

Редакционный совет:

Голенков В.А. д-р техн. наук, проф.,
председатель
Пилипенко О.В. д-р техн. наук, проф.,
зам. председателя
Радченко С.Ю. д-р техн. наук, проф.,
зам. председателя
Борзенков М.И. канд. техн. наук, доц.,
секретарь
Астафичев П.А. д-р юрид. наук, проф.
Иванова Т.Н. д-р техн. наук, проф.
Киричек А.В. д-р техн. наук, проф.
Колчунов В.И. д-р техн. наук, проф.
Константинов И.С. д-р техн. наук, проф.
Новиков А.Н. д-р техн. наук, проф.
Попова Ю.В. д-р экон. наук, проф.
Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф.

Редакция

Главный редактор
Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф.,
заслуженный деятель науки Российской Федерации

Заместители главного редактора:

Гордон В.А. д-р техн. наук, проф.
Барсуков Г.В. д-р техн. наук, проф.
Подмастерьев К.В. д-р техн. наук, проф.

Члены редколлегии:

Бабичев А.П. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Бухач А. д-р техн. наук, проф. (Польша)
Вдовин С.И. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Дмитриев А.М. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Дьяконов А.А. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Емельянов С.Г. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Зубчинов В.Г. д-р физ.-мат. наук, проф. (Россия)
Иванов Б.Р. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Киричек А.В. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Клименко С.А. д-р техн. наук, проф. (Украина)
Колесников К.С. д-р техн. наук, проф.,
академик РАН
Копылов Ю.Р. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Малинин В.Г. д-р физ.-мат. наук, проф. (Россия)
Мирсалимов В.М. д-р физ.-мат. наук, проф.
(Азербайджан)
Мудюкин О.П. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Осадчий В.Я. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Панин В.Е. д-р техн. наук, проф., (Россия)
Распопов В.Я. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Смоленцев В.П. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Старовойтов Э.И. д-р физ.-мат. наук, проф.
(Беларусь)
Хейфец М.Л. д-р техн. наук, проф. (Беларусь)

Ответственный за выпуск:

Тюхта А.В. канд. техн. наук

Адрес редакции

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
(4862) 41-98-48, 41-98-03, 55-55-24,
+7(906)6639898
www.gu-unpk.ru
E-mail: tiostu@mail.ru

Зарег. в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС77-47351 от 03 ноября 2011 года

Подписной индекс 29504
по объединенному каталогу «Пресса России»

© Госуниверситет – УНПК, 2014

Содержание

Естественные науки

Михеев А.В. Моделирование проникновения хрупкого индентора в неподвижную изотропную упругопластическую преграду.....	3
Исмаилова Р.А. Разрушение стержневого тепловыделяющего элемента.....	9
Кольцов А.Ю. Построение статистически оптимальных приближений в классе параметрических функций.....	16
Измеров М.А., Тихомиров В.П., Воробьев В.И., Волохов С.Г. Закон распределения пятен в задачах механики дискретного контакта.....	21

Моделирование технологических процессов

Канатников Н.В., Харламов Г.А., Шоркин В.С. Оптимизация энергетических затрат при обработке резанием периодических профилей деталей.....	28
--	----

Конструирование, расчеты, материалы

Александров А.А., Барсуков Г.В., Фроленков К.Ю. Концепция создания из отвалных шлаков цветных производств новых наноструктурированных материалов для абразивной обработки.....	32
Яцышин Н.А., Прушак Д.А., Кравченко К.В., Лиопо В.А., Овчинников Е.В. Полимерные композиционные материалы на основе слоистых и каркасных силикатов.....	39
Гусев В.Г., Марышев А.А. Устройство прецизионного механического позиционирования.....	44
Михрютин В.В., Шерстобитов М.А. Пути повышения точности станков для обработки тонкостенных листовых обшивок планера самолета.....	48
Копова В.И. Использование 5,7-диформоксиминолина в аналитической химии ванадия.....	54
Савин Л.А., Степанов Ю.С., Корнаев А.В. Перспективы разработки энергетически эффективной гибридной гидродинамической смазки на основе наноматериалов.....	60
Бородина М.Б., Булавин К.А., Мироненко С.В. Рациональные параметры гидромеханической муфты с винтовым исполнительным механизмом, демпфирующей внезапно приложенные нагрузки.....	70
Коноплев В.И., Ануфриев В.И. Бункер для кусковых материалов.....	75
Морев П.Г., Градоунов И.М., Дорофеев О.В., Салищев Г.А. Расчет остаточного напряжения при многоцикло-вой упрочняющей обработке внутренней цилиндрической поверхности.....	79

Машиностроительные технологии и инструменты

Кочанов Ю.С. Алмазно-расточные станки. Источники погрешностей при тонком растачивании.....	82
Рубин П.С., Таранов А.С. Проблемы управления припусками под чистовую обработку цилиндрических колес с арокными зубьями.....	86
Герова С.В. Продление ресурса турбинных лопаток путем совершенствования ремонтно-восстановительной технологии.....	92
Бурнашов М.А., Пржебылов А.Н. Энергетический анализ процесса нагрева ледяной частицы при водоле-д-ной очистке деталей машин.....	96
Мимонов А.М., Вякина Е.А. Оптимизация технологического процесса механической обработки заготовки на основе применения быстропереключаемого технологического оборудования.....	99
Бекташов Д.А., Крапостин А.А. Исследование кристаллического строения минералокерамического режущего инструмента, применяемого для механической обработки деталей энергетических устройств.....	104
Волченков А.В. Исследование влияния вибраций, действующих под углом к направлению резания.....	108
Комаров В.А. Обработка высокопрочных сплавов изделий специального назначения.....	112
Василенко О.А., Семенов В.Г., Тюхта А.В., Василенко Ю.В. Расширение функциональных свойств СОЖ при плоском шлифовании периферией круга.....	115

Машины, аппараты, технологии легкой и пищевой промышленности

Родичева М.В., Абрамов А.В., Канатникова П.А. Инновационная защитная одежда с изменяемым уровнем теплозащитных свойств.....	120
Кваскова Т.В., Горская О.В. Расчет материалоемкости изделия из тканей с рисунком в клетку на этапе эскизного проектирования.....	125
Моськина Е.Л., Прокопова Е.В., Моськин А.А., Дюжиков Н.В. Характеристики режущего инструмента в системе «шквив-нож-настил».....	128

Инновации и кадры в машиностроении

Абашиш М.И., Винокурова Е.В., Галиновский А.Л., Тимофеев В.Б. Анализ приоритетных направлений сотрудничества учебных заведений России и Китая в научно-технической сфере на основе макроэкономических факторов.....	132
---	-----

Приборостроение и биотехнические системы

Абдрахимов Р.Р., Сапожников С.Б., Дьяконов А.А. Влияние частиц углерода на электрические свойства сенсоров на основе УНТ и эпоксидной смолы.....	137
Якушева А.И., Дунаев А.В., Подмастерьев К.В. Исследование влияния содержания меланина в оптической тканевой оксиметрии.....	141
Елисеев А.Д. Синтез коррекции стабилизированного двунаправленного преобразователя на основе линеаризованной непрерывной модели.....	146
Шкатов П.Н., Мякушев К.В. Математическое описание магнитных свойств металла для компьютерного моделирования процессов при вихретоко-магнитной дефектоскопии.....	153

Контроль, диагностика, испытания и управление качеством

Бакурова Ю.А., Зиборов М.А. Научно-технические основы и перспективы использования автоматизированного рабочего места метролога на предприятиях машиностроительного комплекса.....	160
Плахотникова Е.В. Комплексное обеспечение качества электродинамических систем «электропривод – запорная арматура» на стадии проектирования.....	164
Еременко В.Т., Кузичкин О.Р., Быков А.А. Контроль образования техногенных нефтешламовых линз на основе резистивно-акустического метода.....	169



The journal is published since 1995
The journal is published 6 times a year

№ 6 (308) 2014

November - december

Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology

The founder – The Federal State Higher Educational Professional Institution
«State University – Education-Scientific-Production Complex»
(State University ESPC)

Editorial council

Golenkov V.A. Doc. Sc. Tech., Prof.,
president

Pilipenko O.V. Doc. Sc. Tech., Prof.,
vice-president

Radchenko S.Y. Doc. Sc. Tech., Prof.,
vice-president

Borzenkov M.I. Candidate Sc. Tech.,
Assistant Prof, secretary

Astafichev P.A. Doc. Sc. Law., Prof.

Ivanova T.I. Doc. Sc. Tech., Prof.

Kirichek A.V. Doc. Sc. Tech., Prof.

Kolchunov V.I. Doc. Sc. Tech., Prof.

Konstantinov I.S. Doc. Sc. Tech., Prof.

Novikov A.N. Doc. Sc. Tech., Prof.

Popova L.V. Doc. Sc. Ec., Prof.

Stepanov Y.S. Doc. Sc. Tech., Prof.

Editorial Committee

Editor-in-chief

Stepanov Y.S. Doc. Sc. Tech., Prof.,
honored worker of science of Russian
Federation

Editor-in-chief Assistants

Gordon V.A. Doc. Sc. Tech., Prof.

