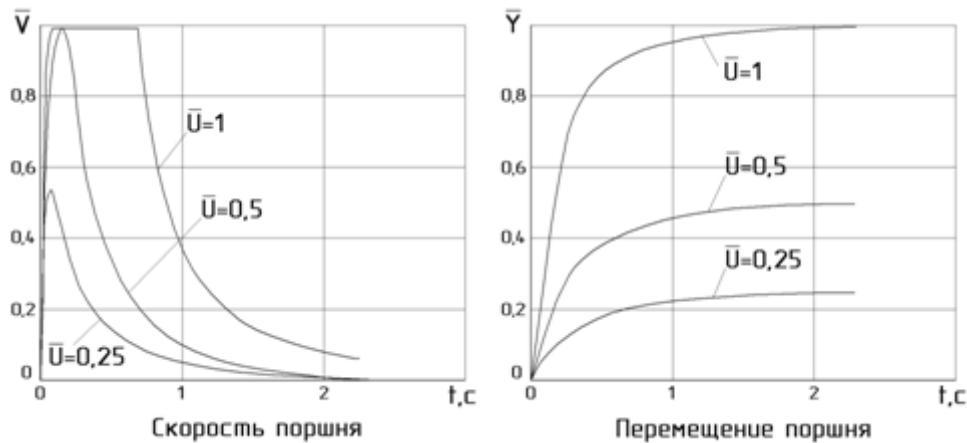


Рис. 4. Результати чисельного моделювання динамічних процесів в ЕГСП

Чисельне інтегрування системи (12) проведено методом Рунге-Кутта 4-го порядку в середовищі пакету прикладних програм «MATLAB» (програми «SLPR») для наступних вихідних даних: навантаження $R = 6000$ Н; ефективні площі гідроциліндра $F_1 = 0,00377$ м², $F_2 = 0,0045$ м² (діаметр поршня 80 мм, діаметри штоків 40 і 25 мм); хід поршня $H = 250$ мм; тиск насосної станції $p_n = 6,3 \cdot 10^5$ Па; тиск на злив $p_c = 0$; модуль пружності робочої рідини $E_j = 10^9$ Па; «мертві» обсяги напірної і зливної магістралей $W_{HO} = W_{CO} = 0,002$ м³; сила сухого тертя $R_{ст} = 0$; жорсткість позиційної навантаження $c = 0$; коефіцієнт сили в'язкого тертя $k_T = 1000$ кг/с; наведена маса рухомих частин $m = 200$ кг; коефіцієнт передачі ДОС $k_{oc} = 216$ В/м; номінальна витрата ЕГУ $Q_{ном} = 0,00063$ м³/с; номінальний перепад тисків на ЕГУ $\Delta p = 7 \cdot 10^6$ Па; постійні часу ЕГУ $T_{1y} = 0,0215$ с, $T_{2y} = 0,0053$ с (що відповідає зрушенню по фазі на -45° і 90° при частотах $\nu_1 = 45$ Гц і $\nu_1 = 90$ Гц); величина

безрозмірного перекриття $= 0,01$; індуктивність обмотки управління $L_y = 0,2$ Гн; активний опір електричного кола $R_c = 100$ Ом; номінальний струм $I_{ном} = 0,01$ А; коефіцієнт підсилення ЕБ $k_{yc} = 0,09$; масштаб витрат $Q^* = 0,0006$ м³/с.

Висновки. Таким чином, запропоновано типову нелінійну математичну модель електрогідравлічного слідкуючого привода з дросельним регулюванням. Математична модель адаптована на приводи спеціального технологічного обладнання, що побудовано на основі стандартних модулів, і дозволяє здійснювати оцінку стійкості, якості регулювання і корекцію динамічних властивостей привода з використанням паспортних даних пристроїв, що входять до нього.

Література

1. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. – М.: Машиностроение, 1976. – 424 с.
2. Хохлов В.А. Электрогидравлический следящий привод. – М.: Наука, 1964.

3. Чупраков Ю.И. Электрогидравлические следящие приводы. – М.: МАДИ, 1977.-88 с.
4. Терских В.З. Сравнительный анализ динамических свойств дроссельных гидроприводов // Изд. вузов. Машиностроение, 1976. №7. – 59 – 62 с.
5. Абрамов Е.И., Колесниченко К.А., Маслов В.Т. Элементы гидропривода: Справочник. – К.: «Техника», 1977. – 320 с.
6. Чупраков Ю.И. Электрогидравлические усилители. – М.: МАДИ, 1975. – 124 с.
7. Свешников В.К., Усов А.А. Станочные гидроприводы: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1988. – 512с.
8. Навроцкий К.Л. Теория и проектирование гидро- и пневмоприводов. – М.: Машиностроение, 1991. – 384 с.

References

1. Popov D.N. Dinamika i regulirovanie gidro- i pnevmosistem. - M.: Mashinostroenie, 1976.-424 s.
2. Hohlov V.A. JElektrogidravlicheskiy sledjashhij pri-vod. - M.: Nauka, 1964.
3. CHuprakov JU.I. JElektrogidravlicheskie sledjashhie privody. - M.: MADI, 1977.-88 s.
4. Terskih V.Z. Sravnitel'nyj analiz dinamicheskikh svojstv drossel'nyh gidroprivodov // Izd. vuzov. Mashinostroenie, 1976. №7.-59-62 s.
5. Abramov E.I., Kolesnichenko K.A., Maslov V.T. JElementy gidroprivoda: Spravochnik. - K.: «Tehni-ka», 1977.-320 s.
6. CHuprakov JU.I. JElektrogidravlicheskie usiliteli. - M.: MADI, 1975.-124 s.
7. Sveshnikov V.K., Usov A.A. Stanochnye gidroprivo-dy: Spravochnik. – 2-e izd., pererab. i dop. - M.: Ma-shinostroenie, 1988. – 512s.
8. Navrockij K.L. Teorija i proektirovanie gidro- i pnevmoprivodov. - M.: Mashinostroenie, 1991. – 384 s.

Таванюк Т.Я. Моделирование привода специального технологического оборудования

Представлена типичная нелинейная математическая модель следящего привода с дросельным регулированием. Математическая модель адаптирована на приводы специального технологического оборудования, построенные на основе стандартных

модулей, с использованием для оценки динамических характеристик паспортных данных устройств поводу.

Ключевые слова: следящий привод, электрогидравлический усилитель, математическая модель, динамические характеристики.

Tavanyuk T.Ya. Modeling drive special technological equipment

Consider a typical non-linear mathematical model of the servo with the throttle control, taking into account the non-stationary processes. The model has a minimum set of input parameters and is universal for drives, built on the template. However, taking into account the main nonlinearities gives a noticeable gain in calculation accuracy than linear models. This is confirmed by results of numerical modeling of transient processes at different levels of input

signala. Matematicheskaya model is adapted to control the special technological equipment based on standard modules are used to estimate the dynamic characteristics of the passport data of the drive.

Key words: servo drive, elektrogid ravlichesky-amplifier, a mathematical model, dynamic performance.

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

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

Стаття подана 03.09.2016

УДК 621.793

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КЛАССИФИКАТОР ДЕТАЛЕЙ И ПОВЕРХНОСТЕЙ С ГАЗОТЕРМИЧЕСКИМИ ПОКРЫТИЯМИ

Харламов Ю.А.

TECHNOLOGICAL CLASSIFICATION OF THERMAL SPRAYED PARTS AND SURFACES

Kharlamov Y.A.

В статье предложен технологический классификатор изделий машиностроения и их поверхностей с покрытиями, полученными методами газотермического напыления. Технологический классификатор состоит из трех частей: базовой, кодирующей основную информацию о напыляемом изделии; технологической, кодирующей основную информацию о детали и ее напыляемых поверхностях и технологической, кодирующей информацию о газотермическом покрытии. Показаны перспективы применения классификатора при разработке систем автоматизированного проектирования технологических процессов производства деталей с газотермическими покрытиями.

Ключевые слова: газотермическое напыление, кодирование, маршрутная технология, поверхность, покрытие.

Введение. Для обеспечения конкурентоспособности продукции машиностроения Украины необходимо осваивать технологии получения поверхностей деталей машин, стойких к износу, коррозии и старению, придание и сохранение ими трибологических, электрических, оптических, термических и иных функциональных свойств в течение длительного периода. Технологии поверхностной обработки и осаждения покрытий являются составляющими крупного научно-технического направления «инженерия поверхности» [1 – 5]. Среди большого разнообразия методов нанесения покрытий и модификации поверхности – химических, электрохимических (гальванических), химико-термических (цементация, азотирование, цианирование и т.д.), физических (лазерная и электроннолучевая порошковая наплавка) особое место занимают методы газотермического

напыления — газопламенный, электродуговой, плазменный, детонационный и др. Большой научный и практический интерес к этим методам обусловлен их широкими возможностями как по виду напыляемых веществ, созданию гомогенных и гетерогенных материалов покрытий, так и возможности обработки изделий различного типоразмера и геометрии [6 – 9]. Этим обусловлено проведение широкого фронта фундаментальных и прикладных исследований данных процессов [6, 9 – 11], а также разработка новых разновидностей процессов, вплоть до разработки принципиально новых, как холодное газодинамическое напыление [12 – 15].

Разработка громадного количества конструкторских и технологических решений в сфере производства и применения газотермических покрытий, а также успехи в совершенствовании и автоматизации соответствующих технологических операций способствовали резкому расширению рынка газотермического напыления, особенно в индустриально развитых странах, однако существенно затрудняют выбор и проектирование рациональных технологических процессов. Это увеличивает длительность технологической подготовки производства изделий с газотермическими покрытиями, а также ограничивает расширение областей и объемов их применения.

Целью работы является разработка системы классификации, кодирования и унификации конструктивных и технологических элементов деталей с газотермическими покрытиями, что является актуальной задачей при создании систем автоматизированного проектирования

технологических процессов получения газотермических покрытий и производства деталей с покрытиями.

Анализ последних исследований и публикаций. Процессы получения газотермических покрытий можно условно разделить на три этапа: 1. подготовка поверхности к напылению; 2. напыление покрытия; и 3. обработка напыленного покрытия. Этот подход и используется в известных публикациях по газотермическому напылению [16-20]. На первых стадиях развития и внедрения технологий получения газотермических покрытий преимущественное внимание уделяли совершенствованию и разработке новых отдельных технологических операций: подготовке поверхности, нанесению покрытия и его последующей при необходимости обработке [21-23]. В последние годы большое внимание уделяется моделированию, диагностике и мониторингу процессов газотермического напыления [10, 11, 24], а также совершенствованию конструкций покрытий. В известных работах не рассматриваются вопросы взаимосвязи технологии получения газотермических покрытий и общей маршрутной технологии производства изделий с покрытиями. Решение этой проблемы возможно на основе использования автоматизированных систем проектирования.

Материалы и результаты исследования. Автоматизация подготовки производства должна включать в себя классификацию, кодирование и унификацию конструктивных и технологических элементов деталей, оборудования, приспособлений и инструментов для их производства и контроля. Детали машиностроительного назначения с газотермическими покрытиями (ГТП) имеют широкое разнообразие конструктивно и технологически сложных поверхностей, формообразование которых, включая получение ГТП с требуемыми свойствами, требует длительной и трудоемкой технологической подготовки.

Конструктивно и технологически сложные поверхности имеют ряд общих количественных и качественных характеристик, связанных с их образованием, модифицированием и обработкой. Поэтому систематизация и классификация как деталей, так и обрабатываемых поверхностей по способу образования и по способу обработки, включая получение покрытий, является шагом на пути типизации технологических процессов изготовления и восстановления утраченной работоспособности деталей машин.

При подразделении деталей и поверхностей с газотермическими покрытиями (ГТП) на группы и подгруппы следует учитывать следующие возможные варианты осуществления технологического процесса получения ГТП:

- 1) в условиях специализированного серийного производства ГТП;
- 2) в условиях поточного производства деталей с ГТП;

- 3) в гибких производственных системах, имеющих рабочие места и участки газотермического напыления.

Исходя из особенностей образования конструктивных форм поверхностей деталей можно выделить следующие группы ГТП:

- 1) ГТП на поверхностях, образованных обработкой заготовок для создания новых деталей машин, без размерной обработки покрытий;

- 2) ГТП на поверхностях, образованных обработкой заготовок для создания новых деталей машин, с окончательной размерной обработкой покрытий;

- 3) ГТП на поверхностях деталей, обработанных под ремонтные размеры, затем восстановленных методами газотермического напыления, без размерной обработки покрытий;

- 4) ГТП на поверхностях деталей, обработанных под ремонтные размеры, затем восстановленных методами газотермического напыления, с окончательной размерной обработкой покрытий;

- 5) ГТП, непосредственно формообразующие деталь (изделие) или некоторые его объемные части.

Анализу и последующей классификации подлежат как широко распространенные виды и типы деталей в машиностроении, так и специальные, характерные для отдельных отраслей и конструкций, изготавливаемые из разнообразных материалов и сплавов. Каждому классу деталей присваивается индивидуальный код (буквой латинского алфавита) (табл. 1). Для этих целей допускается использование общемашиностроительных и отраслевых классификаторов деталей, существующих или адаптированных для конкретных условий производства.

Таблица 1

Технологический классификатор напыляемых деталей

<i>Класс деталей</i>	<i>Код детали</i>
Валы, оси	A
Втулки	B
Шкивы	C
Гильзы	D
Шестерни	E
Муфты	F
Фланцы	G
Клапаны	H
Корпусные	I
Прочие	J

Технологический классификатор деталей с ГТП состоит из трех частей: базовой, технологической детали и технологической поверхности с покрытием.

Первая (базовая) часть включает описание конструктивных особенностей напыляемых поверхностей рассматриваемого класса деталей, начиная от гладких поверхностей простой формы до усложнения до фасонных, содержащие разнообразные конструктивные элементы и их

сочетания, влияющие на обрабатываемость как при получении поверхностей, например, обработкой резанием, так и при их подготовке к напылению, а также на удобство напыления и последующую обработку напыленного покрытия (табл. 2 и 3). Эти данные используются как при разработке общей маршрутной технологии изготовления изделия с покрытием, так и его части, относящейся к получению и обработке покрытия, а также анализа технологичности конструкции изделия с покрытием.

Вторая часть содержит описание конструктивно-технологических признаков, непосредственно относящихся к обрабатываемым поверхностям детали, их степени точности, шероховатости; отклонениям формы и расположения поверхностей; материалу детали; термической обработке детали; размерной характеристике детали; в том числе сведения о количественных и качественных характеристиках напыляемых поверхностей детали, включая исходное состояние напыляемой поверхности. Эта информация необходима для проектирования маршрутной и операционной технологии.

Таблица 2

Кодирование напыляемых поверхностей

Тип напыляемой поверхности	Код
Плоская наружная	0
Плоская внутренняя	1
Цилиндрическая наружная	2
Цилиндрическая внутренняя	3
Коническая наружная	4
Коническая внутренняя	5
Сферическая наружная	6
Сферическая внутренняя	7
Фасонная наружная	8
Фасонная внутренняя	9

Таблица 3

Кодирование конструктивных элементов напыляемых поверхностей

Тип конструктивного элемента	Код
Без конструктивных элементов	0
Пазы	1
Отверстия	2
Лыски	3
Резьба	4
Зубья	5
Шлицы	6
Прочие	7

В третьей части приводят информацию, непосредственно относящуюся к газотермическому покрытию: функциональное назначение и материал покрытия; его толщина и требования к ее точности; структура и конструктивные особенности покрытия; пористость и прочность сцепления; при необходимости – способы подготовки поверхности и напыления покрытия.

Структура технологического классификатора приведена в табл. 4. Детали присваивается

персональный код прописной буквой латинского алфавита в соответствии с перечнем деталей из табл. 1.

Таблица 4

Структура технологического классификатора

Позиция технологического классификатора	Кодируемые параметры
1	Код детали
2	Код напыляемой поверхности
3	Коды конструктивных элементов поверхности
4	
5	
6	Размерная характеристика детали
7	
8	
9	Исходное состояние поверхности
10	Наивысший квалитет точности размеров внутренних поверхностей детали
11	Наивысший квалитет точности размеров наружных поверхностей детали
12	Параметр наименьшей шероховатости для обрабатываемых поверхностей детали
13	Наличие у детали требований отклонения формы и расположения поверхностей
14	Материал детали
15	Термическая обработка
16	Масса детали
17	Функциональное назначение покрытия
18	Материал покрытия
19	Способ подготовки поверхности к напылению
20	Структура покрытия
21	Конструкция покрытия
22	Толщина покрытия
23	Квалитет точности по толщине
24	Пористость покрытия
25	Прочность сцепления
26	Способ напыления
27	Способ после-напылительной обработки покрытия
28	Параметр шероховатости поверхности с покрытием

Кодирование напыляемой поверхности (поз. 2) выполняется в соответствии с ее геометрической формой и ее расположением в детали (наружная или внутренняя). Эта информация необходима для оценки доступности для выполнения операций получения газотермического покрытия (ГТП) и выбора напылительного пистолета, метода и инструментов для подготовки поверхности и обработки покрытия.

Наличие на напыляемой поверхности специальных конструктивных элементов кодируется трехзначным кодом (поз. 3, 4 и 5) по данным табл. 3 в соответствии с конструктивными особенностями

детали. Использование трехзначного кода предусмотрено для случаев наличия на поверхности нескольких видов конструктивных элементов, при этом коды соответствующих элементов располагаются в порядке уменьшения трудоемкости и сложности выполнения подготовительных и напылительных операций.

Кодирование детали по размерной характеристике выполняется тремя разрядами (поз. 6, 7 и 8), например, для деталей типа тел вращения по данным табл. 5.