Barsiikov G.V. Doc. Sc. Tech., Prof.

Podmasteryev K.V. Doc. Sc. Tech., Prof.

Member of editorial board

Babichev A.P. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Buchach A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Poland)

Vdovin S.I. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Dmitriev A.M. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Dyakonov A.A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Emelyanov S.G. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Zubarev Y.M. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Subchaninov V.G. Doc. Sc. Ph. - Math., Prof.
(Russia)

Ivanov B.R. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Kirichek A.V. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Klimenko S.A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Ukraine)

Zubarev Y.M. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Academician of RAS

Kopylov Y.R. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Malinin V.G. Doc. Sc. Ph. - Math., Prof. (Russia)

Mirsalimov V.M. Doc. Sc. Ph. - Math., Prof.
(Azerbaijan)

Mulyukin O.P. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Osadchy V.Ya. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Panin V.E. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Raspopov V.Ya. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Smolenzev V.P. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Starovoitov A.I. Doc. Sc. Ph. - Math., Prof.
(Belarus)

Heifets M.I. Doc. Sc. Tech., Prof. (Belarus)

Responsible for edition:

Tyukhta A.V. Candidate Sc. Tech.

Address

302020 Orel,
Naugorskoe Chosse, 29
4862) 41-98-48, 41-98-03, 55-55-24,
+7(906)6639898
www.gu-unpk.ru
E-mail: tiostu@mail.ru

Journal is registered in Federal Agency of
supervision in sphere of communication,
information technology and mass communica-
tions. The certificate of registration PI №
FS77-47351 from 03.11.2011

Index on the catalogue of the «**Pressa
Rossii**» 29504

© State University ESPC, 2014

Contents

Natural sciences

<i>Mikheev A.V.</i> Simulation of penetration of brittle indenter immobility isotropic elastoplastic obstacle.....	3
<i>Ismayilova R.A.</i> Fracture of rod fuel element.....	9
<i>Koltsov A.Yu.</i> Construction of the optimal approximation in class of parametric functions.....	16
<i>Izmerov M.A., Tikhomirov V.P., Vorobjev V.I., Volokhov S.G.</i> Distribution law of spots in problems of discrete contact mechanics.....	21

Modelling of technological processes

<i>Kanatnikov N.V., Harlamov G.A., Shorkin V.S.</i> Optimization energy cost for processing cut a periodic profile of details.....	28
--	----

Designing, calculations, materials

<i>Alexandrov A.A., Barsukov G.V., Frolenkov K.Yu.</i> Concept of creation dump slag new color production nanostruc- tured materials abrasion.....	32
<i>Yatsyshin N.A., Prushak D.A., Kravchenko K.V., Liopo V.A., Auchynnikau E.V.</i> Polymer composite materials based on layered and framework silicates.....	39
<i>Gusev V.G., Maryshev A.A.</i> Precision appliance mechanical positioning.....	44
<i>Mihryutin V.V., Sherstobitov M.A.</i> Techniques of accuracy improvement for machining of aircraft skins.....	48
<i>Komova V.I.</i> Use of 5,7–dibromohydroxyquinoline in analytical chemistry of vanadium.....	54
<i>Savin L.A., Stepanov Yu.S., Kornaev A.V.</i> Challenges of engineering of hybrid hydrodynamic lubricants with nano- materials.....	60
<i>Borodina M.B., Bulavin K.A., Mironenko S.V.</i> Rational parameters of the hydromechanical coupling with the screw executive mechanism damping suddenly enclosed loadings.....	70
<i>Konoplev V.L., Amufriev V.I.</i> Bunker for bulk materials.....	75
<i>Morev P.G., Gryadunov I.M., Dorofeev O.V., Salishchev G.A.</i> Calculation of residual stresses in multi-cycle hardening processing of the inner cylindrical surface.....	79

Machine building technology and toolware

<i>Kochanov Yu.S.</i> Diamond boring machines. sources of error for fine boring.....	82
<i>Rubin P.S., Tarapanov A.S.</i> Problems of allowance for finishing cylindrical wheels with arched teeth.....	86
<i>Gerova S.V.</i> Extended life turbine blades by improving repair and rehabilitation technology.....	92
<i>Burnashov M.A., Prezhbilov A.N.</i> The power analysis of process of heating of the ice particle at water ice cleaning of details.....	96
<i>Mimonov A.M., Zvyagina E.A.</i> Process optimization machining based on the blanks application quickset process equipment.....	99
<i>Bektashov D.A., Krapostin A.A.</i> Investigation of the crystal structure of the mineral ceramic cutting tool used for machining parts power devices.....	104
<i>Volchenkov A.V.</i> Research of vibration influence operating at an angle to the cutting direction.....	108
<i>Komarov V.A.</i> Processing of high–strength alloy products of special purpose.....	112
<i>Vasilenko O.A., Semenov V.G., Tyukhta A.V., Vasilenko Yu.V.</i> Expansion of functional properties coolant at flat grind- ing wheel periphery.....	115

Machine, apparatus, technology, light and food industries

<i>Rodicheva M.V., Abramov A.V., Kanatnikova P.A.</i> Innovative protective cloth with changeable level of heat–shielding properties.....	120
<i>Kvaskova T.V., Gorskaya O.V.</i> Calculation of materials consumption product at the stage of schematic design from the fabric tartan.....	125
<i>Moskina E.L., Prokopova E.V., Moskin A.A., Dygikov N.V.</i> Features cutting tool in the system «pulley–knife–present».....	128

Innovation and frame in machine building

<i>Abashin M.I., Vinokurova E.V., Galinovskiy A.L., Timofeev V.B.</i> Analysis of Russia and China educational institutions priority directions of cooperation in the scientific and technical sphere based on the macroeconomic factors.....	132
--	-----

Instrument making and biotechnological system

<i>Abdrahimov R.R., Sapozhnikov S.B., Dyakonov A.A.</i> Effect carbon particles on the electrical properties of sensors based on cnts and epoxy resin.....	137
<i>Yakusheva A.I., Dunaev A.V., Podmasteryev K.V.</i> Study of influence of melanin content in tissue reflectance oximetry.....	141
<i>Yeliseyev A.D.</i> Synthesis of stabilized bi–directional voltage converter adjustment based on linearized continuous model.....	146
<i>Shkatov P.N., Myakushev K.V.</i> Mathematical description of magnetic properties metal for computer simulation pro- cesses in the vortex–current–magnetic inspection.....	153

Control, diagnostics, tests and quality management

<i>Bakurova Yu.A., Ziborov M.A.</i> Scientific and technical bases and prospects automated workplaces metrology on engineering plants.....	160
<i>Plahotnikova E.V.</i> Complex ensuring quality of electrodynamic systems «the electric drive–stop valves» at the design stage.....	164
<i>Eremenko V.T., Kuzichkin O.R., Bykov A.A.</i> Control of technological education oil sludge lenses based on resistive– acoustic methods.....	169

The journal is on the List of the peer-reviewed journals and editions, stated by the High Attestation Commission at the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, for the publication of the main scientific results of the thesis for the academic degree.

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

УДК 539.42

А.В. МИХЕЕВ

**МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОНИКАНИЯ ХРУПКОГО ИНДЕНТОРА
В НЕПОДВИЖНУЮ ИЗОТРОПНУЮ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКУЮ ПРЕГРАДУ**

В статье рассматриваются вопросы моделирования проникания хрупкого индентора в неподвижную изотропную упругопластическую преграду, позволяющие определить зависимости для ряда динамических задач механики деформируемого твердого тела: глубины проникания хрупкого индентора в неподвижную упругопластическую преграду, распределения давления на поверхности проникающего тела для различных кинематических условий воздействия.

Ключевые слова: проникание, разрушение, контактное взаимодействие, преграда, частица.

В механике деформируемого твердого тела к настоящему времени разработано большое количество моделей, описывающих поведение сетчатых структур, фазовые переходы в них, критерии разрушения и фрагментации тел под действием интенсивной нагрузки, а также континуальные модели развития разрушений.

Часть этих моделей хорошо исследована и не ставится под сомнение, однако вычислить аналитическим образом вытекающие из них следствия можно лишь для малых воздействий и очень простых по форме тел. Исследование поведения реальных тел со сложной геометрией, подвергающихся значительным внешним воздействиям, приводящим к конечным деформациям.

Другая часть моделей призвана описать наблюдаемые явления, такие как формирование сложного вида разрушений возле места сильного удара. Однако ответить на вопрос, действительно ли модель адекватно описывает данное явление невозможно, без проведения ряда аналитических исследований. К аналитическим задачам стоит отнести и определение зачастую многочисленных параметров той или иной модели, которые практически невозможно измерить напрямую.

В рамках численной методики расчета, предложенной в настоящем разделе, исследуем процесс взаимодействия абсолютно жесткой сферы с преградой замкнуто сетчатой структуры, материал которой считается несжимаемой упругопластической средой без упрочнения, подчиненной условию Треска. Основные предположения: скорость каждой материальной точки в данный момент времени направлена по нормали к поверхности тела в этой точке, точка a является точкой контакта тела и преграды [1, 2].