Таблица 5

Данные для кодирования размерных характеристик деталей – тел вращения

Код (поз.6)	Наибольший наружный диаметр, мм	Код (поз.7)	Длина, мм
0	до 20	0	до 10
1	20...40	1	10...25
2	40...70	2	25...50
3	70...100	3	50...100
4	100...200	4	100...200
5	200...500	5	200...350
6	500...1000	6	350...500
7	1000...1500	7	500...750
8	1500...2500	8	750...1200
9	св. 2500	9	св. 1200
Код поз.8	Диаметр центрального отверстия, мм		
0	Без		
1	до 10		
2	10...20		
3	20...50		
4	50...100		
5	100...200		
6	200...400		
7	400...500		
8	500...600		
9	св. 600		

Таблица 6

Данные для кодирования детали по исходному состоянию напыляемой поверхности

Код	Вид обрабатываемой поверхности
0	Получена литьем
1	Получена обработкой давлением
2	После обработки резанием
3	Изношенная при эксплуатации
4	С элементами выкрошивания при эксплуатации
5	С рисками, надирами и задирами в результате эксплуатации
6	Корродированная при эксплуатации
7	С восстановительным газотермическим покрытием
8	С восстановительным наплавленным покрытием
9	Прочие

Например, у цилиндрических деталей первым разрядом (поз. 6) кодируется наибольший наружный диаметр; вторым разрядом (поз. 7) – длина детали; третьим разрядом (поз.8) кодируется диаметр центрального отверстия. При кодировании

центрального отверстия учитывается только диаметр отверстия независимо от наличия шпоночных и иных пазов или шлицев. В ступенчатом центральном отверстии (не подвергаемом напылению) кодируется диаметр ступени с наивысшим качеством точности, а при равной точности двух или более ступеней – размер отверстия большего диаметра. В коническом отверстии кодируется размер меньшего диаметра конуса.

Кодирование детали по исходному состоянию напыляемых поверхностей выполняется одной цифрой (поз. 9) по данным табл. 6. Эта информация необходима для разработки операционной технологии подготовки поверхности и выбора параметров покрытия.

Кодирование размеров детали по качеству точности выполняется двузначным кодом (поз. 10 и 11). Позиция 10 обозначает наивысший качество точности размеров внутренних поверхностей детали, а позиция 11 обозначает наивысший качество точности размеров наружных поверхностей (табл. 7).

Таблица 7

Кодирование качества точности размеров детали

Код	Квалитет
0	17; 16; 15; 14
1	13; 12
2	11; 10; 9
3	8; 7; 6; 5

Позиция 12 предусмотрена для кодирования параметра наименьшей шероховатости для обрабатываемых поверхностей детали, а позиция 13 - наличие у детали требований отклонения формы и расположения поверхностей. Эти данные необходимы при разработке маршрутной технологии изготовления детали для выбора рационального размещения операций и переходов получения газотермических покрытий в общем маршруте.

Материал детали кодируется одной цифрой (поз. 14, табл. 8). Позиция 15 предусмотрена для кодирования термической обработки детали и места ее выполнения в общем маршруте изготовления детали, а позиция 16 для кодирования массы детали.

Таблица 8

Кодирование материала детали

Код	Материал детали
0	Сталь углеродистая
1	Сталь легированная
2	Чугун
3	Сплав алюминия
4	Сплав меди
5	Сплав титана
6	Сплавы тугоплавких металлов
7	Керамика
8	Композиционный материал
9	Прочие

С позиции 17 начинается кодирование характеристик, относящихся непосредственно к покрытию. Функциональное назначение покрытия кодируется одной цифрой (поз. 17, табл. 9) и используется для анализа технологичности конструкции детали и покрытия. Выбор (проектирование) ГТП необходимо проводить из требований обеспечения заданных функциональных характеристик покрытия: адгезионной и когезионной прочности; микро- и макропористости; микро-, мезо-, макроструктуры и фазового состава; внутренних границ раздела (межфазных и структурные); остаточных напряжений в покрытии, основе и на их границе раздела; свойств напыленного покрытия. При этом требование одновременного удовлетворения покрытием нескольким из перечисленных характеристик может существенно ограничить использование тех или иных методов ГТН и оборудования.

Таблица 9

Кодирование функционального назначения покрытия

Код	Функциональное назначение покрытия
0	Триботехническое
1	Коррозионностойкое
2	Декоративное
3	Восстановительное
4	Технологическое
5	Формообразующее
6	Теплозащитное
7	Со специальными физическими свойствами
8	Многофункциональное
9	Прочие

Большинство других функциональных характеристик покрытия (твердость и микротвердость, газопроницаемость, электропроводность, теплопроводность, термостабильность и др.) являются производными от перечисленных выше, а также в той или иной степени наследуют свойства исходных материалов (порошка и основы). Большую роль играют также свойства основы и ее поверхности перед напылением, а также характеристики газовой среды, в которой ведется напыление.

Основные характеристики покрытия в первом приближении можно представить зависящими от множества следующих параметров

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{d}_p \pm t_1 \sigma_{\bar{d}_p}; \bar{G}(d_p) \pm t_2 \sigma_{\bar{G}(d_p)}; \bar{w}_{p_0} \pm t_3 \sigma_{\bar{w}_{p_0}}; \\ A_{p_0}; \bar{T}_{p_0} \pm t_4 \sigma_{\bar{T}_{p_0}}; \\ \bar{T}_{b_0} \pm t_5 \sigma_{\bar{T}_{b_0}}; \bar{Env}_i \pm t_6 \sigma_{\bar{Env}_i}; \bar{SL}_j \pm t_7 \sigma_{\bar{SL}_j}; \\ \bar{GSP}_k \pm t_8 \sigma_{\bar{GSP}_k}; \bar{Dm}_l \pm t_9 \sigma_{\bar{Dm}_l} \end{array} \right\}$$

где средние статистические значения: $\bar{d}_p$ – диаметра частиц; $\bar{G}(d_p)$ – расхода напыляемого

материала в напылительной струе; $\bar{w}_{p_0}$ – скорости частиц; $\bar{T}_{p_0}$ – температуры частиц перед соударением; $\bar{T}_{b_0}$ – температуры основы; $\bar{Env}_i$ – состава и параметров состояния рабочей среды; $\bar{SL}_j$ – параметры структуры и свойств поверхностного слоя детали; $\bar{GSP}_k$ – характеристики шероховатости напыляемой поверхности и геометрии детали; $\bar{Dm}_l$ – размеры поперечного сечения напылительной струи.

В первом приближении основные характеристики покрытия определяются пространственно-временными распределениями расхода $G(D_p, r, t)$ частиц заданного размера и его среднеквадратическим отклонением $\sigma_{G(D_p, r, t)}$, распределениями осредненных значений ключевых физических параметров (КФП): скорости u_{p_0} , размера D_p , агрегатного состояния A_{p_0} и температуры T_{p_0} частиц перед соударением, температуры T_{b_0} основы, характеристик шероховатости ее поверхности $Ra, Rz, Rmax$, а также среднеквадратическими отклонениями перечисленных выше параметров по сечению пятна напыления $r \leq R_{slot}$ (полагая, что пятно осесимметрично, а агрегатное состояние частиц может быть однозначно восстановлено по температуре их поверхности).

Материал покрытия кодируется одной цифрой (поз. 18, табл. 10). Классификация покрытий по виду исходного материала является важной для анализа технологичности конструкции детали и правильность выбора способа ГТН и технологии его обработки. Она не учитывает форму исходного материала (порошок, проволока, стержень, порошковая проволока, гибкий шнур и пр.), а его состав, прежде всего определяющий свойства покрытия. Эта информация позволяет прогнозировать свойства газотермических покрытий, когда отсутствуют предварительные проработки по технологии и соответствующие экспериментальные исследования.

Таблица 10

Кодирование материала покрытия

Код	Материал покрытия
0	Металл
1	Сплав
2	Интерметаллид
3	Полимер
4	Тугоплавкое соединение
5	Оксид
6	Полимер
7	Композиционное на металлической матрице
8	Наноматериал
9	Прочие

Способ специальной обработки поверхности перед напылением покрытия кодируется одной цифрой (поз. 19, табл. 11). Выбранный способ подготовки поверхности к напылению в значительной мере определяет прочность сцепления с основным материалом, а также усталостную прочность деталей с покрытиями, подвергаемыми при эксплуатации циклическому нагружению. Специальная механическая обработка включает такие методы подготовки поверхности, как нарезание рваной резьбы, нарезание кольцевых канавок, накатка или насечка. К прочим методам подготовки поверхности можно отнести электроискровую обработку, ионно-дуговую активацию, ультразвуковую обработку, вибрационную обработку и др.

Таблица 11

Кодирование способа специальной обработки перед напылением покрытия

Код	Способ предварительной обработки поверхности
0	Специальная механическая обработка
1	Струйно-абразивная обработка
2	Обработка высокоскоростной струей воды
3	Иглофрезерование
4	Травление
5	Лазерная обработка
6	Нанесение подслоя негизотермическими методами
7	Комбинированный способ
8	Изоляция поверхностей, не подлежащих напылению
9	Прочие

Таблица 12

Кодирование вида преобладающей структуры покрытия

Код	Вид преобладающей структуры покрытия
0	Кристаллическая
1	Аморфная
2	Аморфно-кристаллическая
3	Квазикристаллическая
4	Псевдосплавная
5	Гетерофазная
6	Наноструктура
7	Наноструктурированная
8	Кластерная
9	Прочие

Кодирование вида преобладающей структуры напыленного покрытия осуществляется одной цифрой (поз. 20, табл. 12). Как известно, свойства газотермических, как и других видов покрытий, и материалов и деталей с покрытиями определяются комплексом характеристик структуры и физико-механических свойств. К ним относятся: параметры структуры покрытий, определяемые методами металлографии, электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа и др.; механические

свойства – модуль упругости, твердость, пластичность, когезионная прочность, усталостная прочность, микропластичность, контактная выносливость и др.; физические свойства – плотность, пористость, газопроницаемость, электропрочность, теплопроводность, термический коэффициент линейного расширения, оптические свойства и др.; параметры прочности сцепления в различных условиях; защитные свойства – жаростойкость, термическая усталость, коррозионная стойкость в различных средах, вязкость разрушения – параметры статической, циклической и динамической трещиностойкости; трибологические характеристики покрытий – коэффициенты трения и износостойкость при различных видах изнашивания – в парах трения, фреттинг-коррозии, гидроабразивного, ударно-абразивного, газоабразивного и пр.; и др., в том числе специфические параметры. Информация о структуре покрытия позволяет оценить правильность выбора технологии его получения и возможности достижения требуемого уровня его технических характеристик.

Конструктивные особенности покрытия кодируются одной цифрой (поз. 21, табл. 13). По мере развития технологии ГТН и областей их промышленного применения разработаны и продолжают развиваться разнообразные подходы к получению покрытий с различной макроструктурой и дополнительными конструктивными элементами покрытий, обеспечивающие существенное повышение их несущей способности.

Таблица 13

Кодирование типа покрытия по конструктивным особенностям

Код	Тип покрытия
0	Однослойное
1	С подслоем
2	Многослойное
3	Градиентное
4	Армированное
5	Свайное
6	Комбинированное
7	Пропитанное
8	Дискретное
9	Прочие

Кодирование покрытий по группам толщины выполняется одной цифрой (поз. 22, табл. 14). Необходимость классификации газотермических покрытий по толщине обусловлена тем, что диапазон толщин применяемых газотермических покрытий колеблется от десятков микрометров до нескольких миллиметров. Увеличение толщины покрытий существенно сказывается на условиях их формирования, структуре, величине внутренних напряжений и свойствах, а также требует изменения режимов напыления, а в ряде случаев их конструкции.

Таблица 14

Кодирование группы покрытия по толщине

Код	Группа покрытия по толщине, мм
0	До 0,05
1	0,05...0,1
2	0,1...0,3
3	0,3...0,5
4	0,5...0,75
5	0,75...1,0
6	1,0...2,0
7	2,0...3,0
8	3,0...5,0
9	Св. 5,0

Кодирование качества точности толщины покрытия выполняется одной цифрой (поз. 23, табл. 15). Его применяют при существенном влиянии толщины покрытия на их эксплуатационные свойства, например, на износостойкость, специальные физические свойства и пр.

Таблица 15

Кодирование качества точности толщины покрытия

Код	Квалитет
0	Не нормируется
1	14...17
2	12...13
3	9...11
4	8
5	7
6	6
7	5

Кодирование покрытий по пористости выполняется одной цифрой (поз. 24, табл. 16). Необходимость классификации газотермических покрытий по пористости связана со значительным влиянием этого параметра на многие физические и эксплуатационные свойства, в т.ч. на коррозионную стойкость и проницаемость в различных средах. Условно можно выделить пять групп газотермических покрытий по пористости: 1) практически беспористые (до 1,0 %); 2) малопористые (1,0...2,0 %); 3) умеренно пористые (2,0...5,0 %); 4) пористые (5,0...10,0 %); 5) высокопористые (св. 10%).

Таблица 16

Кодирование покрытий по пористости

Код	Пористость, %
0	До 1,0
1	1,0...2,0
2	2,0...5,0
3	5,0...10,0
4	10,0...15,0
5	15,0...20,0
6	20,0...30,0
7	Св. 30,0

Таблица 17

Кодирование покрытий по прочности сцепления

Код	Прочность сцепления, МПа
0	До 10,0
1	10,0...20,0
2	20,0...30,0
3	30,0...40,0
4	40,0...50,0
5	50,0...60,0
6	60,0...70,0
7	Св. 70,0

Кодирование покрытий по прочности сцепления выполняется одной цифрой (поз. 25, табл. 17). Классификация покрытий по прочности сцепления связана с определенными трудностями в интерпретации результатов испытаний покрытий на прочность сцепления ввиду разнообразия используемых методик. Можно ориентироваться на прочность сцепления, измеряемую методом отрыва конического штифта от покрытия. По прочности сцепления покрытия подразделяются на следующие группы: 1) малонагруженные ($\sigma_{\text{сц}} \leq 10$ МПа); 2) умереннонагруженные ($10 < \sigma_{\text{сц}} \leq 30$ МПа); 3) средненагруженные ($30 < \sigma_{\text{сц}} \leq 70$ МПа); 4) тяжелонагруженные ($\sigma_{\text{сц}} > 70$ МПа).

Кодирование покрытий по способу напыления выполняется одной цифрой (поз. 26, табл. 18). Классификация покрытий по способу ГТН затруднений не вызывает. Необходимость такой классификации связана с тем, что покрытия, напыляемые из одного и того же материала, из одной и той же его партии разными способами, как правило, существенно отличаются по составу, структуре, свойствам, а также затратам. Трудность практической реализации контроля качества покрытий в ряде случаев обуславливает обязательную регламентацию применяемого способа ГТН в конкретных условиях. Однако при определенных требованиях к покрытию осуществляется выбор соответствующего способа напыления.

Таблица 18

Кодирование способов газотермического напыления покрытий

Код	Способ газотермического напыления покрытий
0	Подлежит выбору
1	Газопламенное
2	Высокоскоростное газопламенное
3	Детонационно-газовое
4	Высокочастотное индукционное
5	Электродуговое
6	Плазменное
7	Холодное газодинамическое
8	Комбинированное
9	Прочие

Таблица 19

Кодирование способов после-напылительной обработки покрытий

Код	Способ после-напылительной обработки покрытий
0	Без обработки
1	Термическая
2	Оплавление
3	Химико-термическая
4	Лазерная
5	Обработка лезвийным и абразивным инструментом
6	Пропитка и инфильтрация
7	Поверхностным пластическим деформированием
8	Комбинированная
9	Прочие

Кодирование способов после-напылительной обработки покрытий выполняется одной цифрой (поз. 27, табл. 19). Во многих случаях окончательные характеристики покрытия, определяющие его работоспособность, формируются на стадии его дополнительной обработки после напыления.

Кодирование параметра шероховатости напыленного покрытия после окончательной обработки выполняется одной цифрой (поз. 28, табл. 20). При отсутствии требований к шероховатости поверхности с покрытием в технологическом процессе отсутствует его размерная обработка.

Таблица 20

Кодирование параметра шероховатости напыленного покрытия после окончательной обработки

Код	Параметры шероховатости обработанного покрытия	
	Ra, мкм	Rz, мкм
0	Не нормируется	
1	Св. 80	Св. 320
2	10...80	40...320
3	2,5...10	10...40
4	0,32...2,5	1,6...10
5	0,02...0,32	0,1...1,6

Задачей разработки маршрутной технологии изготовления детали с покрытием является поиск последовательности выполнения технологических операций и переходов, которая минимизирует затраты, не дающие экономического эффекта, например, удаление излишне напыленного материала, удаление защитных масок и экранов, установленных перед напылением. Причем положение процесса напыления в маршрутном процессе изготовления детали оказывает большое влияние на стоимость. Рассмотрим две последовательности этапов изготовления детали:

Последовательность 1: Заготовительные операции получения заготовки → Обработка резанием → Напыление покрытия

Последовательность 2: Заготовительные операции получения заготовки → Напыление покрытия → Обработка резанием

Легко установить, что последовательность 1 требует защиты обрабатываемых резанием поверхностей перед напылением, тогда как последовательность 2 требует лишь перегрузки обрабатываемой заготовки с покрытием. Нанесение защитных масок является операцией, не дающей экономического эффекта. Последовательность 1 имеет более высокую стоимость и меньшие производственные риски. Последовательность 2 исключает нанесение защитных масок, их удаление после напыления и удаление излишне напыленного материала. Это идеальный процесс с точки зрения о стоимости при использовании технологических приемов и средств, исключающих риски повреждения покрытия. Последовательность 2 имеет более высокие риски повреждения покрытия и возможно возникновение определенного производственного брака. Поэтому необходимо учитывать затраты на выполнение отдельных этапов технологического процесса и в целом по всему технологическому маршруту.

Выводы. В работе предложена система классификации деталей с газотермическими покрытиями, учитывающая конструктивные особенности и основные параметры как деталей, так и покрытий.

Практическое применение предлагаемой классификации позволяет:

1. систематизировать и обобщать конструкторско-технологическую информацию по газотермическому напылению и опыту его применения;
2. присваивать кодовые обозначения типовым напыляемым поверхностям для типизации технологических процессов получения покрытий и обработки заготовок с покрытиями, а также для последующей автоматизации технологического проектирования;
3. распределять детали по видам поверхностей и типам наносимых газотермических покрытий для разработки типовых и групповых технологических процессов;
4. создавать специализированные участки и гибкие производственные системы газотермического напыления.

Л и т е р а т у р а

1. Хокинг М. Металлические и керамические покрытия: Получение, свойства и применение / Хокинг М., Васантакри В., Сидки П. – М.: Мир, 2000. – 518 с.
2. Теория и практика нанесения защитных покрытий / Витязь П.А., Ивашко В.С., Ильющенко А.Ф. [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 1998. – 583 с.
3. ASM Handbook Volume 5: Surface Engineering. – Ohio: ASM International, 1994 – P. 1056.