Преграда моделируется упругопластической средой без упрочнения. В процессе проникания область преграды, примыкающая к поверхности индентора, находится в пластическом состоянии. Частицы преграды, приходящие в соприкосновение с поверхностью расширяющейся части жесткого индентора, получают скорость, равную нормальной составляющей скорости проникания к поверхности индентора. Вследствие этого происходит смещение и сжатие материала преграды в направлении этой нормали. Смещение частиц материала преграды в этой плоскости считается основным. Поэтому полагаем, что частицы преграды, находящиеся в плоскостях, перпендикулярных направлению проникания, в своем движении остаются на этих плоскостях. При этом движение частиц материала происходит в условиях плоского деформирования с цилиндрической симметрией. Как показывают расчеты, на основном участке глубины проникания индентора градиент напряжения в направлении скорости проникания мал, что служит некоторым основанием для принятых допущений. При этом граничное условие на свободных поверхностях преграды нарушается. Однако можно предположить, что влияние свободных поверхностей локализовано в тонком слое, примыкающем к этим поверхностям. В процессе внедрения, индентор взаимодействует с преградой только своей передней расширяющейся частью [3]. Дальше происходит отрыв материала преграды от поверхности. В случае проникания острого конуса с конечным углом раствора в рамках принятой здесь модели считаем, что частицы преграды движутся по поверхностям, нормаль-

ным к поверхности проникающего конуса. Очевидно, что эти поверхности конические. Для задачи проникания в результате принятых допущений задача определения сил, действующих на индентор, сводится к исследованию процесса расширения круговой цилиндрической полости, начиная с нулевого радиуса, в упругопластической среде без упрочнения. Пластическая область вокруг полости ограничена цилиндрической поверхностью радиусом c , являющимся функцией времени. Область преграды вне этой поверхности находится в упругом состоянии [4–8].

Основные уравнения такой среды для случая одномерного движения – это уравнения неразрывности и уравнения движения частиц преграды в переменных Лагранжа:

$$\frac{1}{\phi+1} \frac{\partial}{\partial r} (r+u)^{\phi+1} = \frac{\rho_0}{\rho} r^\phi, \quad (1)$$

$$\rho_0 r^\phi \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (r+u)^\phi \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + (\sigma_r + \sigma_\theta) \frac{\partial}{\partial r} (r+u)^\phi,$$

где r – начальное расстояние частицы от центра симметрии;

t – время;

ρ_0, ρ – начальная и текущая массовая плотность частиц металла, учитывая условие несжимаемости среды $\rho_0 = \rho$;

$\phi = 0, 1, 2$ – соответственно для сферического, цилиндрического и плоского случая движения.

Рассмотрим задачу определения давления и опишем деформацию преграды в окрестности произвольной точки a поверхности контакта. Пусть R_1, R_2 – радиусы главных кривизн в точке a . Ограничимся рассмотрением случая $R_1 = R_2 = R$, когда удастся получить простое аналитическое решение.

Введем локальную лагранжеву сферическую систему координат с началом в центре сферы радиусом R . Обозначим радиальное смещение $u(r, t)$, нормальную составляющую скорости к поверхности тела в точке A $v_0(t)$, положение пластической границы и свободной поверхности преграды $r = c(t)$ и $r = h(t)$. В момент времени $t = t_0$ $v_0(t)$, $\frac{dv_0}{dt}$, $c(t)$, $h(t)$ считаются известны [9, 10].

Смещение лицевой поверхности преграды $U(t)$ за промежуток времени $\Delta t = t - t_0$ можно записать как:

$$U(t) = v_0(t_0)(t - t_0) + \frac{1}{2}(t - t_0)^2 \frac{dv_0}{dt}. \quad (2)$$

Задача определения давления и деформации преграды в окрестности точки a в данном случае сводится к исследованию процесса расширения сферической оболочки. Предполагается, что положение пластической границы $r = c(t)$ и тыльной поверхности преграды $r = h(t)$ получено в результате расширения сферической оболочки с внутренним радиусом R_0 и внешним h_0 , под действием равномерно распределенного внутреннего давления. Давление на свободной поверхности полагаем равным нулю. Уравнения движения и сохранения массы для несжимаемой среды в случае сферической симметрии примут вид:

$$\frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial r} (r+u)^3 = r^2, \quad (3)$$

$$\rho r^2 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (r+u)^2 \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + (\sigma_r + \sigma_\phi) \frac{\partial}{\partial r} (r+u)^2, \quad (4)$$

Через ρ обозначена плотность материала преграды, σ_r и σ_ϕ – радиальное и окружное напряжения. В упругой области решение задачи возьмем в квазистатическом приближении:

$$\sigma_r = -\frac{4\tau c^3}{3h_0^3} \left(\frac{h_0^3}{r^3} - 1 \right), \quad (5)$$

$$u = \frac{4\tau c^3}{3Eh_0^3} \left((1-2\nu)r + \frac{(1+\nu)h_0^3}{2r^2} \right), \quad (6)$$

где E – модуль юнга;

ν – коэффициент Пуассона материала преграды.

Интегрируя уравнение (2) с учетом граничных условий, получаем:

$$u = \sqrt[3]{r^3 + (R+U(t))^3 - R_0^3} - r. \quad (7)$$

Путем дифференцирования выражения (7) по времени определяются скорость и ускорение движения частиц среды [11]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{(R+U(t))^2 \dot{U}(t)}{\left(\sqrt[3]{r^3 + (R+U(t))^3 - R_0^3}\right)^2},$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\frac{2(R+U(t))^4 \dot{U}(t)^2}{\left(\sqrt[3]{r^3 + (R+U(t))^3 - R_0^3}\right)^5} + \frac{2(R+U(t))\dot{U}(t)^2 + (R+U(t))^2 \ddot{U}(t)^2}{\left(\sqrt[3]{r^3 + (R+U(t))^3 - R_0^3}\right)^2},$$

где $\dot{U} = \frac{dU}{dt}$, $\ddot{U} = \frac{d^2U}{dt^2}$.

Условия текучести треска записываются в виде:

$$\sigma_\theta - \sigma_r = 2\tau.$$

Подставляя выражения (6), (7) в уравнение (5), получим:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial t} = \frac{4\tau r^2}{r^3 + (R+U(t))^3 - R_0^3} + \rho r^2 \left(-\frac{2(R+U(t))^4 \ddot{U}(t)^2}{\left(\sqrt[3]{r^3 - R_0^3 + (R+U(t))^3 - R_0^3}\right)^7} + \frac{2(R+U(t))\dot{U}(t)^2 + (R+U(t))^2 \ddot{U}(t)}{\left(\sqrt[3]{r^3 + (R+U(t))^3 - R_0^3}\right)^7} \right). \quad (8)$$

Учитывая, что есть давление на поверхности жесткого тела в точке контакта найдем его значения, интегрируя выражение (1) при:

$$p(t) = \frac{4\tau}{3} \ln \left(\frac{c^3 + R^3 - R_0^3}{R^3} \right) + \rho \left(\frac{R^4 v_0^2}{2 \left(\sqrt[3]{c^3 + R^3 - R_0^3}\right)^4} - \frac{(2Rv_0^2 + R^2 a_0)}{\sqrt[3]{c^3 + R^3 - R_0^3}} - \frac{1}{R} \right) + \sigma_r(c, t) \quad (9)$$

Напряжения на пластической границе определяются по формуле (5) при:

$$\sigma_r(c, t) = -\frac{4\tau}{3} \left(1 - \frac{c^3}{h_0^3} \right). \quad (10)$$

В случае полубесконечной преграды:

$$\sigma_r(c, t) = -\frac{4\tau}{3}, \quad (11)$$

положение пластической границы определим из непрерывности на ней смещения.

После приравнивания получим уравнения:

$$K_1^3 \omega^4 + 3K_1^2 K_2 \omega^3 + 3K_2^2 \omega^2 + (K_2^2 - 1)\omega + R_0^3 - (R+U)^3 = 0, \quad (12)$$

где $\omega = c^3$, $K_1 = \frac{4\tau(1-2\nu)}{3Eh_0^3}$, $K_2 = \frac{2\tau(1+\nu)}{3E} + 1$.

Значения определим из уравнения при условии:

$$R_0 = \sqrt[3]{R^3 - K_1^3 \omega^4 - 3K_1^2 K_2 \omega^3 + 3K_1 K_2^2 \omega^2 - (K_2^3 - 1)\omega}. \quad (13)$$

В случае полубесконечной преграды:

$$c = \sqrt[3]{\frac{(R+U)^3 - R_0^3}{K_2^3 - 1}}, \quad (14)$$

$$R_0 = \sqrt[3]{R^3 + (K_2^3 - 1)\omega}. \quad (15)$$

Значения определим из условия $h_0 + u(h_0, t_0) = h(t_0)$, которое запишем в виде уравнения:

$$h_0^3 - hh_0^2 + \frac{2\tau(1-\nu)\omega}{E} = 0. \quad (16)$$

Новое положение тыльной поверхности преграды найдем по формуле:

$$h(t) = h_0 + \frac{2\tau(1-\nu)c^2}{Eh_0^2}. \quad (17)$$

Если в момент времени пластическая граница вышла на обратную сторону преграды, то для определения давления в точке контакта выражение интегрируется.