4. Cartier M. / 2003. Handbook of Surface Treatments and Coatings / Cartier M., Polak T.A., G D Wilcox G.D. – N-Y: ASME Press, 2003. – P. 412.
5. Ющенко К.А. Инженерия поверхні / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, В.М. Корж. – Київ: Наук.думка. 2007. – 559 с.
6. Pawlowski L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings: 2-nd Ed. / L. Pawlowski // Chichester, England. John Wiley & Sons, Ltd. – 2008. – P. 647.
7. Handbook of Thermal Spray Technology, edited by J.R. Davis // Ohio: ASM International. – 2004. – P. 347.
8. Tucker Jr., C. (Ed.), 2013. ASM Handbook. Thermal Spray Technology Volume 5A. - Ohio: ASM International. P. 412.
9. Кудинов В.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / Кудинов В.В., Бобров Г.В. – М.: Металлургия, 1992. – 432 с.
10. Fauchais, P. Thermal Spray Fundamentals / Fauchais P., Heberlein J., Boulos M. N-Y: Springer, 2014. - P. 1600.
11. Достанко А.П. (ред.) Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники. В 3-х т.; Под общ. ред. А.П. Достанко. Мн.: ФУАинформ. Том 1, 2000. – 424 с.; Том 2, 2001. – 244 с.; Том 3, 2001. – 292 с.
12. Алхимов А.П. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика / Алхимов А.П., Клинков С. В., Косарев В.Ф., Фомин В.М. Под ред. В.М. Фомина. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. — 536 с.
13. Villafuerte J. (Ed.) Modern Cold Spray: Materials, Process, and Applications / Villafuerte J. (Ed.). - Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2015. – P.435.
14. Champagne Victor K. (ed.). The cold spray materials deposition process. Fundamentals and applications / Ed. Victor K. Champagne. – Abington, UK: 2007, Woodhead Publishing Limited, 2007. – P. 377.
15. Papyrin, A. Cold spray technology / Papyrin, A., V. Kosarev, S. Klinkov, A. Alkhimov, and V. Fomin. Oxford: Elsevier, 2007. – P. 340.
16. Борисов Ю.С. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник / Борисов Ю.С., Харламов Ю.А., Сидоренко С.Л., Ардаговская Е.Н. – К.: Наук. Думка. 1987. – 544 с.
17. Лясников В.Н. Плазменное напыление покрытий в производстве изделий электронной техники / Лясников В.Н., Украинский В.С., Богатырев Г.Ф. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1985.- 200 с.
18. Соколов Ю.В. Плазменное формообразование: Монография / Соколов Ю.В. Мн.: УП «Технопринт», 2003. – 198 с.
19. Schneider K.E. Thermal Spraying for Power Generation Components / Schneider K.E., Belashchenko V., Dratwinski M., Siegmann S., Zagorski A. Weinheim: WILEY-VCH, 2006 - P. 286.
20. Похмурский В.І. Електродугові відновні та захисні покриття / В.І. Похмурський, М.М. Студент, В.М. Довгунік, Г.В. Похмурська, І.Й. Сидорак. Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАНУ, 2005. – 192 с.
21. Рыжов Э.В. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями / Рыжов Э.В., Клименко С.А., Гуцаленко О.Г. К.: Наукова думка, 1994. – 182 с.
22. Клименко С.А. Точение износостойких защитных покрытий / Клименко С.А., Муковоз Ю.А., Полонский Л.Г., Мельничук П.П. К.: Техніка, 1997. – 146 с.
23. Пилипенко О.М. Вібраційна обробка газотермічних покриттів / Пилипенко О.М. Черкаси: Сіяч, 2000. – 203 с.
24. Харламов Ю.А. Детонационно-газовые напылительные струи / Харламов Ю.А., Харламов М.Ю. – Луганск: изд-во Восточноукр. Нац. Ун-та им. В. Даля, 2011. – 260 с.
25. Солових Є.К. Науково-методологічні основи підвищення несучої здатності функціональних покриттів конструктивними і технологічними методами / Солових Є.К. Автореферат ... д.т.н. К., 2013. – 36 с.

References

1. Hocking M.G. Metallic and Ceramic Coatings / Hocking M.G., Vasantasree V., Sidky P.S. // L.: Longman Group UK Limited, 1989. (M.: Mir, 2000. – P. 518).
2. Teoriya i praktika naneseniya zashchitnikh pokritiy / Vityaz P.A., Ivashko V.S., Ilyushchenko A.F. [I dr.]. – Minsk: Beloruskaya navuka, 1998. – 583 s.
3. ASM Handbook Volume 5: Surface Engineering. – Ohio: ASM International, 1994 – P. 1056.
4. Cartier M. / 2003. Handbook of Surface Treatments and Coatings / Cartier M., Polak T.A., G D Wilcox G.D. – N-Y: ASME Press, 2003. – P. 412.
5. Yushchenko K.A. Inseneriya poverhni / Yushchenko K.A., Yu.S. Borisov, V.D. Kuznetsov, V.M. Kors.- Kiev: Nauk.dumka. 2007. – 559 s.
6. Pawlowski L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings: 2-nd Ed. / L. Pawlowski // Chichester, England. John Wiley & Sons, Ltd. – 2008. – P. 647.
7. Handbook of Thermal Spray Technology, edited by J.R. Davis // Ohio: ASM International. – 2004. – P. 347.
8. Tucker Jr., C. (Ed.), 2013. ASM Handbook. Thermal Spray Technology Volume 5A. - Ohio: ASM International. P. 412.
9. Kudinov V.V. Nanesenie pokritiy napileniem. Teoriya, tekhnologiya i oborudovanie / Kudinov V.V., Bobrov G.V. – M.: Metallurgiya, 1992. – 432 s.
10. Fauchais, P. Thermal Spray Fundamentals / Fauchais P., Heberlein J., Boulos M. N-Y: Springer, 2014. - P. 1600.
11. Dostanko A.P. (red.) Plazmennye protsessi v proizvodstve izdeliy elektronnoy tekhniki. Pod obshch. red. Dostanko A.P. Minsk: FUAinform. V 3-kh. t. T. 1, 2000. – 424 s.; T. 2, 2001. – 244 s.; T.3, 2001. – 292 s.
12. Alkhimov A.P. Kholodnoe gazodinamicheskoe napilenie. Teoriya i praktika / Alkhimov A.P., Klinkov S.V., Kosarev V.F., Fomin V.M. Pod obshch. red. V.M. Fomina. – M.: FIZMATLIT, 2010. – 536 s.
13. Villafuerte J. (Ed.) Modern Cold Spray: Materials, Process, and Applications / Villafuerte J. (Ed.). - Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2015. – P.435.
14. Champagne Victor K. (ed.). The cold spray materials deposition process. Fundamentals and applications / Ed. Victor K. Champagne. – Abington, UK: 2007, Woodhead Publishing Limited, 2007. – P. 377.
15. Papyrin, A. Cold spray technology / Papyrin, A., V. Kosarev, S. Klinkov, A. Alkhimov, and V. Fomin. Oxford: Elsevier, 2007. – P. 340.
16. Borisov Yu.S. Gazotermicheskie pokritiya iz poroshkovikh materialov: Spravochnik / Borisov Yu.S., Kharlamov Yu.A., Sidorenko S.L., Ardatovskay E.N. – K.: Nauk.dumka. 1987. – 544 s.
17. Lyasnikov V.N. Plazmennoe napilenie pokritiy v proizvodstve izdeliy elektronnoy tekhniki / Lyasnikov

- V.N., Ukrainiy V.S., Bogatirev G.F. Saratov: Izd-vo Saratov. Un-ta, 1985. – 200 s.
18. Sokolov Yu.V. Plazmennoe formoobrazovanie: Monografiya / Sokolov Yu.V. Mn.: UP "Tekhnoprint", 2003. – 198 s.
 19. Schneider K.E. Thermal Spraying for Power Generation Components / Schneider K.E., Belashchenko V., Dratwinski M., Siegmans S., Zagorski A. Weinheim: WILEY-VCH, 2006 - P. 286.
 20. Pokhmurskiy V.I. Elektrodogovi vidnovni ta zakhisni pokrittya / Pokhmurskiy V.I., M.M. Student, V.M. Dovgunik, G.V. Pokhmurska, I.Y. Sidorak. Lviv: Fiziko-mekhanichniy institute im. G.V. Karpenka NANU, 2005. – 192 s.
 21. Rizsov E.V. Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva detaley s pokritiyami / Rizsov E.V., Klimenko S.A., Gutsalenko O.G. K.: Naukova dumka, 1994. – 182 s.
 22. Klimenko S.A. Tochenie iznosostoikikh zashchitnikh pokritiy / Klimenko S.A., Mukovoz Yu.A., Polonskiy L.G., Melnichuk P.P. K.: Tekhnika, 1997. – 146 s.
 23. Pilipenko O.M. Vibatsyna obrobka gazotermichnikh pokrittiv / Pilipenko O.M. Cherkasi: Siyach, 2000. – 203 s.
 24. Kharlamov Yu.A. Detonatsinno-gazovie napilitelnie strooi / Kharlamov Yu.A., Kharlamov M.Yu. – Lugansk: izd-vo Vostochno-ukr. Nats. Un-ta im. V. Dalhya, 2011. – 260 s.
 25. Solovikh E.K. Naukovo-metodologichni osnovi pidvishchennya nesuchey zdatnosti funktionalnikh pokrittiv konstruktivnimi I technologichnimi metodami / Solovikh E.K. Avtoreferat ... d.t.n. K., 2013. – 36 s.

Харламов Ю.О. Технологічний класифікатор деталей і поверхонь з газотермічними покриттями

У статті запропоновано технологічний класифікатор виробів машинобудування та їх поверхонь з покриттями, отриманими методами газотермічного наплення. Технологічний класифікатор складається з трьох частин: базової, що кодує основну інформацію про наплення виробів; технологічної, що кодує основну інформацію про деталі і наплення поверхні і технологічної, що кодує інформацію про газотермічні покриття. Показані перспективи застосування класифікатора при розробці систем автоматизованого

проекування технологічних процесів виробництва деталей з газотермічними покриттями.

Ключові слова: газотермічне наплення, кодування, маршрутна технологія, поверхня, покриття.

Kharlamov Y.A. Technological Classification of Thermal Sprayed Parts and Surfaces

Today, thermal spraying is mostly used for machine parts which have to meet the most exacting demands. Owing to the various factors influencing coating quality these quality standards can be met only by using computer – controlled spray systems.

Process development of thermal spraying must result in a repeatable stable manufacturing and quality-assurance process. The process capability requires a good interaction between design and manufacturing. The result is a product that can be manufactured by a defined and released manufacturing process.

This paper proposes a technological classifier of thermal sprayed parts and working surfaces. The technological classifier consists of three parts: 1. a base encoding basic information about the thermal sprayed product; 2. Technological part of classifier for encoding mainly information on the design elements of thermal sprayed part and surfaces to be sprayed; 3. Technological part of classifier for encoding mainly information on thermal sprayed coatings.

Keywords: gas-thermal spraying, coding, routing technology, surface coating.

Харламов Юрій Олександрович – д.т.н., проф., професор кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк) yuriy.kharlamov@gmail.com

Рецензент: д.т.н., проф. **Марченко Д.М.**

Стаття подана 21.09.2016

УДК 535.247.4:535.243

ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ НА РАБОТУ ФОТОДЕТЕКТОРОВ

Кулышев А.М., Черникова И.Д., Черников Н.Г.

INFLUENCE CONTITION OF THE SURFACE SEMICONDUCTOR TO WORK OF PHOTODETECTOR

Kulyshhev A.M., Chernikova I.D., Chernikov N.G.

Известно, что время от времени установившиеся разделы науки переживают периоды скачкообразного развития, обусловленные появлением качественно новых идей, приборов и методов измерений. Наглядный пример тому – оптическая спектроскопия, которая с появлением лазерных источников света значительно преобразилась. Наряду с интенсивным развитием классических направлений возникли принципиально новые методы и приложения. Среди новых направлений особое место занимает статистический и спектральный анализ световых полей с помощью фотодетекторов – спектроскопия оптического смещения. Экспериментальные методы спектроскопии оптического смещения, в частности исследования по статистике фотоотсчётов, вызвали перед экспериментаторами определенные требования к эффективности фотодетекторов. В данной работе рассматриваются методы и способы получения эффективных фотодетекторов с помощью фотоэмиссии.

Ключевые слова: фотоэмиссия, квантовый выход, распределение электронов по энергиям, спектральный анализ, работа выхода, электронное сродство, загиб зон, полупроводники, полупроводниковый фотодетектор.

Анализ последних исследований и публикаций: Как впервые было показано в работах [1, 2] на поверхности монокристалла возможно появление поверхностных состояний, энергии которых лежат в запрещенной зоне. Эти состояния обусловлены разрывом связей на поверхности кристаллов. В работе [3] установлено, что при большой плотности поверхностных состояний на свободной поверхности полупроводника происходит изменение энергетического спектра электронов вследствие загиба зон. Загиб зон обусловлен наличием двойного электрического слоя вблизи поверхности, который образован зарядами в поверхностных состояниях и пространственным зарядом противоположного знака, распространяющимися вглубь кристалла.

Глубина распространения двойного слоя определяется степенью легирования полупроводника. Наличие двойного слоя обуславливает увеличение или уменьшение потенциальной энергии электронов на поверхности на величину ϕ_0 (рис. 1)

Положение уровня Ферми в объеме зависит от степени легирования, в то время как его положение относительно края валентной зоны E_v и зоны проводимости E_c на поверхности полностью определяется плотностью поверхностных состояний. Таким образом, происходит стабилизация уровня Ферми на поверхности.

Вследствие стабилизации уровня Ферми на поверхности термоэлектронная работа выхода ϕ_T существенно зависит от загиба зон. Она определяется как энергия (рис. 1, а), которую нужно сообщить электрону, чтобы перевести его с уровня Ферми в вакуум:

$$\phi_T = E_{\text{вак}} - E_F = \chi + (E_C + E_F) = \chi + \zeta \quad (1)$$

Работа выхода ϕ_T может быть определена (рис. 1б – для полупроводника n-типа; рис. 1в – для полупроводника p-типа) фотоэмиссионным методом. Для этого необходимо произвести фотоэмиссионные измерения металла и полупроводника в одном и том же приборе и при одних и тех же вакуумных условиях.

Электронное сродство не зависит от загиба зон:

$$\chi = (E_{\text{вак}} - E_C)_S \quad (2)$$

Фотоэлектронная работа выхода для возбужденных из валентной зоны у самой поверхности электронов

$$\phi_{\phi S} = (E_{\text{вак}} - E_v)_S \quad (3)$$

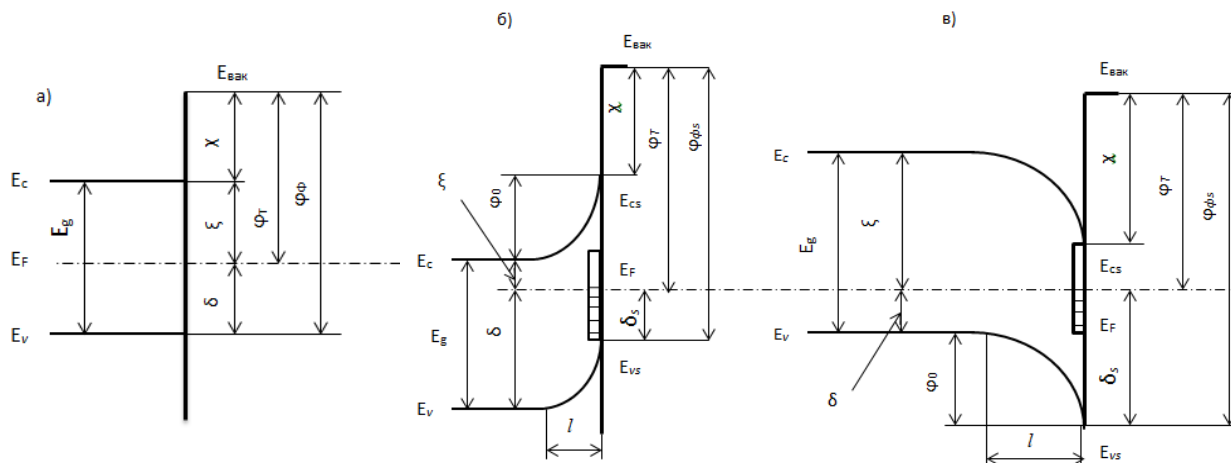


Рис. 1. Схема энергетических спектров поверхности полупроводника:
 а – собственный полупроводник с малой плотностью поверхностных состояний;
 б – электронный полупроводник; в – дырочный полупроводник;
 б и в – для случая большой плотности поверхностных состояний

также не зависит от загиба зон. Для электронов, возбужденных из глубины полупроводника, фотоэлектронная работа выхода зависит от загиба зон и определяется как величиной загиба зон, так и глубиной выхода фотоэлектронов.

В фотоэлектронной спектроскопии рассматриваются два вида анализа экспериментальных результатов: спектральное распределение квантового выхода фотоэлектронов и распределение по энергиям эмитированных фотоэлектронов.

Влияние поверхностных состояний на спектральное распределение квантового выхода фотоэмиссии интерпретируется разными авторами по-разному: Шеер и Лаар [4] объясняют ее как результат возбуждения электронов из поверхностных состояний, Гобели и Аллен [5] – возбуждением электронов с верхних уровней валентной зоны с одновременным обменом нормальной составляющей им-пульса электрона с поверхностью. Линейная зависимость объясняется авторами в обоих случаях прямыми переходами электронов из валентной зоны. Фишер [6] предполагает, что как кубическая, так и линейная зависимости спектрального распределения $Y(h\nu)$ обусловлены одинаковыми механизмами возбуждения: а именно, прямыми переходами в объеме, но кубическая зависимость обусловлена еще и влиянием на фотоэмиссию загиба зон.

Ранее Редфилд [7], рассматривая фотоэмиссию из полупроводников при наличии загиба зон на поверхности, пришел к следующим выводам: 1) хвост спектрального распределения квантового выхода простирается за область нормального порога фотоэмиссии; 2) положение границы валентной зоны не может быть определено из наблюдаемого порога; 3) области положительного и отрицательного пространственного зарядов вызывают эффекты, которые могут быть несимметричны; 4) зависимости квантового выхода

$Y(h\nu)$ вблизи порога существенно не отличаются как при $n = 3/2$, так и при $n = 5/2$ в формуле (4):

$$Y = C_n(h\nu - h\nu_0)^n \quad (4)$$

где C_n и n – коэффициенты, зависящие от механизмов возбуждения фотоэмиссии; $h\nu$ – энергия фотона, соответствующая порогу фотоэмиссии.

Экспериментально полученные зависимости $Y(h\nu)$ в области вблизи порога для ряда полупроводников [6] имеют вид, подобный показанному на рис.2. для арсенида галлия. В непосредственной близости от порога ход кривой следует соотношению:

$$Y(h\nu) \sim (h\nu - h\nu_0)^3 \quad (5)$$

и затем в некотором интервале $h\nu$ имеет место линейная зависимость:

$$Y(h\nu) \sim (h\nu - h\nu_0)^1 \quad (6)$$

При рассмотрении распределения по энергиям эмитированных фотоэлектронов в известной мере отражает особенности энергетической структуры вещества. Из таких распределений, измеренных при разных энергиях (рис. 3), возбуждающих эмиссию фотонов, можно получить информацию о характере межзонных переходов, их начальных и конечных состояний и о влиянии на них условий на поверхности. Для этого используется метод обработки экспериментальных данных, предложенных Фишером [6].

На рис. 3 схематически представлена зонная структура твердого тела. Предположим, что имеют место прямые переходы при энергиях фотонов $h\nu_1$, $h\nu_2$ и $h\nu_3$ и переход из вершины валентной зоны в зону проводимости происходит при энергии фотона $h\nu_1$. При значении $h\nu_1$ максимальная энергия

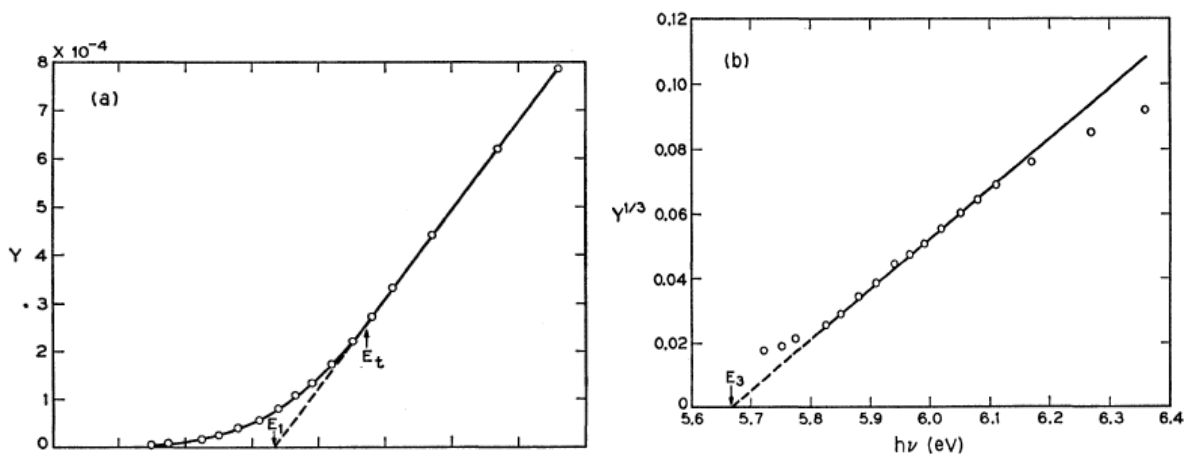


Рис. 2. Спектральное распределение квантового выхода фотоэлектронов с поверхности скола (110) GaAs [6]: а – E_t – линейная зависимость; б – кубическая зависимость. E_3 – экстраполированное значение порога фотоэмиссии с поверхности

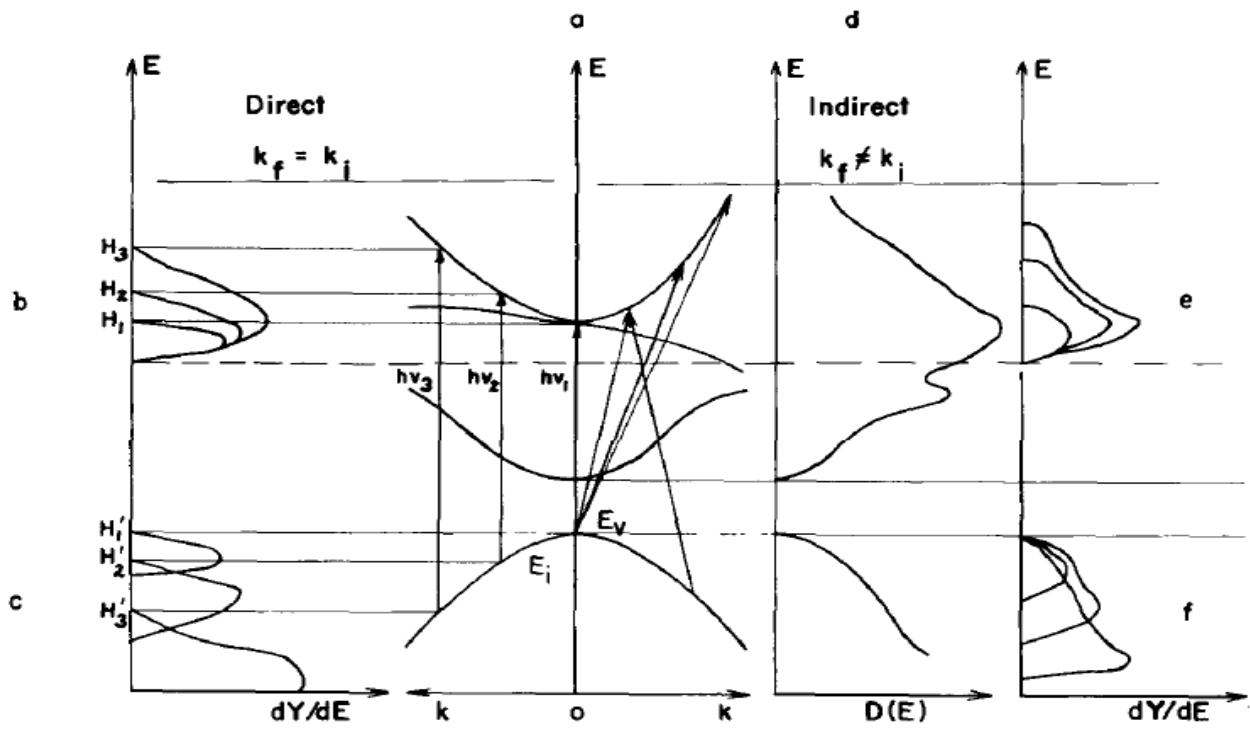


Рис. 3. Прямые и не прямые переходы в твердом теле:

а – схематическое изображение зонной структуры $E(k)$ полупроводника; б – распределение фотоэлектронов в случае прямых переходов; в – распределения фотоэлектронов в случае вычитания из максимальной энергии H энергии фотона $h\nu$, чтобы показать начальные состояния переходов; д – плотность состояний электронов в кристалле; е – энергетические распределения фотоэлектронов в случае не прямых переходов; ф – перемещенные распределения энергии $(E - h\nu)$ подчеркивают начальные состояния, как в (в)

эмитированных электронов определяется величиной $E_v + h\nu_1$. Этот высокоэнергетический край распределения по энергиям обозначен на рис. 3. Буквой H_1

Если теперь сместить измеренное распределение в сторону низких энергий на величину $h\nu_1$, то шкала E энергий дает начальные, а не конечные энергии, и

верх валентной зоны, т.е. H'_1 , как показано на рис. 3. При энергиях фотонов $h\nu_1$, $h\nu_2$ и $h\nu_3$, причем $h\nu_3 > h\nu_2 > h\nu_1$ переходы с верхнего уровня валентной зоны невозможны и смещенные высокоэнергетические края энергетических распределений H'_1 , H'_2 и H'_3 не будут совпадать с верхом валентной зоны, но будут определять состояния E_{i2} и E_{i3} , из которых

електрони возбуждаются фотонами с энергиями $h\nu_2$ и $h\nu_3$. Энергии E_{i2} и E_{i3} определяются соответственно соотношениями:

$$H'_1 - H'_2 = E_v - E_{i2} \quad H'_1 - H'_2 = E_v - E_{i2} \quad (7)$$

Таким образом, мы можем найти прямые переходы и их начальные и конечные состояния.

Поверхностный барьер на поверхности очень сильно зависит от состояния поверхности и от того, каким способом она приготовлена. Фишером [6] был предложен метод определения загиба зон φ_0 и электронного сродства χ по анализу энергетических распределений. Им было показано, что более удобными для изучения поверхностных свойств являются полупроводники n-типа проводимости. Как видно из рис. 1б для полупроводника n-типа зоны загнута вверх и электроны в поверхностных состояниях имеют большую энергию, чем электроны валентной зоны в объеме и валентной зоны на поверхности. При возбуждении монохроматическим светом с энергией $h\nu$ эмитированные электроны будут разделены на три группы с различными энергиями. Это позволяет с помощью энергетического распределения непосредственно измерять как изменения в загибе зон φ_0 так и в изменении электронного сродства $\Delta\chi$. В этом случае рассматривают два края в распределении фотоэлектронов по энергиям: низко- и высокоэнергетический (рис. 4).

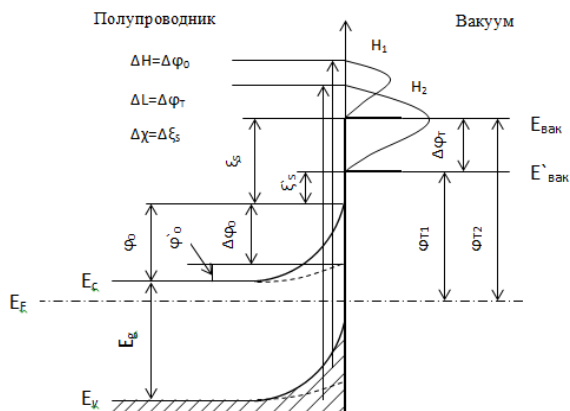


Рис. 4. Энергетический спектр поверхности полупроводника: H – высокоэнергетический край распределения фотоэлектронов; L – низкоэнергетический край распределения фотоэлектронов

Высокоэнергетический край H связан с положением зон относительно уровня Ферми, а низкоэнергетический край L работой выхода φ_T . Изменение состояния на поверхности приводит к изменению в загибе зон и работе выхода. Оба эти изменения непосредственно измеряются:

$$\Delta H = -\Delta(E_F - E_v)_s = \Delta\varphi_0, \quad \Delta L = \Delta\varphi_T \quad (8)$$

Параметры энергетической структуры поверхности полупроводника можно определить, если известны фотоэлектронная работа выхода на поверхности $\varphi_{\phi s} = h\nu_0$ и термоэлектронная работа выхода φ_m .

Тогда положение уровня Ферми на поверхности определяется разностью:

$$(E_F - E_v)_s = h\nu_0 - \varphi_T \quad (9)$$

а электронное сродство вычисляется по формуле:

$$\chi = (E_{\text{вак}} - E_c)_s = h\nu_0 - E_g \quad (10)$$

Так как положение уровня Ферми в объеме определим, зная концентрацию носителей тока, то имеющиеся данные позволяют рассчитать всю энергетическую диаграмму поверхности полупроводников.

И в заключение можно отметить, что некоторые сведения можно получить о плотности поверхностных состояний из вычисления полного объемного заряда. Он должен быть равен отрицательному поверхностному заряду $\square$, который определяется по формуле Шотки:

$$\square = \sqrt{\frac{\xi \theta \varphi_0 (N_D - N_A)}{2\pi}} \quad (11)$$

где ξ – статистическая диэлектрическая постоянная, φ_0 – общий загиб зон, который равен $(E_v - E_{vs})$, N_D – концентрация доноров в полупроводнике, N_A – концентрация акцепторов.

Цель статьи: Рассмотрен метод фотоэмиссии для исследования: 1) спектрального распределения квантового выхода фотоэмиссии $Y(h\nu)$ и 2) энергетического распределения фотоэлектронов $N(E)$, при анализе экспериментальных результатов монокристаллов GaAs n-типа и концентрацией носителей тока от $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ до $1.05 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ для выяснения влияния состояния на поверхности на ее энергетические параметры.

Постановка задачи: Исследования проводились в нанометрическом сверхвысоковакуумном фотоэлектронном спектрометре [8] на поверхности образцов GaAs n-типа, физические параметры которых представлены: – концентрации носителей тока соответственно для каждого образца: $1 \cdot 10^{16} \text{ (см}^{-3}\text{)}$, $1,24 \cdot 10^{17} \text{ (см}^{-3}\text{)}$, $1,31 \cdot 10^{18} \text{ (см}^{-3}\text{)}$, $1,05 \cdot 10^{19} \text{ (см}^{-3}\text{)}$; подвижности образцов соответственно: $4350 \text{ (см}^2\text{/В·сек)}$, $4000 \text{ (см}^2\text{/В·сек)}$, $3200 \text{ (см}^2\text{/В·сек)}$, $2100 \text{ (см}^2\text{/В·сек)}$; удельные сопротивления: $1,16 \cdot 10^{-2} \text{ (Ом·см)}$, $1,24 \cdot 10^{-2} \text{ (Ом·см)}$, $1,47 \cdot 10^{-3} \text{ (Ом·см)}$, $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ (Ом·см)}$. Ориентация плоскостей контролировалась рентгеноструктурным методом, и отклонения от указанного направления не превышало 3° . У каждого из четырех ($1n \rightleftharpoons 4n$) исследованных образцов плоскости шлифовались и химически полировались. Все исследования были проведены в одинаковых

вакуумных условиях ($p = 2 \cdot 10^{-9}$ Торр), полученные результаты для всех образцов можно было сравнить между собой. Измерения проводились абсолютно при одинаковых условиях для всех образцов.

Результаты исследования

1. Спектральное распределение квантового выхода фотоэмиссии $Y(h\nu)$

Спектральные распределения квантового выхода фотоэмиссии в полулогарифмическом масштабе представлены на рис. 5. Измерения проведены в области энергий фотонов от 4,0 эВ до 5,38 эВ. Величины квантового выхода $Y(h\nu)$ в области энергий фотонов $4,80 \text{ эВ} \leq h\nu \leq 5,38 \text{ эВ}$ у исследованных образцов мало отличаются и принимают от $1,69 \cdot 10^{-4}$ до $7,2 \cdot 10^{-4}$ электрон/квант для образцов от 1н до 4н, концентрация носителей которых варьировала от $2 \cdot 10^{16}$ до $1,05 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ соответственно. Таким образом, квантовый выход воз-растал примерно в 1,6 раза, в то время как концентрация носителей тока возросла на три порядка.

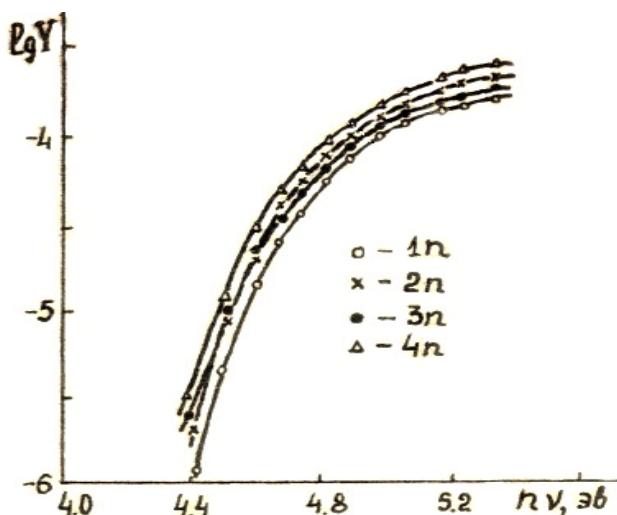


Рис. 5. Спектральные распределения квантового выхода фотоэмиссии для образцов GaAs с различной концентрацией носителей тока

Разброс величины квантового выхода фотоэмиссии $Y(h\nu)$, полученный повторными измерениями в одинаковых вакуумных условиях, не превышал 1 %.

Вид кривых спектрального распределения квантового выхода (рис. 5) во всей области спектра для всех образцов практически совпадает. В области энергий фотонов $h\nu$ вблизи границы фотоэмиссии квантовый выход возрастает быстрее, чем в области энергий квантов $h\nu > 4,8 \text{ эВ}$. На кривых спектрального распределения не наблюдается заметной структуры.

На рис. 6 представлены зависимости квантового выхода Y от $h\nu$. Как видно (рис. 6, а), в области энергий фотонов $4,7 \leq h\nu \leq 5,3 \text{ эВ}$

наблюдается линейная зависимость Y от $h\nu$. В области энергий $h\nu \geq 5,3 \text{ эВ}$ наблюдается отклонение квантового выхода от линейной зависимости в сторону меньших значений энергий, а в области энергий $h\nu \leq 4,7 \text{ эВ}$ – в сторону больших значений. Ход зависимости квантового выхода при энергии $h\nu < 4,7 \text{ эВ}$ подчиняется кубическому закону (рис. 6, б) и экстраполяция кривых спектрального распределения квантового выхода в этой области позволяет определить значения фотоэлектрического порога, т.е. значения фотоэлектронной работы выхода $\phi_{\text{ф}}$. Эти зависимости хорошо согласуются с данными работ [5, 6]

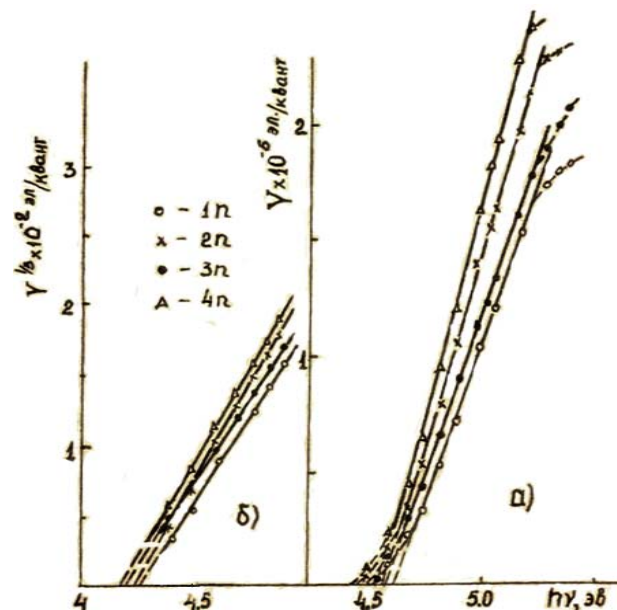


Рис. 6. Спектральные распределения квантового выхода фотоэмиссии: а – линейная зависимость; б – кубическая зависимость

Найденные таким образом значения порога фотоэмиссии $h\nu_0$ для всех образцов приведены в табл. 1 (столбец 6). Видно, что порог фотоэмиссии зависит от концентрации тока, уменьшаясь с увеличением последней, что хорошо согласуется с данными, полученными другими авторами.