Учитывая, что на свободной поверхности преграды напряжение равно нулю, получим:

$$p_0(t) = 4\tau \ln\left(\frac{h}{R}\right) + \rho \left(\frac{R^4 v_0^2}{2} \left[\frac{1}{h^4} - \frac{1}{R^4} \right] - (2Rv_0^2 + R^2 a_0) \left[\frac{1}{h} - \frac{1}{R} \right] \right). \quad (18)$$

Формулы и уравнения позволяют найти давления в точках контактной поверхности и описать деформацию преграды, если в точках контакта имеется сферическая симметрия [12].

Рассмотрим пример внедрения жесткого сферического индентора в замкнутую сетчатую структуру.

Обращение правой части выражений (1), (5) в ноль, означает, что в точках поверхности сферы происходит отрыв среды от ее поверхности.

Для определения силы сопротивления, действующей на проникающую сферу, имеем:

$$F = 2\pi a_0^2 \int_0^{\theta_0} P \cos \theta \sin \theta d\theta, \quad (19)$$

где θ_0 – угол при котором происходит отрыв среды материала от поверхности индентора.

Соответственно уравнение движения сферического индентора в материале можно записать в виде:

$$m \frac{d^2 c_*}{dt^2} = -2\pi a_0^2 \left(\int_0^{\theta^*} P \cos \theta \sin \theta d\theta + \int_{\theta^*}^{\theta} P \cos \theta \sin \theta d\theta \right). \quad (20)$$

С начальными условиями:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 c_*}{dt^2} &= 0 \\ \frac{dc_*}{dt} &= v_0 \\ c_* &= a_0 \end{aligned} \quad (21)$$

Запишем уравнение в развернутой форме:

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 c_*}{dt^2} = -2\pi a_0^2 \left(\int_0^{\theta^*} \left[4\tau \ln\left(\frac{h}{R}\right) + \rho \left(\frac{R^4 v_0^2}{2} \left[\frac{1}{h^4} - \frac{1}{R^4} \right] - (2Rv_0^2 + R^2 a_0) \left[\frac{1}{h} - \frac{1}{R} \right] \right) \right] \cos \theta \sin \theta d\theta + \right. \\ \left. + \int_{\theta^*}^{\theta} \left(\frac{4\tau}{3} \ln\left(\frac{c^3 + R^3 - R_0^3}{R^3}\right) + \rho \left(\frac{R^4 v_0^2}{2 \left(\sqrt[3]{c^3 + R^3 - R_0^3} \right)^4} - (2Rv_0^2 + R^2 a_0) \frac{1}{\sqrt[3]{c^3 + R^3 - R_0^3}} - \frac{4\tau}{3} \right) \cos \theta \sin \theta d\theta \right) \right) \end{aligned} \quad (22)$$

Учитывая, что уравнение не имеет аналитического решения оно было решено численно с использованием неявного метода Эйлера.

На рисунке 1 показан результат моделирования проникания хрупкого индентора в неподвижную упругопластическую преграду замкнутой изотропной и сетчатой структуры.

Таким образом, по разработанной модели проникания хрупкого индентора в неподвижную изотропную упругопластическую преграду можно определить зависимости для ряда динамических задач механики деформируемого твердого тела: глубины проникания хрупкого индентора в неподвижную упругопластическую преграду, распределения давления на поверхности проникающего тела для различных кинематических условий воздействия.

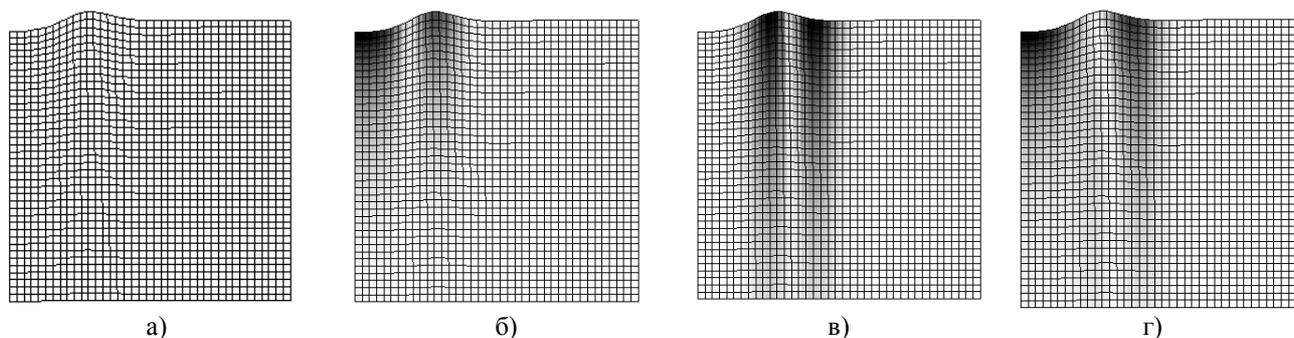


Рисунок 1 – Зависимость распределения напряжений в изотропной упругопластической преграде от удара хрупкой частицы ($t = 0, 2$ с):
 а) характер деформации от удара, б) σ_{xx} , в) σ_{xy} , г) σ_{yy}

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барсуков, Г.В. Разрушение преграды сверхзвуковым потоком свободных абразивных частиц / Г.В. Барсуков, Ю.С. Степанов, А.В. Михеев. – М.: Издательский дом «Спектр», 2010. – 152 с.
2. Степанов, Ю.С. Математическое моделирование процессов сверхзвукового удара и проникания тел в металлические преграды / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, А.В. Михеев. – Орел: «Издательский дом «Орлик», 2012. – 160 с.
3. Степанов, Ю.С. Современные технологии гидро- и гидроабразивной обработки заготовок / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, Е.Г. Алюшин // Научно-технические проблемы в машиностроении. – 2012. – № 6 – С. 15–20.
4. Definition of abrasive water jet cutting capacity taking into account abrasive grain properties / A. Buchacz, Y. Stepanov, G. Barsukov, A. Mikheyev // Selected engineering problems. – № 4. – 2013. – pp. 157–162 (Poland).
5. Степанов, Ю.С., Повышение эффективности гидроабразивного резания путем направленной вибрации материала вдоль линии реза / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, Е.Г. Алюшин, А.В. Воронков // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – № 2–2. – 2012. – С. 53–63.
6. Галиновский, А.Л. Минимизация технологической себестоимости гидроабразивного резания с учетом стоимостных и технологических параметров процесса обработки / А.Л. Галиновский, В.А. Тарасов, В.М. Елфимов // *Известия высших учебных заведений «Машиностроение»*. – 2011. – № 4. – С. 46–54.
7. Барсуков, Г.В. Определение производительности гидроабразивного резания с учетом характеристик абразивного зерна / Г.В. Барсуков, А.В. Михеев // *Справочник. Инженерный журнал*. – 2008. – № 1. – С. 9–14.
8. Барсуков, Г.В. Определение компонентного состава масс абразивной смеси для резания материалов сверхзвуковой гидроабразивной струей / Г.В. Барсуков, А.А. Александров // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – № 2–3. – 2012. – С. 74–81.
9. Степанов, Ю.С. Моделирование разрушения многослойной преграды с газовым зазором под действием сверхзвукового струйного потока свободных абразивных частиц / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, А.В. Михеев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – № 4–2. – 2010. – С. 65–70.
10. Барсуков, Г.В. Исследование влияния технологических режимов гидроабразивного резания на расхождение поверхности деталей из стеклотекстолита / Г.В. Барсуков, Т.А. Журавлева // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2013. – № 4. – С. 47–56.
11. Степанов, Ю.С. Влияние параметров течения сверхзвуковой гидроабразивной струи на геометрическую форму поверхности разрушения преграды / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, А.В. Михеев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2012. – № 2–5. – С. 53–63.
12. Степанов, Ю.С. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния сферического индентора при сверхзвуковом ударном взаимодействии с преградой / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, А.А. Александров // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – № 2–3. – 2010. – С. 3–8.

Михеев Александр Васильевич
ФГБОУ ВПО Госуниверситет – УНПК, г. Орел
К.т.н., докторант
Тел. (4862) 54–14–51
E-mail: awj@list.ru

A.V. MIKHEEV

SIMULATION OF PENETRATION OF BRITTLE INDENTER IMMOBILITY ISOTROPIC ELASTOPLASTIC OBSTACLE

The article deals with the simulation of penetration of the indenter into the still fragile isotropic elastoplastic barrier, allowing to determine the dependencies for a number of tasks dynamic of solid mechanics: the penetration depth of the indenter in brittle elastic goplasticheskuyu fixed barrier, the pressure distribution on the surface of the penetrating body for different kinematic exposure conditions.

Keywords: penetration, destruction, contact interaction, a barrier, a particle.