Экстраполяция прямолинейного участка на кривых спектрального распределения дает значения порога энергий $h\nu'_0$ для прямых переходов. Эти значения приведены в столбце 7. Отметим, что $h\nu'_0$ также уменьшается от образца 1н до образца 4н.

Положения уровня Ферми в объеме приведены в столбце 3, а положение уровня Ферми на поверхности образцов (столбец 8) определялось по формуле (9) с помощью приведенных в таблице данных для порога фотоэмиссии $h\nu_0$ (столбец 6) и термоэлектронной работы выхода ϕ_T (столбец 5).

Таблиця 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ п/п	n (см ⁻³)	$(E_F - E_v)_s$ (эВ)	E_g (эВ)	φ_T (эВ)	$h\nu_0$ (эВ)	$h\nu'_0$ (эВ)	$(E_F - E_v)_s$ (эВ)	χ (эВ)	φ_0 (эВ)
1n	$1,30 \cdot 10^{16}$	1,32	1,40	4,07	4,26	4,64	0,19	2,86	1,13
2n	$1,24 \cdot 10^{17}$	1,37	1,40	4,04	4,24	4,60	0,20	2,84	1,17
3n	$1,31 \cdot 10^{18}$	1,43	1,40	4,02	4,20	4,58	0,18	2,80	1,25
4n	$1,05 \cdot 10^{19}$	1,48	1,40	3,99	4,18	4,56	0,19	2,78	1,29

Термоэлектронная работа выхода определялась по формуле $\varphi_T = \varphi_K - eV_K$ для образцов GaAs. Для этого производились измерения распределения фотоэлектронов по энергиям из поверхности серебра (Ag), а затем определяли работу выхода коллектора спектрометра φ_K . Результаты экспериментальных измерений дали значения работы выхода: для серебра $\varphi_{Ag} = 4,27 \pm 0,01$ эВ; для коллектора фотоспектрометра $\varphi_K = 4,43 \pm 0,01$ эВ. По этим значениям работы выхода определили сродство к электрону χ (формула 10) и загиб зон φ_0 (формула 8)

Электронное сродство (столбец 9) и термоэлектронная работа выхода (столбец 5) уменьшаются с увеличением концентрации носителей тока, в то время как положение уровня Ферми на поверхности образцов GaAs (столбец 8) для всех образцов было практически одинаково. Зависимость термоэлектронной работы выхода φ_T от концентрации носителей тока n хорошо согласуется с результатами, полученными другими авторами [9]. Изменение же сродства к электрону с увеличением концентрации носителей тока для образцов n-типа проводимости, насколько нам известно, обнаружено впервые и позволяет предположить, что при большой концентрации легирующей примеси в GaAs происходит либо изменение энергетического спектра электронов, который определяет электронное сродство, либо происходят вследствие легирующей примеси изменения на поверхности полупроводника. Изменение спектра электронов при изменении концентрации легирующей примеси для образцов GaAs n-типа действительно наблюдалось при изучении оптического спектра отражения [10].

Величина $(E_F - E_v)_s$ (табл. 1) не зависит от концентрации носителей тока n и имеет малое значение. Последнее указывает на то, что у образцов GaAs на поверхности существует загиб зон φ_0 . Величина φ_0 (столбец 10) при увеличении концентрации носителей тока возрастает. Большое значение загиба зон, по-видимому, объясняется наличием на поверхности полупроводника большой плотности поверхностных состояний в запрещенной зоне. Значительная плотность поверхностных состояний может быть обусловлена заполнением свободных поверхностных состояний электронами чужеродных атомов при травлении поверхности. Обработкой поверхности травлением можно значительно изменять загиб зон, вследствие чего изменяются физические свойства полупроводника в области пространственного заряда

2. Распределение электронов по энергиям $dY/dE(h\nu)$.

Энергетические распределения фотоэлектронов изучались для всех образцов при разных энергиях фотонов $h\nu$. Результаты таких измерений, в качестве примера для образца 1n, приведены на рис. 7. По оси абсцисс, наряду с энергией электронов, отложены значения задерживающего потенциала V_0 . По оси ординат отложено число вышедших фотоэлектронов на один квант в интервале энергий 1 эВ. Видно, что величина потенциала V_s , т.е. контактная разность потенциалов между эмиттером и коллектором V_K , не изменяется с изменением энергии фотонов, откуда следует, что φ_T не зависит от энергии фотонов, возбуждающих фотоэмиссию. Величина V_0 с изменением энергии фотонов изменяется, что указывает на изменение величины энергетического расстояния от уровня Ферми до того уровня, с которого происходит возбуждение фотоэлектронов.

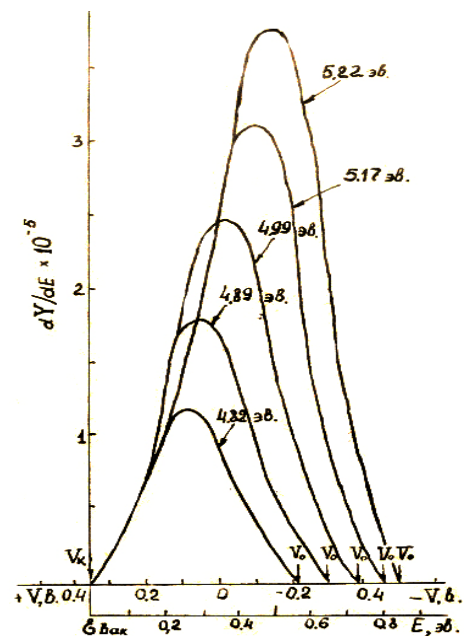


Рис. 7. Распределение фотоэлектронов по энергиям для образца 1n при разных значениях фотонов $h\nu$. На оси абсцисс (верхняя шкала) указаны значения задерживающего потенциала V_0 и потенциала насыщения V_K на нижней шкале указана энергия (начало отсчета энергии от уровня вакуума)

Из рис. 7 также следует, что с увеличением энергии фотонов увеличивается фотоэлектронная работа выхода, следуя линейному закону. Это показывает, что уравнение Эйнштейна должно быть записано в виде:

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - \varphi_{\phi}(h\nu)$$

Подобная зависимость фотоэлектронной работы выхода была получена Векслером и Соколовым [12] при рассмотрении фотоэмиссии в многоэлектронном приближении. Авторы дали новую интерпретацию соотношения Эйнштейна, согласно которой поглощение фотонов приводит к возбуждению не одного электрона, а всей системы электронов, и показали, что при учете взаимодействия между электронами работа выхода линейно увеличивается с увеличением частоты света, т.е. становится функцией от энергии фотонов.

Значения φ_{ϕ} , а также V_K и V_0 для рассматриваемых образцов приведены в табл. 2, из которой следует, что для всех образцов при одинаковых значениях энергии фотонов $h\nu$ потенциал V_0 одинаков. Это показывает, что во всех образцах фотоэлектроны возбуждаются из одинаковых состояний. Величина V_K с увеличением концентрации носителей тока возрастает при одинаковых энергиях фотонов $h\nu$, что свидетельствует об уменьшении фотоэлектронной работы выхода φ_{ϕ} с ростом концентрации.

В распределении фотоэлектронов по энергиям наблюдается один максимум, который с увеличением энергии фотонов смещается по энергетической шкале так, что $\Delta E_{\max} \neq \Delta h\nu$ (рис. 7). Это подтверждает, что наблюдаемый максимум обусловлен прямым переходом электронов из валентной зоны в зону проводимости. Анализ кривых энергетических распределений показывает, что переход с энергией 4,6 эВ происходит из валентной зоны вблизи Γ точки в направлении Σ . Величина полученного перехода хорошо согласуется с подобным переходом, обнаруженным при теоретическом расчете зонной структуры GaAs.

3. Влияние подсветки на фотоэмиссию из арсенида галлия.

Подсветка осуществлялась от лампы накаливания как неразложенным светом, так и светом, прошедшим через светофильтр КС-18. Интенсивность света подсветки изменялась с помощью нейтральных светофильтров. При подсветке измерялись как спектральные распределения квантового выхода, так и энергетические распределения фотоэлектронов. Как показали результаты эксперимента, при подсветке происходит увеличение квантового выхода фотоэмиссии вплоть до энергии фотонов $h\nu \leq 4,9$ эВ. При энергии фотонов $h\nu > 4,9$ эВ увеличение $Y(h\nu)$ при подсветке не наблюдалось. Эффект подсветки нагляднее проявляется не при рассмотрении спектрального распределения квантового выхода $Y(h\nu)$, а при рассмотрении вольтамперных характеристик $I = f(V)$, где V – задерживающий потенциал на коллекторе сферического анализатора. Так как фототок насыщения $I_S \sim Y(h\nu)$ то производя измерения фототока насыщения, можно выяснить причину указанного увеличения при подсветке.

Эксперимент показал, что при подсветке увеличивается фототок насыщения I_S и наблюдается смещение вольтамперных характеристик в сторону увеличения потенциала V_K , т.е. контактная разность потенциалов между эмиттером и коллектором возрастает. Увеличение фототока насыщения

$\Delta I_S = I_{Sn} - I_S$, а также величины смещения ΔV_K зависят от энергии фотонов $h\nu$, возбуждающих фотоэмиссию. С увеличением энергии фотонов $h\nu$ значения ΔI_S и ΔV_K уменьшаются. Зависимость относительного увеличения фототока насыщения

$$\xi = \frac{\Delta I_S}{I_S} = \frac{I_{Sn} - I_S}{I_S} \quad \text{при подсветке от энергии}$$

фотонов $h\nu$ показана на рис. 8а. Величина относительного увеличения $\Delta I_S/I_S$ фототока насыщения с увеличением энергии фотонов уменьшается. Максимальное увеличение наблюдается при пороге фотоэмиссии $h\nu_0$. Значения относительного увеличения фототока зависело от концентрации носителей тока и было тем больше, чем меньше концентрация, достигая у образца 1п величины $\sim 75\%$.

Таблица 2

hν	4,68 эВ			4,82 эВ			4,89 эВ			4,99 эВ			5,15 эВ			5,22 эВ		
	V_K (В)	V_0 (В)	φ_{ϕ} (эВ)	V_K (В)	V_0 (В)	φ_{ϕ} (эВ)	V_K (В)	V_0 (В)	φ_{ϕ} (эВ)	V_K (В)	V_0 (В)	φ_{ϕ} (эВ)	V_K (В)	V_0 (В)	φ_{ϕ} (эВ)	V_K (В)	V_0 (В)	φ_{ϕ} (эВ)
1п	0,37	0,1	4,21	0,37	0,22	4,23	0,37	0,27	4,25	0,37	0,35	4,27	0,37	0,51	4,28	0,37	0,55	4,30
2п	0,40	0,1	4,18	0,40	0,22	4,220	0,40	0,28	4,21	0,40	0,36	4,23	0,40	0,51	4,25	0,40	0,56	4,26
3п	0,42	0,1	4,16	0,42	0,22	4,18	0,42	0,28	4,19	0,42	0,37	4,20	0,42	0,50	4,24	0,42	0,55	4,25
4п	0,45	0,1	4,13	0,45	0,22	4,15	0,45	0,27	4,17	0,45	0,36	4,18	0,45	0,50	4,21	0,45	0,56	4,22

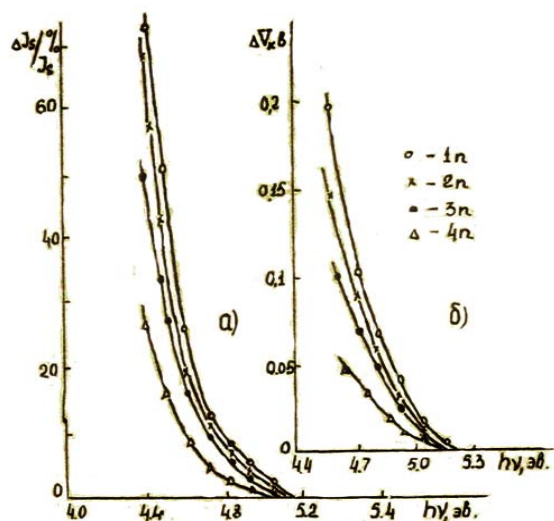


Рис. 8. а – Зависимость относительного увеличения фототока насыщения от энергии фотонов, вызывающих фотоэмиссию; б – за висимость смещения потенциала насыщения от энергии фотонов

Такое значительное изменение фототока указывает на возможность его модуляции подсветкой, что может найти практическое применение в работе фотокатодов при изучении световых полей.

Зависимость смещения вольтамперных характеристик при подсветке ΔV_K от энергии фотонов $h\nu$ для изученных образцов представлена на рис. 8, б. Как видно, величина ΔV_K для образца 4n была небольшой и для определения ее значения проводились многократные повторные измерения. Но ход зависимости ΔV_K у всех образцов от энергии фотонов имел одинаковый характер.

Смещение потенциала ΔV_K обусловлено увеличением контактной разности потенциалов. Увеличение последней указывает на уменьшение термоэлектронной работы выхода ϕ_T . Изменение термоэлектронной работы выхода ϕ_T может быть вызвано либо изменением электронного сродства $\Delta\chi$ на поверхности GaAs, либо изменением загиба зон $\Delta\phi_0$ либо изменением одной величины и другой одновременно.

Для выяснения причины уменьшения термоэлектронной работы выхода ϕ_T рассмотрим энергетические распределения фотоэлектронов $N(E)$ при подсветке и без нее (рис. 9). Видно, что при подсветке смещаются как высокоэнергетические края распределения H'_1 , так и низкоэнергетические края L'_1 и величины смещения одинаковы, т.е. $\Delta H'_1 = \Delta L'_1$ и составляет 0,1 эВ. Как отмечено выше (рис. 4), величина ΔH соответствует изменению загиба зон $\Delta\phi_0$, а величина ΔL – изменению термоэлектронной работы выхода $\Delta\phi_T$. Таким образом, в нашем случае изменение работы выхода обусловлено только изменением загиба зон. Значит,

при воздействии подсветки на фотоэмиссию из полупроводников происходит изменение термоэлектронной работы выхода только вследствие изменения загиба зон.

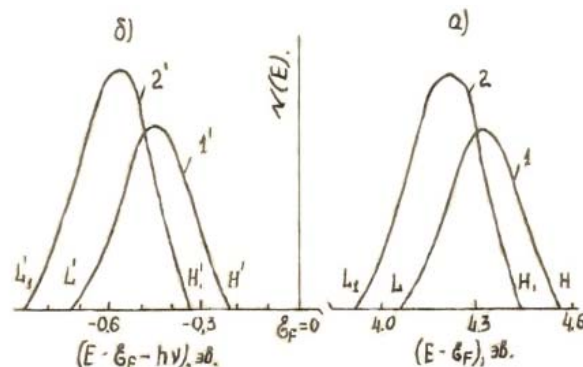


Рис. 9. Энергетические распределения фотоэлектронов для образца 1n при $h\nu = 4,68 \text{ эВ}$; а – распределения фотоэлектронов, вышедших в вакуум; б – смещенные энергетические распределения на величину энергии фотона $h\nu$. Кривые: 1 – измеренные без подсветки; 2 – с подсветкой

Изменение загиба зон не вызывает изменения фотоэлектронной работы выхода ϕ_ϕ для электронов, возбуждаемых у самой поверхности (рис. 4), но уменьшает ее для фотоэлектронов, возбуждаемых в объеме. Максимальное уменьшение ϕ_ϕ будет для электронов возбуждаемых на глубине, сравнимой с областью изменения загиба зон.

Объемный характер фотоэмиссии объясняет наблюдаемую при подсветке зависимость увеличения фототока насыщения I_S и смещения потенциала задержки фотоэлектронов V_K от энергии $h\nu$ возбуждающих фотоэмиссию фотонов. Эти зависимости обусловлены коэффициентом оптического поглощения, который увеличивается с увеличением энергии фотонов [10]. Чем больше коэффициент оптического поглощения α , тем меньше глубина l , с которой происходит возбуждение фотоэлектронов ($l \sim 1/\alpha$), и тем меньше увеличение фототока насыщения при подсветке.

4. Фотоэмиссия из GaAs при адсорбции бария.

Для выяснения влияния адсорбции бария на фотоэмиссию из арсенида галлия, проведены измерения как спектрального распределения квантового выхода $Y(h\nu)$, так и распределения фотоэлектронов по энергиям $N(E)$. Сравнение этих результатов измерений с результатами измерений для образцов без покрытия барием, позволило выяснить влияние покрытия на изменения энергетических параметров поверхности арсенида галлия и его структуры зон в объеме и в приповерхностном слое.

Для каждого образца проведены измерения спектрального распределения квантового выхода фотоэлектронов при различных степенях покрытия θ

в интервале $0 \leq \theta \leq 1$. Степень покрытия θ для образцов определяли по времени напыления. Градуировка источника напыления производилась по методу Толланского. Монослой покрытия определяли по минимуму фотоэлектронной работы выхода $h\nu_0$ (рис. 10).

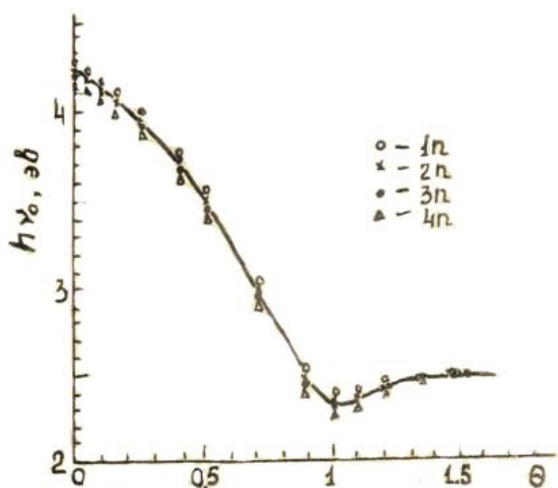


Рис. 10. Зависимость порога фотоэмиссии $h\nu_0$ от степени покрытия θ . Точки на кривой соответствуют значениям порога фотоэмиссии для указанных образцов. Минимум порога соответствует степени покрытия одного монослоя

Зависимость порога фотоэмиссии $h\nu_0$ от степени покрытия θ для всех исследованных образцов почти одинакова. Минимум находится в пределах 2,3-2,4 эВ; при дальнейшем росте степени покрытия θ порог фотоэмиссии $h\nu_0$ возрастает и достигает 2,52 эВ (работа выхода Ba).