BIBLIOGRAPHY

1. Barsukov, G.V. Destruction of supersonic flow hedges free of abrasive particles / G.V. Barsukov, Y.S. Stepanov, A.V. Mikheev. – Moscow: Publishing House "Spectrum", 2010. – 152 p.
2. Stepanov, Y.S., Mathematical modeling of supersonic shock and penetration into the metal barriers tel / Y.S. Stepanov, G.V. Barsukov, A.V. Mikheev – Orel: "Publishing House" Orlik", 2012. – 160 p.
3. Stepanov, Y.S. Modern technologies of hydro- and waterjet machining workpieces / Y.S. Stepanov, G.V. Barsukov, E.G. Alyushin // High Tech in mechanical engineering. – 2012. – № 6. – pp. 15 – 20.
4. Definition of abrasive water jet cutting capacity taking into account abrasive grain properties / A. Buchacz, Y. Stepanov, G. Barsukov, A. Mikheev // Selected engineering problems. – № 4. – 2013. – pp. 157–162 (Poland).
5. Stepanov, Y.S. Improving waterjet cutting by directional vibration material along the cutting line / Y.S. Stepanov, G.V. Barsukov, E.G. Alyushin, A.V. Voronkov // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – № 2–2. – 2012. – pp. 53 – 63.
6. Galinovskii, A.L. Minimizing the cost of waterjet cutting technology, taking into account cost and technological processing parameters / A.L. Galinovskii, V.A. Tarasov, V.M. Elfimov // News of higher educational institutions "Engineering». – 2011. – № 4. – pp. 46–54.
7. Barsukov, G.V. Determine the performance of waterjet cutting considering the characteristics of the abrasive grain / G.V. Barsukov, A.V. Mikheev // Directory. Engineering Journal. – 2008. – № 1. – pp. 9 – 14.
8. Barsukov, G.V. Determination of the mass of the component composition of the abrasive mixture for waterjet cutting materials supersonic jet / G.V. Barsukov, A.A. Alexandrov // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – № 2–3. – 2012. – pp. 74 – 81.
9. Stepanov, Y.S. Modelling of multilayer barrier with gas gap under the influence of a supersonic free jet flow of abrasive particles / Y.S. Stepanov, G.V. Barsukov, A.V. Mikheev // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – № 4–2. – 2010. – pp. 65 – 70.
10. Barsukov, G.V. Investigation of the influence of technological regimes waterjet cutting bundle on the surface of parts of fiberglass / G.V. Barsukov, T.A. Zhuravleva // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – 2013. – № 4. – pp. 47 – 56.
11. Stepanov, Y.S. Effect of flow parameters supersonic jet waterjet geometric shape of the fracture surface barrier / Y.S. Stepanov, G.V. Barsukov, A.V. Mikheev // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – № 2 –5. – pp. 53 – 63.
12. Stepanov, Y.S. Numerical simulation of the stress –strain state of a spherical indenter at supersonic shock interaction with the barrier / Y.S. Stepanov, G.V. Barsukov, A.A. Alexandrov // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – № 2–3. – 2010. – pp. 3 – 8.

Mikheev Alexander Vasilievich
State University – ESPC, Orel
Ph.D.
Tel. (4862) 54–14–51
E-mail: awj@list.ru

РАЗРУШЕНИЕ СТЕРЖНЕВОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА

Рассматривается плоская задача механики разрушения для стержневого теплового элемента, сечение которого занимает область в виде круга и ослабленного прямолинейной трещиной с концевыми зонами предразрушения. Взаимодействие берегов в концевых зонах моделируется путем введения связей (сил сцепления) между берегами трещины в концевых зонах. Предложена модель разрушения теплового элемента, основанная на рассмотрении процесса разрушения вблизи вершины трещины с концевыми зонами ослабленных межчастичных связей материала. Принято, что зона процесса разрушения представляет собой слой конечной длины материала с частично нарушенными связями между его отдельными структурными элементами (концевая зона). Определение неизвестных параметров, характеризующих рост трещины, сводится к решению сингулярного интегрального уравнения. Из решения этого уравнения найдены усилия в связях. Анализ предельного равновесия теплового элемента выполняется на основе деформационного критерия разрушения.

Ключевые слова: *Стержневой теплового элемент, защитная оболочка, трещина со связями между берегами, силы сцепления.*

В процессе работы теплового элемента (ТВЭЛ) возможны различные повреждения материала ТВЭЛ, в частности образование трещин. В результате таких повреждений температура и напряжения могут превысить допустимое для ТВЭЛ значения, что может привести к аварийной ситуации.

Пусть рассматриваемый ТВЭЛ (поперечное сечение) заполняет в плоскости $z = x + iy$ круг радиуса R_1 с центром в начале координат, ограниченную извне окружностью L_1 , а сечение защитного цилиндра (покрытие) заполняет в этой же плоскости кольцо, ограниченную извне окружностью L_2 радиуса R_2 , центр которой совпадает с центром окружности L_1 , а изнутри окружностью L_1 .

Предположим, что ТВЭЛ ослаблен одной трещиной с центром в начале координат, берега которой вне концевых зон свободны от нагрузок.

Рассмотрим случай, когда защитное покрытие ТВЭЛ представляет собой тонкостенный цилиндр, т.е. $R_2 - R_1 \ll R_1$. Так как защитное покрытие обычно очень тонкое, при их усадке в них возникают напряжения высокой величины, максимально возможные значения, которых равны пределу текучести σ_s .

Из уравнения равновесия легко найти радиальное давление p

$$\sigma_s \frac{h}{2} = p \cdot 2R_1; \quad h = 2(R_2 - R_1).$$

Откуда имеем:

$$p = \frac{\sigma_s(R_2 - R_1)}{R_1}.$$

Рассматривается плоская задача механики разрушения для стержневого ТВЭЛ, сечение которого занимает область в виде круга радиуса R_1 и ослабленного трещиной, когда берега трещины свободны от нагрузок, а на границе круга L_1

$$\sigma_r = -p; \quad \tau_{r\theta} = 0. \quad (1)$$

Из упругого решения задачи, известно, что какой бы малой ни была величина $q_* = \alpha E q / \lambda$ (E – модуль упругости материала ТВЭЛ; α – коэффициент линейного температурного расширения; λ – коэффициент теплопроводности материала ТВЭЛ; q – удельная мощность внутренних источников тепла в ТВЭЛ), по концам трещины условия упругости не соблюдаются, и здесь могут появиться неупругие деформации (зоны ослабленных связей). Эксперименты показывают, что неупругие деформации на первых этапах их развития локализуются в тонких слоях материала зонах предразрушения, занимающих незначительный объем тела по сравнению с его упругой зоной [1, 2].

Первые зоны ослабленных связей будут развиваться по линиям на продолжении трещины. По мере увеличения интенсивности теплового выделения в стержневом элементе в вершинах трещины будут возникать зоны предразрушения (концевые зоны), которые моделируем как области ослабленных межчастичных связей материала. Взаимодействие берегов этих зон

моделируем путем введения между берегами связей, имеющих заданную диаграмму деформирования. Физическая природа таких связей и размеры зон предразрушения зависят от вида материала. Межчастичные связи между берегами трещины в концевых зонах сдерживают разрушение твэла. В случае когда размер концевой зоны трещины не является малым по сравнению с длиной трещины, то приближенные методы оценки трещиностойкости твэлов, основанные на рассмотрении трещины с малой концевой зоной, неприменимы. В этих случаях [3, 4] необходимо прямое моделирование напряженного состояния в концевой зоне трещины с учетом деформационных характеристик связей.

Рассмотрим задачу механики разрушения для твэла, ослабленного прямолинейной трещиной, при условии, что удельная мощность внутренних источников тепла q в твэле распределена по объему равномерно.

По мере действия тепловыделения в твэле в связях, соединяющих берега трещины в концевых зонах, будут возникать нормальные $q(x)$ напряжения. Эти напряжения и размеры концевых зон заранее неизвестны и подлежат определению.

Так как концевые зоны трещины малы по сравнению с остальной частью сечения твэла, то их можно мысленно удалить, заменив разрезом, поверхности которого взаимодействуют между собой по некоторому закону, соответствующему действию удаленного материала. Следовательно, к берегам трещины в концевых зонах будут приложены нормальные напряжения $q(x)$.

Краевые условия на берегах трещины и зонах ослабленных связей в рассматриваемой задаче имеют вид:

$$\begin{aligned} \sigma_y - i\tau_{xy} &= 0 && \text{при } y = 0, && a \leq x \leq b \\ \sigma_y - i\tau_{xy} &= q(x) && \text{при } y = 0, && a_1 \leq x < a \text{ и } b < x \leq b_1 \end{aligned} \quad (2)$$

Основные соотношения рассматриваемой задачи необходимо дополнить уравнением, связывающим раскрытие берегов концевых зон и напряжения в связях. Без потери общности это уравнение представим в виде:

$$(\nu^+ - \nu^-) = C(x, q)q(x), \quad (3)$$

где x – аффикс точек берегов трещины в концевой зоне;

$C(x, q)$ – представляет собой эффективную податливость связей, зависящую от натяжения связей;

$(\nu^+ - \nu^-)$ – нормальная составляющая раскрытия берегов концевой зоны.