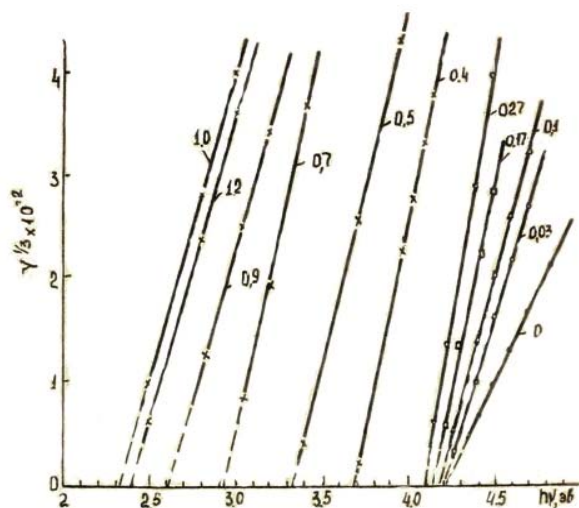


Рис. 11. Кубическая зависимость спектрального распределения квантового выхода фотоэмиссии для образца 3n при покрытии его поверхности Ba . Степень покрытия указана на рисунке

Изменения, наблюдаемые в зависимости $Y^{1/3}(h\nu)$ от степени покрытия θ (рис. 11) хорошо согласуются с данными по относительному увеличению квантового выхода $\Delta Y/Y$ от степени покрытия [9].

Возможно, что незначительное уменьшение порога фотоэмиссии $h\nu_0$ и увеличение $\Delta Y/Y$ при $\theta \leq 0,3$ обусловлено особенностями адсорбции Ba на поверхности $GaAs$. При малых количествах адсорбированных атомов Ba на поверхности $GaAs$ валентные электроны бария, заполняя поверхностные состояния подложки полупроводника вызывают образование двойного слоя заряда на поверхности и в силу этого поверхность становится более электроположительной, что приводит к изменению загиба зон и смещению уровня Ферми к вершине валентной зоны. При этом происходит его стабилизация на поверхности [4].

При более значительных степенях покрытия θ , уменьшение порога фотоэмиссии $h\nu_0$ обусловлено уменьшением сродства к электрону χ . Это приводит к увеличению вероятности выхода электронов с меньшей работой выхода за пределы эмиттера и более значительному росту $\Delta Y/Y$ для фотоэлектронов, возбужденных с меньшими значениями энергии фотонов $h\nu$.

Для более глубокого выяснения этого вопроса обратимся к рассмотрению распределения фотоэлектронов по энергиям $N(E)$. Изучение распределения электронов по энергиям для образцов $GaAs$ производилось: а) $\square$ при различных степенях покрытия Ba для определенных значений энергии фотонов $h\nu$. Значения энергии фотонов в этом случае были выбраны: 5,17 эВ, 4,99 эВ, и 4,68 эВ., так эти линии спектра ртутной лампы достаточно интенсивны; б) $\square$ при различных энергиях фотонов для определенной степени покрытия.

Зависимости распределений фотоэлектронов от степени покрытия представлены на рис. 12. При отсчете по шкале энергий учитывалось изменение загиба зон, вызванное влиянием покрытия барием. Поэтому кривые представлены с поправкой на загиб зон. Сопоставление кривых на рис. 12, а и 12, б показывает, что при увеличении степени покрытия уменьшается фотоэлектронная работа выхода и в энергетических распределениях, наряду с максимумом, имеющимся в распределении для не покрытого образца, появляются дополнительные максимумы в области меньших энергий (рис. 12б). Так на кривой 2, снятой при энергии фотонов 4,98 эВ наряду с максимум 4,4 эВ, появляются максимумы с энергиями 4,6 эВ, 4,8 эВ и 3,2 эВ. Анализ этих распределений показал, что $\Delta E_{max} \neq \Delta h\nu$. При снижении порога фотоэмиссии появляется возможность исследовать зонную структуру полупроводника в более широком интервале энергий. При этом в энергетических распределениях фотоэлектронов доля медленных электронов возрастает. Так при сравнении кривых 4 на рис. 12, а рис. 12, б видно, что при уменьшении порога основной вклад в фотоэмиссии дают медленные электроны.

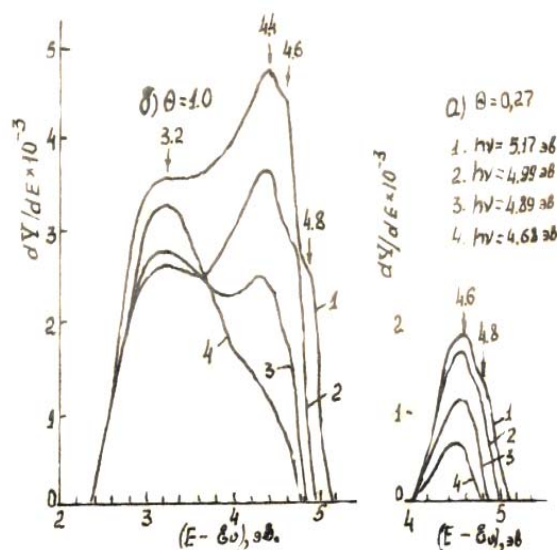


Рис. 12. Распределение фотоэлектронов по энергиям для образца In при покрытии барием: а $\theta=0,27$; б $\theta=1$

Представленные на рис. 12 данные показывают, что структура, наблюдаемая до адсорбции Ва, сохраняется, но, кроме того, появляется дополнительная структура; пики смещаются с изменением энергии фотонов, и при этом изменяется и их интенсивность. Это позволяет сделать вывод о том, что ад-сорбируемые атомы Ва не изменяют объемной структуры зон GaAs и дают возможность изучить структуру зон в более широком интервале энергий. Наблюдаемые оптические переходы являются прямыми и их

энергии хорошо согласуются с данными других источников [9].

Изучение влияния покрытий Ва на энергетическую структуру поверхности полупроводников показало, что при малых степенях покрытия ($\theta \leq 0,3$) наблюдается смещение высокоэнергетического края кривых распределения. Величина этого смещения достигает максимума при покрытии $\theta \leq 0,27$ (рис. 13). Видно, что смещение направлено в сторону уменьшения энергии (осчет энергии от уровня Ферми). При покрытии $\theta \leq 0,27$ наблюдается стабилизация высокоэнергетического края H и дальнейшее уменьшение работы выхода связано со смещением низкоэнергетического края распределений. Согласно работе [6] изменение высокоэнергетических краев в распределении обусловлено изменением в загибе зон.

Характер смещения энергетических распределений (рис. 13) показывают, что при малых степенях покрытий (до $\theta \leq 0,3$) наблюдается уменьшение загиба зон. Величина этого изменения в загибе зон φ_0 составляла $\approx 0,2$ эВ и уменьшалась с увеличением концентрации носителей тока. Изменение в загибе зон при больших покрытиях не было замечено, и поэтому изменение фотоэлектронной работы выхода (порога фотоэмиссии $h\nu_0$) при больших θ полностью вызвано уменьшением сродства к электрону. При малых же покрытиях изменения порога фотоэмиссии вызвано уменьшением загиба зон.

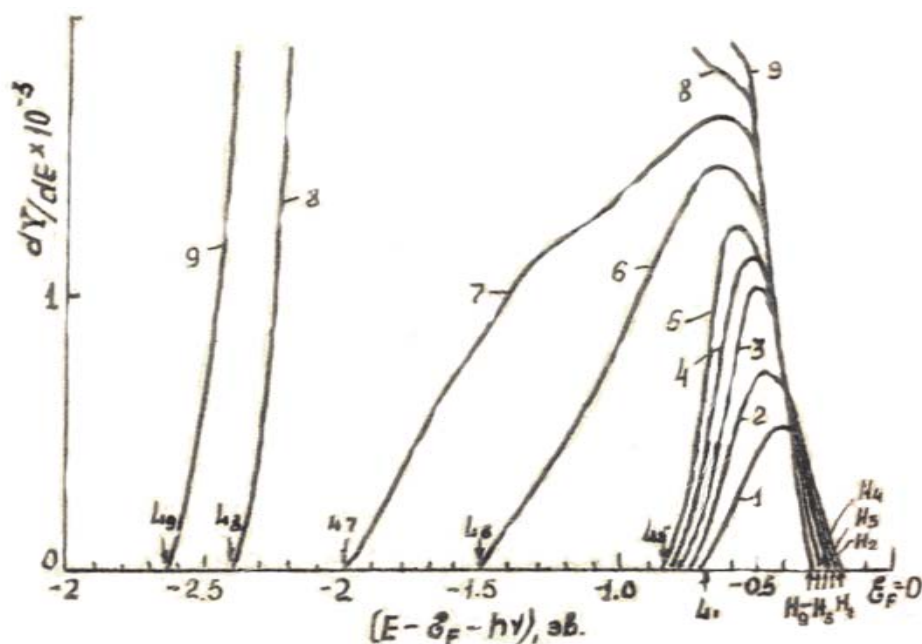


Рис. 13. Смещенные на $h\nu$ энергетические распределения фотоэлектронов для образца 2n ($h\nu = 4,68$ эВ) при разной степени покрытия Ва; кривые: 1 $\square$ $\theta=0$ 2 $\theta=0,03$ 3 $\theta=0,1$ 4 $\theta=0,175$ 5 $\theta=0,27$ 6 $\theta=0,50$ 7 $\theta=0,7$ 8 $\theta=0,9$ 9 $\theta=1,0$

Таблиця 3

Степень покрытия θ Параметры наповерхности GaAs	1n		2n		3n		4n	
	$\theta = 0,27$	$\theta = 0,1$	$\theta = 0,27$	$\theta = 0,1$	$\theta = 0,27$	$\theta = 0,1$	$\theta = 0,27$	$\theta = 0,1$
$h\nu_0$ (эВ)	4,11	2,4	4,09	2,26	4,04	2,34	4,02	2,3
Φ_T (эВ)	3,73	2,02	3,74	2,01	3,74	2,04	3,74	2,02
$(E_F - E_{v,s})$ (эВ)	0,38		0,35		0,3		0,28	
χ (эВ)	2,71	1,0	2,69	0,96	2,64	0,04	2,62	0,9
φ_0 (эВ)	0,91	0,91	0,99	0,99	1,07	1,07	1,12	1,12
$\Delta\varphi_0$ (эВ)	0,19		0,15		0,1		0,09	

Энергетические параметры, вычисления спектральных распределений квантового выхода и энергетических распределений для исследованных образцов при покрытии их поверхности Ва, представлены в таблице 3 результаты приведены только для двух значений θ ($\theta = 0,27$ и $\theta = 0,1$). Как видно из представленных данных, уровень Ферми на поверхности $(E_F - E_{v,s})$ у исследованных образцов стабилизируется при покрытии Ва при $\theta = 0,27$ монослоя и дальнейшее увеличение степени покрытия не приводит к существенным изменениям в его положении относительно уровня валентной зоны для каждого образца.

Сродство к электрону χ при оптимальном покрытии составляло величину $0,9 \div 1,0$ эВ и уменьшалось с увеличением концентрации носителей тока, по этому квантовый выход для образцов 3n и 4 был выше, чем для образцов 1n и 2n при покрытиях поверхностей Ва.

При адсорбции покрытий бария загиб зон φ_0 уменьшался, а величина уменьшения загиба зон $\Delta\varphi_0$ обусловлена этим покрытием, для исследованных образцов хорошо согласуется с обнаруженным изменением $\Delta\varphi_0$ при подсветке. В обоих случаях максимальное изменение значение загиба зон совпадают.

Из приведенных данных следует, что при малых концентрациях атомов бария на поверхности полупроводника происходит изменение в области пространственного заряда и величина загиба зон уменьшается при наличии на поверхности атомов бария с поверхностной плотностью порядка $1,5 \cdot 10^{14}$ см⁻² ($\theta = 0,27$) наблюдается стабилизация уровней Ферми. Стабилизация положения уровней Ферми относительно верхнего уровня валентной зоны на поверхности GaAs приводит к тому, что при дальнейшем увеличении степени покрытия θ изменения в области пространственного заряда не наблюдается.

При повышении степени покрытия $\theta > 0,3$ термоэлектронная работа выхода снижается в следствии уменьшения только сродства к электрону χ .

Положение уровня Ферми на поверхности до адсорбции бария у образцов 1n, 2n, 3n, 4n было одинаковым (таб. 1), после адсорбции бария

наблюдались некоторые отличия в положении уровня Ферми относительно краёв зон для образцов 1n и 2n по сравнению с этим положением для 3n и 4n (табл. 3) это отличие, возможно, обусловлено различной кристаллографической ориентацией граней, на которой производилась адсорбция бария.

Выводы: Арсенид галлия является перспективным полупроводниковым материалом в микроэлектронике. Катоды, созданные на основе GaAs стабильны в работе, обладают высокой чувствительностью и избирательностью. Дальнейшее изучение структурных и энергетических параметров кристаллов GaAs значительно влияет на технологии изготовления эффективных фотокатодов.

Л и т е р а т у р а

1. Тамм И. Е. Собственные (т.е. не связанные дефектами) поверхностные состояния, локализованные у поверхности кристалла и свободно распространяющиеся вдоль нее. // Тамм И. Е. / ЖЭТФ, 1933. №3, с.34 – 59.
2. W. Shokly On the Surface States Associated with Periodic Potentia. // William Shockley/ Phys. Rev, 1939. 56, p. 317 – 342.
3. J. Bardeen Surface and Rectification at a Metal Semiconductor Contact. // John Bardeen/ Phys. Rev. 1947, 71 p. 717 – 725.
4. 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.
5. G. Q. Gobely, F. G. Allen Photoelectric Properties of Cleaved GaAs, GaSb, InAs and InSb Surfaces; Comparison with Si and Ge. // G. Q. Gobely, F. G. Allen / Phys. Rev. 1965, 137. – A245–A249.
6. T.E Fischer Determination of Semiconductor Surface properties by means of photoelectric emission// Fischer T.E. // North-Holland Publishing Co., Fmgsterdam, Surface Science, 1969, 13 – p. 30 – 51.
7. D. Redfield Theory for the Photoemission from a Space-Charge region of a Semiconductor.// D. Redfield / Surf. Sci., 1969. 124 p. 1809–1820.
8. Волошин М. А., Удовиченко С. О., Черникова И. Д. и др. Сверхвысоковакуумный фотоэлектронный спектрометр для исследования поверхностных свойств твердых тел // М. А. Волошин, С. О. Удовиченко, И. Д. Черникова, Н. Г. Черников / Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації, 2011.— №2(24). с.14-19.

9. Бова А. Р., Волошин М. А., Латиш О. Б. и др. Влияние структурных изменений на поверхности на энергетический спектр электронов в арсениде галлия // А.Р. Бова, М.А. Волошин, О.Б. Латиш, И.Д. Черникова, Н. Г. Черников / Вісник СХУ ім. В. Даля, 2010. — №12 (154), ч. 2. — с. 10-15.
10. В.С. Фоменко Эмиссионные и адсорбционные свойства веществ и материалов (справочник).// Фоменко В.С., Подчерняева И.А. / изд-во Наукова думка. Киев.— 1985. с. 620.
11. Оптические свойства полупроводников (Полупроводниковые соединения A^3B^3).//под редакцией Уильяма Виллардсона / изд-во Мир. Москва.— 1970. с. 560.
12. А.З. Векслер, А.В. Соколов К многоэлектронной теории фотоэффекта в кристаллах. // Векслер А.З., Соколов А.В./ ФММ, 1959. №7 — с. 11–20.

References

1. Tamm I. E. Sobstvennyye (t.e. ne svyazannyye defektami) poverhnostnyye sostoyaniya, lokalizovannyye u poverhnosti kristalla i svobodno rasprostranyayushiesya vdol nee. //Tamm I. E./ ZhETF, 1933. #3, s.34
2. W. Shockly On the Surface States Associated with Periodic Potentia. //William Shockley/ G. Q. Gobely, F. G. Allen, 56, p. 317 – 342.
3. J. Bardeen Surface and Rectification at a Metal Semiconductor Contact. //John Bardeen/ Phys. Rev. 1947, 71 p. 717 – 725.
4. 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.
5. G. Q. Gobely, F. G. Allen Photoelectric Properties of Cleaved GaAs, GaSb, InAs and InSb Surfaces; Comparison with Si and Ge. // G. Q. Gobely, F. G. Allen / Phys. Rev. 1965, 137. – A245–A249.
6. T. E Fischer Determination of Semiconductor Surface properties by means of photoelectric emission//Fischer T. E./North-Holland Publishing Co., Fmgsterdam, Surface Science, 1969, 13 – p. 30 – 51.
7. D. Redfield Theory for the Photoemission from a Specie-Charge region of a Semiconductor.// D. Redfield / Surf. Sci., 1969. 124 p. 1809–1820.
8. Voloshin M. A., Udovichenko S. O., Chernikova I. D. i dr. Sverhvisokovakuumnyiye fotoelektronnyiye spektrometr dlya issledovaniya poverhnostnykh svoystv tverdykh tel // M. A. Voloshin, S. O. Udovichenko, I. D. Chernikova, N. G. Chernikov / Pratsi Luganskogo viddilennya Mizhnarodnoyi Akademiyi Informatyzatsiyi, 2011
9. Bova A. R., Voloshin M. A., Latish O. B. i dr. Vliyanie strukturnykh izmeneniy na poverhnosti na energeticheskyy spektr elektronov v arsenide galliya // A. R. Bova, M. A. Voloshin, O. B. Latish, I. D. Chernikova, N. G. Chernikov / Visnik SNU Im. V. Dallya, 2010.
10. V. S. Fomenko Emissionnyye i adsorbtsionnyye svoystva veshchestv i materialov (spravochnik).// Fomenko V. S., Podchernyaeva I. A. / izd-vo Naukova dumka. Kiev.
11. Opticheskie svoystva poluprovodnikov (Poluprovodnikovyye soedineniya A^3V^3).//pod redaktsiyey Uilyama Villardsona / izd-vo Mir. Moskva.
12. A. Z. Veksler, A. V. Sokolov K mnogoelektronnoy teorii fotoeffekta v kristallakh. // Veksler A. Z., Sokolov A. V./ FMM, 1959. #7

Кулишев О.М., Черникова І.Д., Черников М.Г. Вплив стану поверхні напівпровідників на роботу фотодетекторів.

Відомо, що час від часу встановилися розділи науки переживають періоди стрибкоподібного розвитку, обумовлені появою якісно нових ідей, приладів і методів вимірювань. Прикладом тому є - оптична спектроскопія, яка з появою лазерних джерел світла значно змінилася. Поряд з інтенсивним розвитком класичних напрямків виникли принципово нові методи та програми. Серед нових напрямків особливе місце займає статистичний і спектральний аналіз світлових полів за допомогою фотодетекторів - спектроскопія оптичного зміщення. Експериментальні методи спектроскопії оптичного зміщення, зокрема дослідження за статистикою фотозвітів, викликали перед експериментаторами певні вимоги до ефективності фотодетекторів. У даній роботі розглядаються методи і способи отримання ефективних фотодетекторів.

Ключові слова: фотоємність, квантовий вихід, розподіл електронів по енергіях, спектральний аналіз, робота виходу, електронне спорідненість, загин зон, напівпровідники, напівпровідниковий фотодетектор.

Kulyshov A.M., Chernikova I.D., Chernikov N.G., Influence condition of the surface semiconductor to work of photodetector

We know that from time to time established branches of science are experiencing periods of abrupt, caused the emergence of a qualitatively new ideas, devices and measurement methods. An illustrative example of this - optical spectroscopy, which with the advent of the world changed dramatically laser sources. Along with the intensive development of the classic areas of any fundamentally new methods and applications. Among the new areas occupies a special place statistical and spectral analysis of the light fields with the help of photodetectors - optical mixing spectroscopy. Experimental methods of optical mixing spectroscopy, in particular studies on photo- statistics, experimenters have caused to specific requirements for the efficiency of photodetectors. This paper discusses the methods and processes for the preparation of efficient photodetectors.

Keywords: photoemission quantum yield, the electron energy distribution, spectral analysis, the work function, electron affinity, bend zones, semiconductors, semiconductor photodetector.

Кулишев Олександр Михайлович – студент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк)

Черникова Ірина Дем'янівна – ст. викл. кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк). chernikova_i_d@ukr.net

Черников Микола Григорійович – к.фіз.-мат.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк). Chernikov_N_G@ukr.net

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

УДК 621.9.048

РОЗРОБКА МЕТОДУ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИРОБНИЦТВА АБРАЗИВНИХ ГРАНУЛ І ПРИСТРОЮ ДЛЯ ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЇ

Шумакова Т.О., Осипов В.І.

DEVELOPMENT OF METHODS FOR COMPUTER-AIDED MANUFACTURING OF ABRASIVE GRAINS AND A DEVICE FOR ITS IMPLEMENTATION

Shumakova T., Osipov V.

У статті проаналізовано методи і пристрої для автоматизованого виробництва абразивних гранул певної геометричної форми та запропоновано шляхи удосконалення конструкції пристроїв для виготовлення гранул в формі пірамід, що мають в основі не опуклий шестикутник.

Ключові слова: метод лиття, абразивна гранула, автоматизація процесу виробництва, підвищення продуктивності.

Вступ. На сьогоднішній день, в умовах ринкової економіки, велике значення надається підвищенню конкурентоспроможності продукції. Одним із значних чинників, що впливають на остаточну вартість продукції промислового підприємства є якість та ціна інструменту, що використовується в процесі обробки продукції. Якщо мова йде про операції очищення, шліфування або полірування деталей складної конфігурації, то найчастіше використовуються методи вібраційної обробки в середовищі вільних абразивів, галтування, вібро-шпіндельної, вібро-центробіжної обробки та ін. В якості інструменту для всіх перерахованих випадків використовуються абразивні гранули (в деяких джерелах - галтувальні тіла). Нажаль на сьогодні немає вітчизняного підприємства, яке б серійно виготовляло абразивні гранули і, найчастіше, українські виробники закуповують їх в Росії (Московський абразивний завод, див. рис. 1, а), або в Німеччині (фірма RÖSLER, рис. 1, б).

Метою статті є розробка методу автоматизованого виготовлення абразивних гранул і конструкції пристрою для його реалізації.

Матеріали та результати дослідження. На сьогоднішній день існують кілька методів автоматизованого виробництва абразивних гранул, описані в роботах [1–4]. Так автор роботи [1], вказує, що абразивні гранули на керамічному

зв'язуванні на виробництві найчастіше отримують методами видавлювання або пресування. Виготовлення складається з чотирьох послідовних етапів: готування суміші, формування, сушіння та обпалювання в електричній печі (рис. 2). В обох випадках формувальна маса отримується тривалим перемішуванням різних скла-



а



б

Рис. 1. Приклади, що серійно виготовляються:
а – Московським абразивним заводом;
б – фірмою RÖSLER

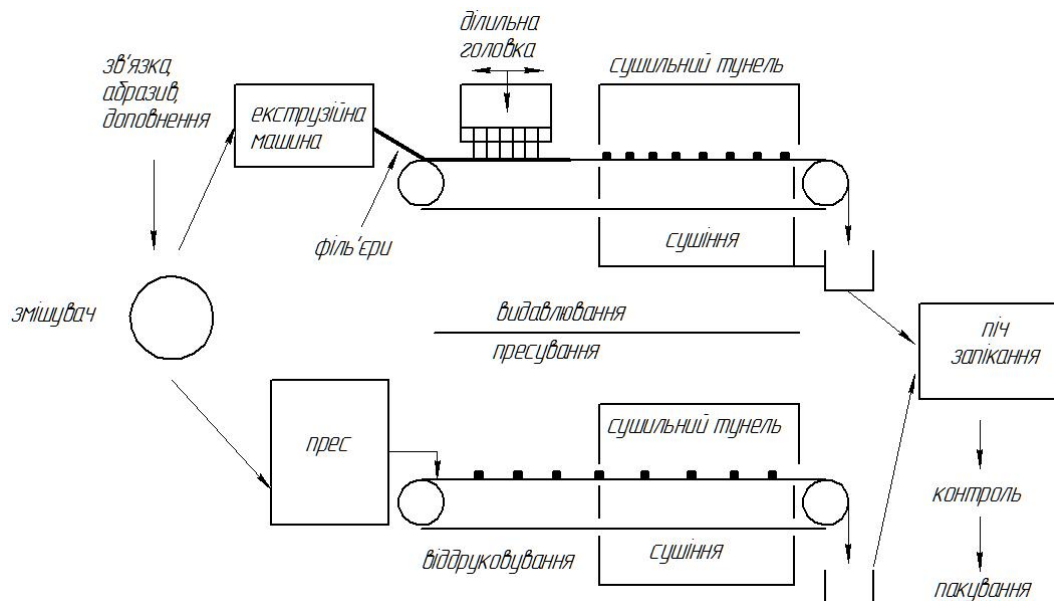


Рис. 2. Методи виготовлення абразивних гранул на керамічному зв'язуванні [1]

дових: глини, абразивних зерен і різних доповнень, які добре впливають на перемішування, обпалювання й наступне зв'язування. Перемішана маса переміщується в екструдер, який видавлює її через філь'єру. Операція екструзії або волочіння, як вказують автори роботи [1], гарантує безперервне видавлювання маси (майбутніх абразивних гранул) з перетином у формі філь'єри. Філь'єра в чисельних горизонтальних проходах робить певне число паралельних стрічок, що потрапляють на конвеєр, який рухається з певною швидкістю. На самому конвеєрі є поділ на велику кількість елементів.

Принципи описаних в [1] методів рівнозначні та загальноприйняті також для виробництва гранул на полімерному зв'язуванні. Процеси виробництва формованих абразивних гранул на полімерному зв'язуванні ті ж, що й для різних типів смол, при цьому послідовність фаз полягає в ретельному змішуванні абразиву й смоли, після чого здійснюється заливання, що супроводжується реакцією, яка приводить до затвердіння, з наступним вилученням з форми, контролем і впакування [1]. Особливість пластичних смол полягає в тому, що якість процесу виготовлення гранул пов'язана із тривалістю початку реакції, а також із тривалістю між початком реакції й кінцем заливання. Ці процеси повинні відповідати встановленим вимогам, при цьому композиційне змішування здійснюється у два етапи: первинне змішування між смолою й абразивними зернами, тривалість якого не лімітується, з послідовним дозованим введенням каталізатора, який викликає початок реакції.

Автором роботи [2] було запропоновано пристрій для автоматизованого виготовлення абразивних гранул (рис. 3). Даний пристрій дозволяє отримувати гранули в формі тетраедра й здійснює повний цикл їх виготовлення, починаючи від завантаження суміші у філь'єру приводного ножа, до

сушіння й вивантаження готових гранул. Даний метод виготовлення гранул є спробою створення пристрою для автоматизованого виготовлення абразивних гранул певної форми. Його сутність полягає в наступному – спочатку в порожнину приводного барабану з системою змащування подається суміш і проводиться обертання на крок. З філь'єри в приводний ніж подається постійний об'єм абразивної суміші. Приводний ніж, здійснюючи оберт на крок відрізає зайвий обсяг суміші. Потім система ТВЧ здійснює процес полімеризації таким чином: форсунка, нагрі-

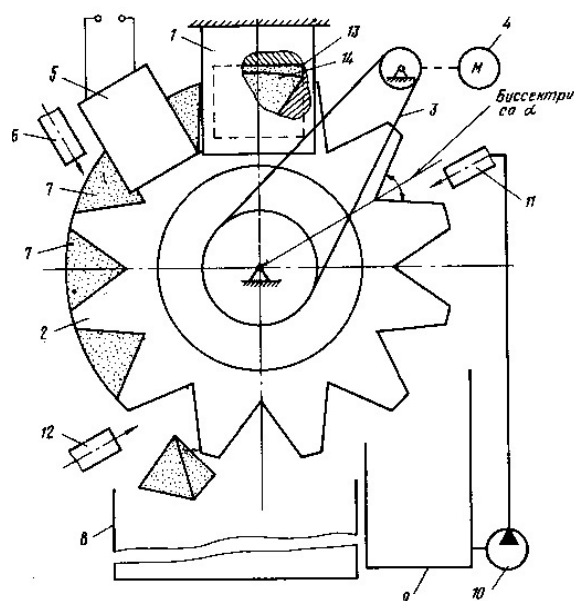


Рис. 3. Пристрій для пресування абразивних гранул у формі тетраедра [2]: 1 – філь'єра; 2 – приводний ніж; 3 – клиноремінна передача; 4 – електродвигун; 5 – індуктор ТВЧ; 6 – форсунка; 7 – гранули; 8 – бункер; 9 – бак зі змащувальним матеріалом; 10 – насос; 11, 12 – форсунки; 13 – головна порожнина; 14 – додаткова конічна порожнина

ваючи порожнину ножа з гранулою, відокремлює її від барабану і, звільняючись, вона випадає в бункер-накопичувач. Потім відбувається підготовка порожнини ножа до наступного завантаження абразивної суміші. Цикл повторюється.

Недоліками конструкції даного пристрою є засмічення порожнини барабану через недостатнє очищення від суміші в процесі експлуатації. Засмічення барабану буде приводити до втрати форми гранул, що призведе до великої кількості браку, а також до непередбачених зупинок пристрою для його очищення. Також істотним недоліком конструкції системи подачі суміші є те, що при її застосуванні витрачається велика кількість кошової абразивної суміші, оскільки частина суміші призначена для зрізання. Ефективність застосування системи ТВЧ на операції полімеризації автором на практиці не підтверджена, і є теоретичною.

Недоліком технологічності описаного пристрою є розмір кута при вершині загостреного диска, який дорівнює $\arcs \cos 1/3$, що становить $70,5^\circ$, крім того, гранули, виконані з кутом при вершині більше ніж $45 - 60^\circ$, за результатами досліджень, наведених в [3] не забезпечують якісну обробку деталей складної конфігурації.

У роботі [4] запропонований інший метод автоматизованого виготовлення гранул відбитком (рис. 4). Його сутність полягає в тому, що приводний, ніж обертаючись навколо своєї осі, залишає на стрічці абразиву, що безперервно подається на конвеєр, відбитки, які відповідають формі майбутніх гранул, з наступною полімеризацією цих гранул [4], що на думку авторів, дозволяє отримувати їх певну правильну геометричну форму. Конструкція пристрою складається з: приводного ножа, барабану, конвеєрної стрічки, системи подачі суміші й системи полімеризації. Нажаль, в роботі [4] не описано конструктивного принципу роботи окремих вузлів, що не дозволяє оцінити ефективність їх застосування. Також автором не зазначено період полімеризації гранул, що ставить під питання ефективність даного методу й самого пристрою. Не враховано, також, засмічення приводного ножа, що

буде призводити до браку та необхідності зупинок для технічного огляду й очищення обладнання. Даний пристрій також є неефективним і через перевитрату кошової абразивної суміші, яка залишається на приводному ножі й конвеєрній стрічці після відсікання відбитку. В наслідок цього зайва суміш потрапляє до накопичувального бункера, що призводить до необхідності здійснення додаткової операції сепарації гранул [4].

Нажаль, на сьогоднішній день на території України найпоширенішими є ручні методи виготовлення гранул, і використовуються вони тільки в дослідницьких цілях. Здійснені спроби створення пристроїв для автоматизованого виробництва гранул не знайшли свого реального застосування й не перейшли від проектів до реального використання у виробничих умовах. Залишається не вирішеним питання впровадження ефективного пристрою для виготовлення гранул, що дозволило б розв'язати питання імпорту кошового й малоефективного інструменту для вібраційної, гальувальної, вібро-шпиндельної, вібро-центробіжної та інших методів обробки деталей складної конфігурації в середовищі вільних абразивів на оздоблювально-зачисних операціях.

Для вирішення даної проблеми, за допомогою САПР КОМПАС-3D V16 було спроектовано пристрій АГ-1, що дозволяє здійснювати повний цикл виробництва гранули, починаючи від завантаження абразивної суміші, та закінчуючи отриманням готової гранули (рис. 5). Виготовлення гранул реалізується методом лиття готової суміші у заздалегідь змащені матриці, що розміщені на приводному барабані. Сутність процесу полягає в наступному: абразивна суміш завантажується в бункер екструдера пристрою АГ-1 (3), який у свою чергу подає нормовану дозу суміші через фільтр екструдера в порожнини матриць барабану (2), які попередньо змащуються спеціальною речовиною за допомогою системи змащення (4). Кожна матриця має 14 порожнин, і оснащена електричними тенами, які забезпечують нагрівання цих порожнин, за рахунок чого

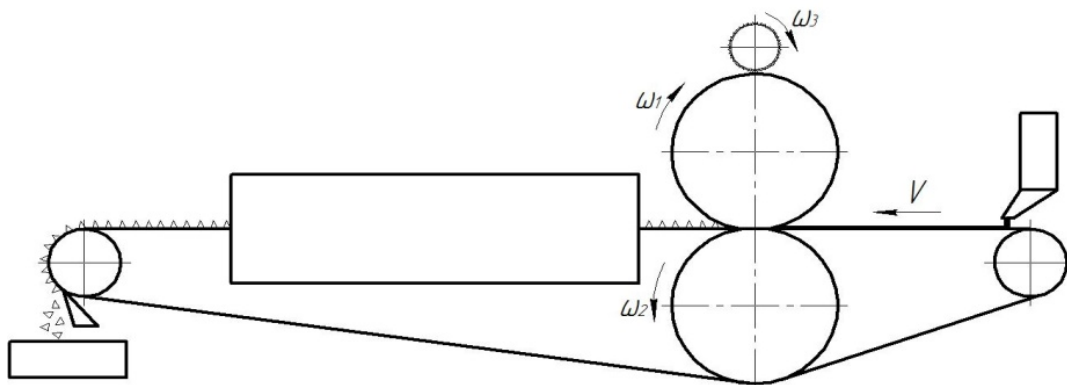


Рис. 4. Схема роботи пристрою, що дозволяє отримувати абразивні гранули методом відбитка [4]

здійснюється процес полімеризації. Після подачі абразивної суміші в порожнини матриці здійснюється оберт барабана на крок, рівний $360^\circ / n$, де n – сума числа матриць барабана (в даному пристрої шість матриць) й зазору між ними. Включення тенів відбувається через контрольований проміжок часу автоматично. Всі процеси управляються програмою та задаються оператором залежно від завдання виробництва. Після закінчення процесу полімеризації здійснюється наступний оберт барабана і відбувається випадання готових гранул в бункер-уловлювач 5, наступним ланцюгом автоматичної лінії може бути бункер-накопичувач, або вбудований в лінію конвеєр стрічкового типу для здійснення безпосередньої подачі готового виробу в ящики для подальшого пакування. Після звільнення порожнин матриць від гранул проводиться черговий оберт барабана і здійснюється завантаження порожнин та підготовка до наступного завантаження абразивної суміші.

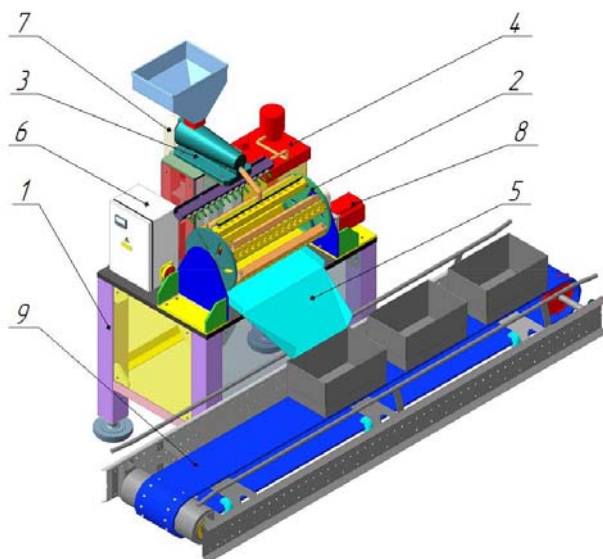


Рис. 5. Автоматична лінія АГ-1:

1 – станина; 2 – привідний барабан; 3 – екструдер шнекового типу; 4 – система змащення; 5 – бункер-уловлювач; 6 – електрична шафа; 7 – привід екструдера; 8 – привід барабана; 9 – конвеєр стрічкового типу

Основними вузлами пристрою АГ-1: станина, привідний барабан, екструдер шнекового типу, система змащення.

Станина пристрою є зварною конструкцією встановленою на чотири віброопори ОВ-31М (рис. 6).