Используя комплексные потенциалы Колосова–Мухелишвили [5], граничные условия на контуре круга, берегах трещин и на зонах ослабленных связей запишем краевую задачу в следующем виде:

$$\Phi(x) + \overline{\Phi(x)} + x\overline{\Phi'(x)} + \overline{\Psi(x)} + \frac{3q_*x^2}{32} = c, \quad (4)$$

$$a_1 < x < b_1$$

$$\Phi(t) + \overline{\Phi(t)} - t\overline{\Phi'(t)} - \frac{t^2}{R_1^2}\overline{\Psi(t)} + \frac{qR_1^2}{32} = -p, \quad t \in L_1 \quad (5)$$

где $c = 0$ – на берегах трещины и $c = q(x)$ – в зоне ослабленных связей.

Решение краевой задачи (4) – (5) ищем в виде:

$$\begin{aligned} \Phi(z) &= \Phi_0(z) + \Phi_1(z), \\ \Psi(z) &= \Psi_0(z) + \Psi_1(z), \end{aligned} \quad (6)$$

где
$$\Phi_1(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{a_1}^{b_1} \frac{g(t) dt}{t - z};$$

$$\Psi_1(z) = -\frac{1}{2\pi i} \int_{a_1}^{b_1} \frac{\overline{g(t)}}{t - z} dt - \frac{1}{2\pi i} \int_{a_1}^{b_1} \frac{t \cdot g(t)}{(t - z)^2} dt,$$

где
$$g(x) = \mu \frac{\lambda + \mu}{\lambda + 2\mu} \frac{\partial}{\partial x} [(u + iv)^+ - (u + iv)^-], \quad a_1 < x < b_1$$

λ, μ – постоянные материала Ламе:

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)};$$

ν – коэффициент Пуассона материала.

Потенциалы $\Phi_0(z)$, $\Psi_0(z)$ аналитичны в сплошном круге радиуса R_1 .

Удовлетворяя функциями (6) граничному условию на берегах трещины и в зонах ослабленных связей, получим сингулярное интегральное уравнение относительно неизвестной функции $g(x)$:

$$\Phi_0(x) + \overline{\Phi_0(x)} + x\Phi'_0(x) + \Psi_0(x) - \frac{1}{\pi i} \int_{a_1}^{b_1} \frac{g(t)}{t-x} dt + \frac{3q_*x^2}{32} = c \quad (7)$$

Граничное условие (5) позволяет получить вспомогательную краевую задачу для сплошного круга:

$$\Phi_0(t) + \overline{\Phi_0(t)} - t\Phi'_0(t) - \frac{t^2}{R_1^2} \Psi_0(t) = \overline{f_0(t)}, \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} \overline{f_0(t)} = & -p - \frac{q_*R_1^2}{32} - \frac{1}{2\pi i} \int_{a_1}^{b_1} \frac{g(x) dx}{x-t} + \frac{1}{2\pi i} \int_{a_1}^{b_1} \frac{\overline{g(x)} dx}{x - \frac{R_1^2}{t}} + \frac{t}{2\pi i} \int_{a_1}^{b_1} \frac{g(x) dx}{(x-t)^2} - \\ & - \frac{1}{2\pi i} \frac{t^2}{R_1^2} \int_{a_1}^{b_1} \frac{xg(x)}{(x-t)^2} dx - \frac{1}{2\pi i} \frac{t^2}{R_1^2} \int_{a_1}^{b_1} \frac{\overline{g(x)} dx}{x-t} \end{aligned}$$

Так как для исходной задачи теории упругости выполнены условия равенства нулю главного вектора и главного момента внешних сил, то соответствующие условия:

$$\int_L f_0(t) dt = 0, \quad \int_L \text{Im} f_0(t) \frac{dt}{t} = 0$$

выполняются и для вспомогательной задачи (8) для сплошного круга.

Следовательно, если исходная задача теории упругости (1) – (2) разрешима, то разрешима и вспомогательная задача (8).

Решаем вспомогательную задачу методом Н.И. Мусхелишвили [5].

В результате получим:

$$\begin{aligned} \Phi_0(z) - z\Phi'_0(z) - \frac{z^2}{R_1^2} \Psi_0(z) - \Phi_0(0) = & \frac{1}{2\pi i} \int_{L_1} \frac{\overline{p_0(t)}}{t-z} dt - \\ & - \frac{1}{2\pi i} \int_{L_1} \frac{\overline{p_0(t)}}{t} dt + \frac{1}{2\pi i} \int_a^b \frac{\overline{g(x)}}{x - \frac{R_1^2}{z}} dx + \frac{1}{2\pi i} \int_a^b g(x) dx; \end{aligned} \quad (9)$$

$$p_0(t) = -p - \frac{q_*R_1^2}{32};$$

$$\begin{aligned} \Phi_0(z) + \overline{\Phi_0(0)} = & \frac{1}{2\pi i} \int_{L_1} \frac{p_0(t)}{t-z} dt + \frac{1}{2\pi i} \cdot \frac{1}{z} \int_{L_1} p_0(t) dt + \\ & + \frac{1}{2\pi i} \int_{a_1}^{b_1} \frac{\overline{g(x)}}{x - \frac{R_1^2}{z}} dx + \frac{1}{2\pi i} \cdot \frac{1}{z} \int_{a_1}^{b_1} g(x) dx + \frac{1}{2\pi i} \cdot \frac{R_1^2}{z^2} \int_{a_1}^{b_1} \frac{\overline{g(x)}}{x - \frac{R_1^2}{z}} dx - \\ & - \frac{1}{2\pi i} \cdot \frac{R_1^2}{z} \int_{a_1}^{b_1} \frac{\overline{g(x)} dx}{\left(x - \frac{R_1^2}{z}\right)^2} + \frac{1}{2\pi i} \cdot \frac{R_1^4}{z^3} \int_{a_1}^{b_1} \frac{\overline{g(x)} dx}{\left(x - \frac{R_1^2}{z}\right)^2} + \frac{1}{2\pi i} \cdot \frac{R_1^2}{z^2} \int_{a_1}^{b_1} \frac{g(x)}{x - \frac{R_1^2}{z}} dx; \\ \Phi_0(0) + \overline{\Phi_0(0)} = & \frac{1}{2\pi i} \int_{a_1}^{b_1} \frac{x}{R_1^2} \overline{g(x)} dx - \frac{1}{2\pi i} \int_{a_1}^{b_1} \frac{x}{R_1^2} g(x) dx + \frac{1}{2\pi i} \int_{L_1} p_0(t) \frac{dt}{t}. \end{aligned}$$

С помощью этого решения исключаем в (7) функции $\Phi_0(z)$ и $\Psi_0(z)$. В результате получим сингулярное интегральное уравнение для определения функции $g(x)$.

В дальнейшем учтем, что имеет место симметричное нагружение:

$$\overline{p(t)} = p(\bar{t}); \quad g(t) = -\overline{g(t)}.$$

Тогда сингулярное интегральное уравнение будет иметь следующий

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\pi i} \int_{a_1}^{b_1} \frac{g(t) dt}{t-x} - \frac{R_1^2}{\pi i} \int_{a_1}^{b_1} g(t) \left[\frac{t^2}{R_1^2} \left(1 - \frac{3t^2}{R_1^2} - \frac{3t}{R_1} \right) \frac{R_1}{x} \left(1 + \frac{R_1^2}{x^2} \right) + \right. \\ & \left. + \left(3 - \frac{t^4}{R_1^4} \right) \frac{R_1^2}{x^2} \right] \frac{dt}{\left(t - \frac{R_1^2}{x} \right)} = -\frac{3q_* x^2}{32} - \frac{1}{2\pi i} \int_L p_0(\xi) \left(\xi + x - \frac{R_1^2 + x^2}{\xi^2} \right) \frac{d\xi}{(\xi-x)^2} - \\ & - \frac{1}{2\pi i} \cdot \frac{1}{x} \int_{L_1} \frac{\xi p_0(\xi) d\xi}{\xi - \frac{R_1^2}{x}}, \quad a_1 \leq x \leq b_1; \\ & p_0(t) = -p - \frac{q_* R_1^2}{32}. \end{aligned} \quad (10)$$

К сингулярному интегральному уравнению следует добавить дополнительное условие, вытекающее из физического смысла задачи

$$\int_{a_1}^{b_1} g(x) dx = 0, \quad (11)$$

которое обеспечивает условие однозначности смещений при обходе трещины.

Применяя замену переменных

$$t = \frac{b_1 - a_1}{2} (\tau + 1) + a_1; \quad x = \frac{b_1 - a_1}{2} (\eta + 1) + a_1$$

преобразуем сингулярное интегральное уравнение к виду, более удобному для нахождения его приближенного решения.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{\varphi(\tau) d\tau}{\tau - \eta} + \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \varphi(\tau) B(\eta, \tau) d\tau = f_*(\eta), \quad (12) \\ & (-1 < \eta < 1) \end{aligned}$$

Величины a_1, b_1 , характеризующие зоны ослабленных связей войдут в решение уравнения как неизвестные параметры, подлежащие определению. Так как напряжения в реальном материале ограничены, то решение сингулярного интегрального уравнения (12) следует искать в классе всюду ограниченных функций (напряжений).