Вона призначена для забезпечення: перешкоджання деформації при роботі пристрою, а також для виключення заклинювання встановлених на ній елементів пристрою і забезпечення безперебійної безвідмовної його експлуатації. Перевагою зварної станини є:

1. Набагато більш низька ціна, в порівнянні з литими станинами (чавун, полімер бетон і т.д.);

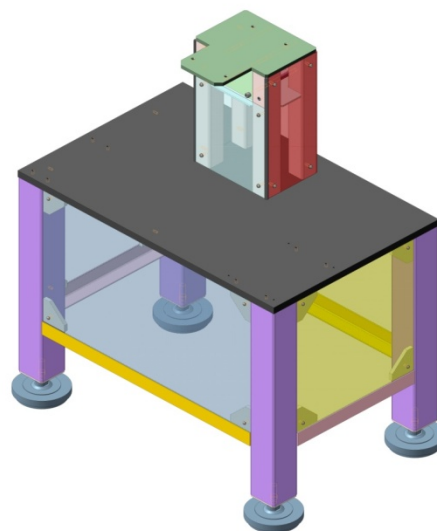


Рис. 6. Збірка-3D станини пристрою АГ-1

2. Менша вага (внаслідок більшого модуля пружності сталі);

3. Можливість застосування більш досконалих з точки зору жорсткості форм;

4. Менша трудомісткість механічної обробки (можливість виправлення дефектів конструкції вирізання вікон, приварювання ребер жорсткості), і що не менш важливо, оскільки прискорює процес виробництва.

Особливо важливими елементами станини є дві плити. На першу плиту кріпиться екструдер – вона повинна забезпечувати прямолінійність поверхні і співвісність щодо інших елементів конструкції забезпечуючи мінімізацію браку. Друга плита – є головною несучою основою, так як на неї встановлюються всі елементи пристрою.

Відмінною особливістю даної конструкції станини є використання багатомодульної системи з можливістю швидкої модернізації, а також приєднання інших модулів для удосконалення процесу виготовлення абразивних гранул.

Параметричне моделювання в САПР КОМПАС-3D дозволило скоротити час перестроювання і введення коректив у проектований пристрій. Забезпечило можливість створення конкурентоспроможного виробу та дає можливість, у разі майбутніх змін, вносити корективи в конструкцію без необхідності перестроювання моделей, лише змінюючи ввідні дані, записані у вікні змінних (рис. 7).

Привідний барабан пристрою АГ-1 (рис. 8) складається з приводного валу (1), на який встановлюються два колеса (2). У колесах зроблені вікна для полегшення конструкції.

Між колесами закріплюються певна кількість матриць (3) (у випадку, що розглядається їх шість). Кожна з матриць має 14-ть робочих порожнин для завантаження і полімеризації абразивної суміші (кількість порожнин може змінюватись в залежності

від виробничих потреб, тим самим змінюючи модифікацію верстата).

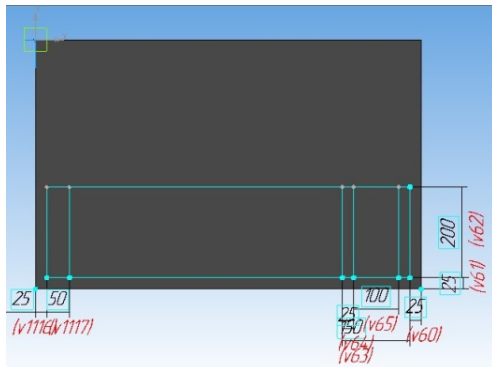


Рис. 7. Параметризація і завдання змінних розташування отворів на плиті станини

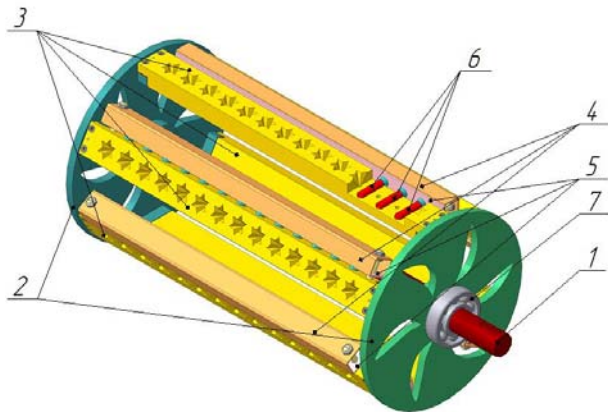


Рис. 8. Збірка-3D барабана пристрою АГ-1:

- 1 – приводний вал; 2 – два колеса; 3 – шість матриць (на кожній 14 робочих порожнин); 4 – планка-кожух;
- 5 – планка кріплення тенів; 6 – тринадцять пальчикових електричних тенів в кожній з 6-ти матриць;
- 7 – радіальний підшипник

Вся конструкція барабанна є збіркою. Для базування і закріплення деталей використовуються гвинти і штифти. Така конструкція дозволяє здійснювати просту і в той же час швидку заміну елементів, у разі переоснащення чи ремонту. Використовування для збирання матриць штифтів дозволяє здійснювати точність базування як щодо коліс барабана, так і щодо філь'єри екструдера роблячи спроектовану конструкцію максимально простою, точною та технологічною.

Представлена конструкція має ряд переваг перед подібними аналогами, в першу чергу за рахунок своєї універсальності, високої ремонтпридатності, забезпеченню високого темпу випуску продукції і мінімізації простой виробництва, а також можливістю багатомодульності системи і швидкого переоснащення на інший вид форми продукції (абразивних гранул), що випускається, тим самим роблячи обладнання універсальним і

конкурентоспроможним в порівнянні з іноземними аналогами.

Принцип циклічності і постійності роботи кожної з матриць дозволяє здійснювати безперервне виготовлення гранул, що робить цей метод і пристрій для його реалізації більш ефективним в порівнянні з відомими раніше.

Розрахунок екструдера шнекового типу спроектованого пристрою АГ-1 проведемо згідно з методикою, наведеною в [5]. Спроекований шнек має такі параметри: $d_{\text{валу}} = 25 \text{ мм}$; $D_{\text{початку витка}} = 75 \text{ мм}$; $D_{\text{закінчення витка}} = 40 \text{ мм}$; $L_{\text{шнеку}} = 250 \text{ мм}$; $t = 1 \text{ мм}$ (рис. 9).

Продуктивності роботи шнеку безпосередньо залежить від плану виробництва та задається програмним забезпечення, яке в свою чергу керується оператором.

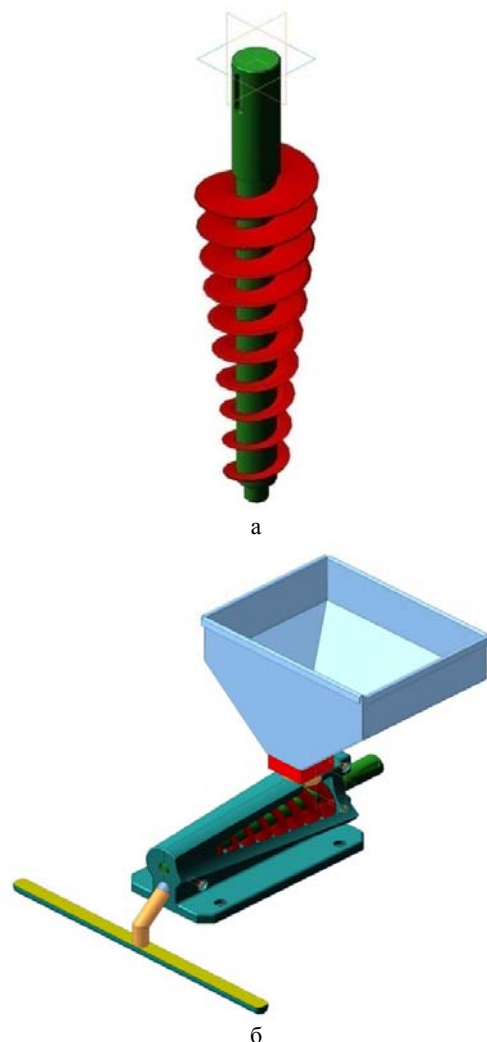


Рис. 9. Загальний вигляд екструдера шнекового типу для дозованої подачі абразивної суміші у матриці:
а – загальний вигляд шнеку; б – 3D- збирання шнеку

Корпус екструдера (рис. 10) складається з двох частин, закріплених між собою за допомогою гвинтового з'єднання і встановлювальних штифтів для забезпечення точності позиціонування. Зазор

між гвинтом і корпусом забезпечується залежно від матеріалу транспортування і вибирається конструктивно у процесі ескізного компоновання.

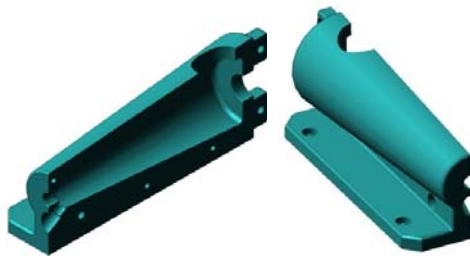


Рис. 10. Права частина корпусу екструдера

Для підвищення технологічності конструкції пристрою АГ-1 замість спеціально спроектованої системи змащування застосуємо готове комплексне рішення від компанії SKF (Німеччина) - SKF MonoFlex [6] (рис. 11).

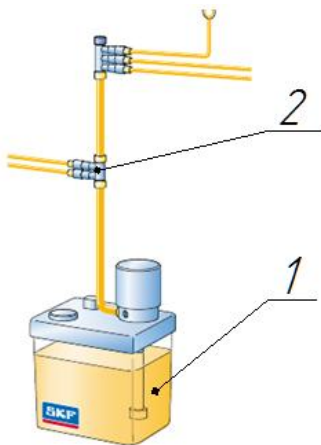


Рис. 11. Схема системи змащення типу SKF MonoFlex: 1 – шестерінчастий насос; 2 – поршневий розподільник [6]

Одномагістральна системи змащення SKF MonoFlex, призначені для рідких олій і пластичних мастил класу консистенції від 001 до 2 по NLGI і призначена для роботи в обладнанні малого та середнього розміру, яке використовується в металорізальних верстатах, друкованих та текстильних машинах, будівельному устаткуванні. Обсяги мастила в інтервалі від 0,01 до 2,5 см³ на кожен мастильний імпульс розподіляються в кожен окрему точку змащення [6]. Однопоршневий дозуючий клапан на точку мастила забезпечує подачу необхідної кількості мастила незалежно від зміни в'язкості або зворотного тиску. Здійснюється можливість прогнозування зміни масштабів системи змащення, оскільки однамагістральна система подачі мастила SKF MonoFlex відрізняється модульною конструкцією.

Система SKF MonoFlex сконструйована для роботи при тиску від 16 до 315 бар, вихідний тиск – від 2 до 70 бар [6]. Паралельне розташування однолінійних дозаторів робить конструкцію системи та її встановлення простою і надійною. Вибір

системи змащення здійснюється за допомогою інженерної служби компанії SKF.

Для подальшої побудови загального збирання пристрою АГ-1 була побудована асоціативна модель системи змащення (рис. 12). У випадку що розглядається система змащення складається з шестеренчастого насоса, поршневого розподільника і фільтр мастила.

Оцінку економічної ефективності спроектованого пристрою АГ-1 виконаємо відповідно до міжнародної практики по показниках чистої поточної вартості (NPV) і коефіцієнту внутрішньої

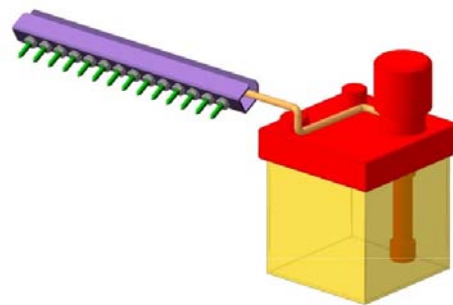


Рис. 12. Загальний вигляд системи змащення SKF MonoFlex пристрою АГ-1

норми прибутку (IRR). Методика та приклад розрахунку наведено в роботі [7]. Відповідно до розрахунків рентабельність, яка комплексно відображає ступінь ефективності використання матеріальних, трудових і грошових ресурсів становить для розглянутого проекту протягом трьох років (з 2017 р., по 2019 р.) 55 %, тобто на кожен інвестуємо у проект гривню доводиться 55 копійок прибутку. Це підтверджує економічну доцільність розробленого методу автоматизованого виробництва абразивних гранул та пристрою для його реалізації.

Висновки: 1. Встановлено, що на сьогоднішній день в Україні відсутнє підприємство, що серійно випускає абразивні гранули. Не знайдене також інформації про існування пристрою для їхнього автоматизованого серійного випуску. Описані в джерелах методи виготовлення в більшості ручні, вкрай трудомісткі, затратні і найчастіше носять експериментальний характер.

2. Спроектований пристрій для серійного виробництва абразивних гранул, дозволяє вирішити проблему виготовлення ефективного інструменту для обробки деталей вільними абразивами. Використання на всіх етапах проектування системи САПР КОМПАС-3D дозволило швидко створити асоціативні креслення, що значно скоротило час проектування та забезпечило максимальну візуалізацію спроектованого пристрою.

3. Параметричне моделювання в САПР КОМПАС-3D дозволило скоротити час перебудови і внесення коректив у спроектований пристрій та забезпечило можливість створення

конкурентоспроможного виробу. Дало можливість, у разі майбутніх змін, вносити корективи в конструкцію без необхідності перебудови моделей, лише змінюючи ввідні дані, записані у вікні змінних.

4. Оцінка ефективності проекту за показниками чистої поточної вартості (NPV) і коефіцієнтом внутрішньої норми прибутку (IRR) показала, що при впровадженні спроектованого пристрою у виробництво рентабельність проекту, яка комплексно відображає ступінь ефективності використання матеріальних, трудових і грошових ресурсів становить 55%, що підтверджує економічну доцільність впровадження спроектованого пристрою.

Література

1. P. Kunz. La Tribofinition. Parachevement des piece les abrasives. Librairie de Traitements de Surface. Paris. 1985.
2. А.с. 1183401 МКИ В 30 В 15/02 СССР Способ прессования абразивных гранул преимущественно в форме тетраэдра и устройство для его осуществления / Г.С. Венцкевич, М.Е. Шаинский и Ю.Н. Букаранов (СССР). – 3758852/25-27; Заявл. 03.05.84; Опубл. 07.10.85., Бюл. № 37.
3. Калмыков М.А. Инструмент для обработки деталей свободными абразивами: монография / М.А. Калмыков, Т.А. Шумакова, В.Б. Струтинский, Л.М. Лубенская. – Луганск: издательство «Ноулидж», 2010. – 214 с.
4. Костенков С.А. Повышение работоспособности галтовочных тел на основе применения зерен с контролируемой формой: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: 05.03.01 «Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки» / С.А. Костенков – Томск, 2007. – 21 с.
5. Hicks T. G. Handbook of Mechanical Engineering Calculations, Second Edition / Tyler Gregory Hicks. . – USA, 2006. - 1436 p.
6. ng-origin.skf.com
7. Алексеева А.И. Комплексный экономический анализ хозяйственной деятельности: Учебное пособие / А.И.Алексеева, Ю.В.Васильев, А.В., Малеева и др. – М.: Финансы и статистика, 2006. – 672с.

References

1. P. Kunz. La Tribofinition. Parachevement des piece les abrasives. Librairie de Traitements de Surface. Paris. 1985.
2. А.с. 1183401 МКИ В 30 В 15/02 СССР Способ прессования абразивных гранул преимущественно в форме тетраэдра и устройство для его осуществления / Г.С. Венцкевич, М.Е. Шаинский и Ю.Н. Букаранов (СССР). – 3758852/25-27; Заявл. 03.05.84; Опубл. 07.10.85., Бюл. № 37.
3. Kalmykov M.A. Instrument dlya obrabotky detaley svobodnymi abrazivami: monografiya / M.A. Kalmykov, T.A. Shumakova, V.B. Strutynskiy, L.M. Lubenskaya. – Luhansk: yzdatel'stvo «Noulydzh», 2010. – 214 s.
4. Kostenkov S.A. Povyshenye rabotosposobnosti haltovochnykh tel na osnove primeneniya zeren s kontrolyruemoy formoy: avtoref. dys. na soyskanye nauch. stepeny kand. tekhn. nauk: 05.03.01 «Tekhnolohyy

i oborudovanye mekhanicheskoy i fizyko-tekhnicheskoy obrabotky» / S.A. Kostenkov – Tomsk, 2007. – 21 s.

5. T. G. Hicks. Handbook of Mechanical Engineering Calculations, Second Edition / Tyler Gregory Hicks. . – USA, 2006. - 1436 p.
6. ng-origin.skf.com
7. Alekseeva A.I. Kompleksnyj ehkonomicheskij analiz hozyajstvennoj deyatel'nosti: Uchebnoe posobie / A.I.Alekseeva, YU.V.Vasil'ev, A.V., Maleeva i dr. – M.: Finansy i statistika, 2006. – 672s.

Шумакова Т.А., Осипов В.И. Разработка метода автоматизированного производства абразивных гранул и устройства для его реализации.

В статье проанализированы методы и устройства для автоматизированного производства абразивных гранул определенной геометрической формы и предложены пути совершенствования конструкции устройств для изготовления гранул в форме пирамид, в основании которых лежит невыпуклый шестиугольник

Ключевые слова: метод литья, абразивная гранула, автоматизация процесса производства, повышения производительности.

Shumakova T., Osipov V. Development of methods for computer-aided manufacturing of abrasive grains and a device for its implementation

The existing methods of manufacturing of abrasive granules with various geometric shapes and the new method of computer-aided manufacturing of abrasive granules in rubber and ceramic bonding and device for its implementation are examined in the article. A device for manufacturing of abrasive granules with desired geometric shape is presented. This device allows solving the problem of serial automated tools production for treatment of parts with complex geometric shapes in an environment of free abrasives. Using all stages of CAD-system KOMPAS-3D enabled to create associative drawings quickly, which significantly reduced design time and provide maximum visualization of the designed device. A parametric model of the device for manufacturing of abrasive granules with desired geometric shape was initially designed. This model allows automatically change the design of the device at changing of abrasive granules parameters (changing the type of binder, forms of beads and so on.), or their number. An economic efficiency of the designed device in real production conditions was confirmed.

Keywords: molding, abrasive grain, the automation of the production process, increasing of productivity.

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

Осипов Віталій – магістр за напрямом підготовки "Машинобудування" Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк).
vitalik63@gmail.com

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

Стаття подана 20.09.2016

**ВІСНИК
СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ
№ 2 (226) 2016**

Науковий журнал

Відповідальний за випуск

Соколов В.І.

Оригінал-макет

Могильна О.В.

Статті надруковано в авторській редакції

Підписано до друку 20.10.2016 р.
Формат 60×84 1/8. Папір офсетний. Гарнітура Times.
Друк офсетний. Умов. друк. арк. 15,3. Обл.-вид. арк. 16,6.
Наклад 300 прим. Вид. № 3068. 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