Условие ограниченности напряжений в концах $x = a_1$ и $x = b_1$, служит для определения параметров a_1 и b_1 , зная которые можно найти длины зон ослабленных связей со стороны каждой вершины трещины.

Для построения решения уравнения (12) с дополнительным условием (11) воспользуемся методом прямого решения сингулярных интегральных уравнений [6, 7]. Применяя метод Мультиппа–Каландия к уравнению (12) и учитывая условия ограниченности напряжений на концах, получим:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^n a_{mk} \varphi_k^0 = \frac{1}{2} f_k(\eta_m), \quad (m = 1, 2, \dots, n-1) \\ & \sum_{k=1}^n \varphi_k^0 = 0; \quad \sum_{k=1}^n (-1)^k \varphi_k^0 \operatorname{ctg} \frac{\theta_k}{2} = 0; \quad \sum_{k=1}^n (-1)^k \varphi_k^0 \operatorname{tg} \frac{\theta_k}{2} = 0 \quad (13) \\ & a_{mk} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\sin \theta_m} \cdot \operatorname{ctg} \frac{\theta_m \mp \theta_k}{2} + B(\cos \theta_m, \cos \theta_k) \right] \end{aligned}$$

нижний знак берется при $|m - k| = 0, 2, \dots$; верхний знак при $|m - k| = 1, 3, \dots$;

$$\tau_m = \cos \theta_m; \quad \tau_m = \eta_m; \quad \theta_m = \frac{2m-1}{2n} \pi.$$

В правые части системы (13) входят неизвестные значения нормальных $q(\eta_m)$ напряжений в узловых точках концевой зоны. Для их определения используем дополнительное уравнение (3). В рассматриваемой задаче это дополнительное условие удобнее представить для производной раскрытие берегов зоны предразрушения:

$$\frac{\partial}{\partial x} (v^+(x, 0) - v^-(x, 0)) = \frac{\partial}{\partial x} [C(x, q)q(x)]$$

Используя полученное решение, можно записать:

$$g(x) = \frac{2\mu}{1+\kappa} \frac{d}{dx} [C(x, q)q(x)]$$

Для левой части соотношения (3) имеем:

$$(v^+ - v^-) = -\frac{1+\kappa}{2\mu} \int_{a_1}^x g(x) dx \tag{14}$$

С учетом (3) соотношение (14) принимает вид:

$$-\frac{1+\kappa}{2\mu} \int_{a_1}^{x_1} g(x) dx = C(x, \sigma)q(x) \tag{15}$$

Для построения недостающих уравнений, служащих для определения напряжений в связях между берегами зоны предразрушения, потребуем выполнения условий (15) в узловых точках η_{m_1} , содержащихся в зоне предразрушения. В результате получим систему уравнений из M_1 уравнений для нахождения приближенных значений $q(\eta_{m_1})$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_0 v^0(\eta_1) = C(\eta_1, q(\eta_1))q(\eta_1), \\ C_0 (v^0(\eta_1) + v^0(\eta_2)) = C(\eta_2, q(\eta_2))q(\eta_2), \\ \dots \\ C_0 \sum_{m=1}^{M_1} v^0(\eta_m) = C(\eta_{M_1}, q(\eta_{M_1}))q(\eta_{M_1}) \end{array} \right. \tag{16}$$

где $C_0 = -\frac{1+\kappa}{4\mu} \frac{\pi(b_1 - a_1)}{M}$.

Из-за неизвестных размеров концевых зон алгебраическая система уравнений (13), (16) нелинейна даже при линейно-упругих связях. Для ее решения использовали метод последовательных приближений. В каждом приближении алгебраическая система решалась методом Гаусса с выбором главного элемента. В случае нелинейного закона деформирования связей для определения напряжений в зоне предразрушения использовали также итерационный алгоритм, подобный методу упругих решений [8]. Ее численное решение позволяет найти усилия в связях и размеры зон предразрушения, значения φ_k^0 ($k = 1, 2, \dots, M$), определяющие функцию $g(x)$. После нахождения искомой функции, $g(x)$ вычисляли раскрытие трещины у ее вершин:

$$v^+(a, 0) - v^-(a, 0) = -\frac{\kappa+1}{2\mu} \int_a^{a_1} g(x) dx$$

$$v^+(b, 0) - v^-(b, 0) = -\frac{\kappa+1}{2\mu} \int_b^{b_1} g(x) dx$$

Используя замену переменной интегрирования и заменяя интеграл с помощью квадратурной формулы Гаусса суммой, находим:

$$v^+(a, 0) - v^-(a, 0) = -\frac{(1 + \kappa)(b_1 - a_1)}{4\mu M} \sum_{m=1}^{M_{11}} \varphi_k^0(\eta_m), \quad v^+(b, 0) - v^-(b, 0) = -\frac{(1 + \kappa)(b_1 - a_1)}{4\mu M} \sum_{m=1}^{M_{12}} \varphi_k^0(\eta_m),$$

где M_{11} – число узловых точек, принадлежащих отрезку (a_1, a) , а M_{12} – тоже, принадлежащих отрезку (b, b_1) .

Значение удельной мощности внутренних источников тепла q_* , вызывающий рост трещины определяется из соотношения:

Для левого конца трещины при $x = a$:

$$-\frac{(1 + \kappa)(b_1 - a_1)}{4\mu M} \sum_{m=1}^{M_{11}} \varphi_k^0(\eta_m) = \delta_c$$

Для правого конца трещины при $x = b$

$$-\frac{(1 + \kappa)(b_1 - a_1)}{4\mu M} \sum_{m=1}^{M_{12}} \varphi_k^0(\eta_m) = \delta_c,$$

где δ_c – трещиностойкость материала твэла.

Будем считать, что трещина расположена симметрично относительно начала координат, т.е. $a = -b$. В этом случае сингулярное интегральное уравнение в безразмерных переменных $\eta = x/\ell$, $\tau = t/\ell$ примет вид (12), где:

$$B(\eta, \tau) = \frac{\lambda^2}{2(1 - \lambda^2\eta\tau)^3} [4\tau - 5\eta + \lambda^2\tau(\tau\eta + 3\tau^2 - 3\eta^2) + \lambda^4\eta\tau^2(\eta\tau + \eta^2 - \tau^2) + \lambda^6\tau^4\eta^3];$$

$$f_*(\eta) = -\frac{3q_*\lambda^2\eta^2}{32} - p; \quad \lambda = \ell/R_1$$

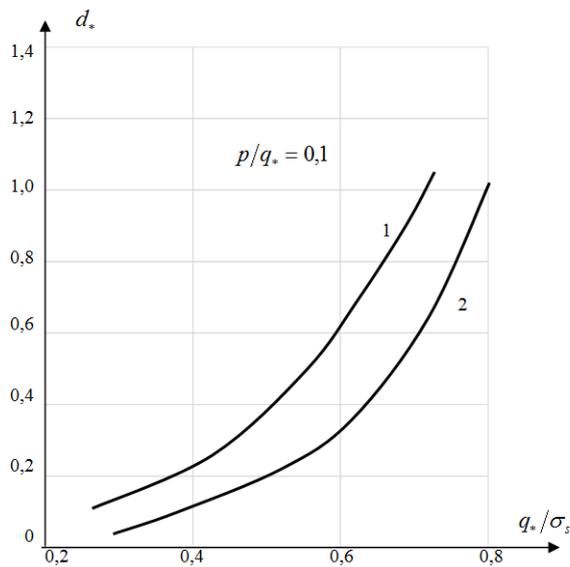


Рисунок 1 – Зависимости длины зон ослабленных межчастичных связей материала

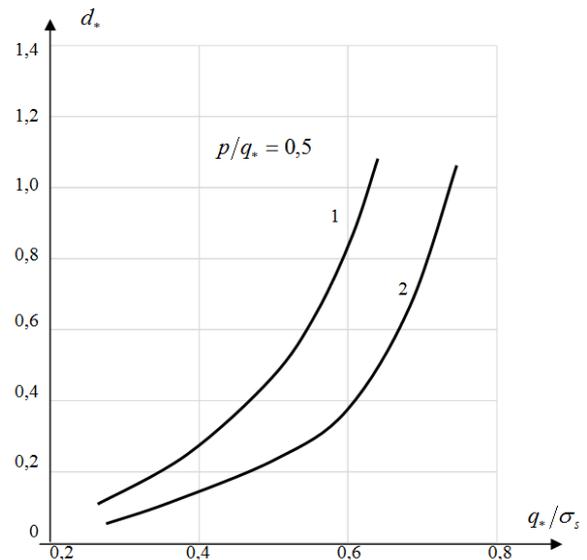


Рисунок 2 – Зависимости длины зон ослабленных межчастичных связей материала

На основании численного расчета найдена зависимость параметра d_* длины зоны ослабленных связей от величины интенсивности тепловыделения в твэле q_*/σ_s для различных значений длины трещины и величин p/q_* .

На рисунках 1 – 2 представлены зависимости безразмерной длины зон ослабленных связей (отнесенной к полудлине трещины) от безразмерного параметра q_*/σ_s для следующих значений свободных параметров задачи

$$a_{1*} = \frac{a_1}{R_1} = -0,2; \quad b_{1*} = \frac{b_1}{R_1} = 0,3; \quad p/q_* = 0,1; 0,5.$$

На этих рисунках кривые 1 относятся к правому концу трещины, а кривые 2 – левому концу трещины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Витвицкий, П.М. Пластические деформации в окрестности трещин и критерии разрушения: Обзор / П.М. Витвицкий, В.В. Панасюк, С.Я. Ярема // Проблемы прочности. – 1973. – № 2. – С. 3–18.
2. Rusinko, A. Plasticity and Creep of Metals / A. Rusinko, K. Rusinko. – Springer, Verlag Berlin Heidelberg. – 2011. – 436 p.
3. The special issue: Cohesive models // Eng. Fract. Mech. – 2003. – V. 70. – № 14. – pp. 1741–1987.
4. Мирсалимов, В.М. К решению задачи механики контактного разрушения о зарождении и развитии трещины со связями между берегами во втулке фрикционной пары / В.М. Мирсалимов // ПММ. – 2007. – Т. 71, вып. 1. – С. 132–151.
5. Мухелишвили, Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н.И. Мухелишвили. – М.: Наука, 1966. – 707 с.
6. Панасюк, В.В. Распределение напряжений около трещин в пластинах и оболочках / В.В. Панасюк, М.П. Саврук, А.П. Дацышин – Киев: Наукова думка, 1976. – 444 с.
7. Мирсалимов, В.М. Неоднородные упругопластические задачи / В.М. Мирсалимов. – М.: Наука, 1987. – 256 с.
8. Ильюшин, А.А. Пластичность / А.А. Ильюшин – М. – Л.: Гостехиздат, 1948. – 376 с.

Исмаилова Рена Ашраф кызы
аспирант Института математики
и механики НАН Азербайджана,
г. Баку, AZ1141, ул. Б. Вахабзаде, д. 9
тел. (+99455) 894–92–82
E-mail: mir-vagif@mail.ru

R.A. ISMAYILOVA

FRACTURE OF ROD FUEL ELEMENT

The plane problem of fracture mechanics for rod fuel element which section occupies area in circle form and weakened rectilinear crack with end zones of predfracture is considered. Interaction of face in end zones is modelled by introduction of bonds (cohesive forces) between crack face in end zones. The fracture model for rod fuel element, based on consideration of fracture process near to tip of crack with end zones of weakened interpartial material bonds is offered. It is accepted that the zone of fracture process represents as a finite length layer of the material with partially broken bonds between its separate structural elements (end zone). Definition of the unknown parameters characterizing crack growth is reduced to solution of singular integral equation. From solution of this equation the tractions in the bonds are found. The analysis of limiting balance fuel element is carried out on the basis of fracture deformation criterion.

Keywords: rod fuel element, protective cover, crack with interfacial bonds, cohesive forces.

BIBLIOGRAPHY

1. Vitvitskii, P.M. Plastic deformation in the vicinity of a crack and the criteria of fracture a review/ P.M. Vitvitskii, V.V. Panasyuk, S.Ya. Yarema // Strength of Materials. – 1973. – V. 5. – Issue 2. – S. 135–151.
2. Rusinko, A. Plasticity and Creep of Metals / A. Rusinko, K. Rusinko. – Springer, Verlag Berlin Heidelberg. – 2011. – 436 s.
3. The special issue: Cohesive models// Eng. Fract. Mech. – 2003. – V. 70. – № 14. – pp. 1741–1987.
4. Mirsalimov, V.M. The solution of a problem in contract fracture mechanics on the nucleation and development of a bridged crack in the hub of a friction pair // J. of Applied Math. and Mech., 2007, V. 71, S. 120–136.
5. Muskhelishvili, N. I. Some basic problems in the Mathematical Theory of Elasticity Amsterdam: Kluner, 1977. – 707 s.
6. Panasyuk, V.V. Savruk, M.P. Datsyshin A.P. Stress Distribution around Cracks in Plates and Shells. Kiev: Naukova Dumka, 1976. – 444 s.
7. Mirsalimov, V.M. Non–one–dimensional Elastoplastic Problems. – Mocsow: Nauka, 1987. – 256 s.
8. Il'yushin, A.A. Plasticity. Mocsow and Leningrad: Gostekhizd, 1948. – 376 s.

Ismayilova, Rena Ashraf qizi
Post-graduate student of Institute
of Mathematics and Mechanics of NAS of Azerbaijan,
tel.: (+99455) 894–92–82
E-mail: mir-vagif@mail.ru

А.Ю. КОЛЬЦОВ

ПОСТРОЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИ ОПТИМАЛЬНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ В КЛАССЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ

Рассмотрены вопросы конструктивного определения свободных параметров аппроксимирующей функции в отсутствие возможности аналитического исследования аппроксимируемой функции. Дана формулировка метода статистической оптимизации свободных параметров аппроксиматора, приведены результаты вычислительного эксперимента для случая полиномиальной аппроксимации.

Ключевые слова: численные методы, параметрическая адаптация, статистически оптимальная аппроксимация.

Задача нахождения наилучшего приближения заданной функции в некотором определенном классе можно без преувеличения считать основным вопросом вычислительной математики. Как правило, класс функций, в котором ищется приближение, выбирается заранее исходя из его конструктивных особенностей. Кроме того, не малую роль играет степень исследованности соответствующего класса. Однако даже при выборе в качестве класса, содержащего достаточно точное приближение целевой функции, хорошо исследованное множество функций, задача выбора наилучшего приближения редко оказывается достаточно простой, чтобы ее можно было решить строго алгоритмически, не прибегая к достаточно сложному аналитическому аппарату.

В теории приближений зачастую имеет смысл разделять задачи аппроксимации явно и неявно заданных функций. Это объясняется тем, что при явном задании функции, возможно ее непосредственное исследование, в частности, с использованием аппарата дифференциального и интегрального исчисления. Для неявно заданной функции такое исследование зачастую весьма затруднительно и на практике проводится достаточно редко. Тем не менее, основанные на некотором способе аппроксимации неизвестной функции численные методы оказываются тем более точны, чем лучше «угаданы» свойства вычисляемой функции и, соответственно, тип используемого приближения. Параметры приближения, обычно фигурирующие в описании численного метода неявно, необходимо подобрать таким образом, чтобы решение — некоторая конструктивно определенная функция из наперед указанного класса — было наиболее близко к оригиналу. В этой связи актуальной оказывается задача построения Чебышевского приближения в условии, когда непосредственное исследование функции по тем или иным причинам затруднительно. Вероятно, что данная задача в строгой постановке решена быть не может ввиду недостатка информации об аппроксимируемом объекте, однако вполне можно надеяться, что в процессе численного исследования явно или неявно заданного объекта, который необходимо аппроксимировать некоторым конструктивным способом, будет получено достаточно информации для того, чтобы построить оптимальное в некотором близком к Чебышевскому смысле приближение.

Пусть задан некоторый класс C параметрических функций, областью значений которых является некоторое пространство Ω . Пусть свободные параметры функций класса C также принадлежат пространству Ω . Определим для каждой $\tau \in C$ относительно аппроксимируемой функции φ некоторую положительно полуопределенную функцию ошибки $e: \Omega \rightarrow R$ и зададимся следующим вопросом: насколько «сложно» аппроксимировать функцию φ посредством элементов C в некоторой подобласти Ω ? Действительно, если выбранный класс C не обладает достаточным разнообразием, то можно ожидать, что приближение, хорошо аппроксимирующее φ в некоторой малой подобласти Ω будет давать значительно большую ошибку в других подобластях. В таком случае, желательно найти некоторую «золотую середину», дающую хороший результат «в среднем». В классической постановке это требует достижения минимума функционала $\int_{\Omega} (\varphi(x) - \tau(x))^2 d\mu$, $\tau \in C$, μ — заданная на Ω мера. Однако решение этой вариационной задачи зачастую весьма затруднительно. В этом случае можно попытаться найти обходные пути. А именно, попытаемся увязать параметры искомого приближения с «локальной сложностью» аппроксимации функции φ . Такой подход оказывается вполне адекватным для многих случаев, когда параметры функции—

аппроксиматора имеют вполне четкую интерпретацию в Ω , например, для полиномов и сплайнов — опорные точки, радиально-базисных функций — положения центров и т.д. Эмпирическое наблюдение в данном случае можно сформулировать следующим образом: чем сложнее в некоторой подобласти Ω подобрать адекватную аппроксимацию, тем плотнее в этой подобласти распределены значения свободных параметров оптимального приближения. Таким образом, при поиске приближения мы будем ориентироваться только на значение ошибки аппроксимации в некоторой области.

Пусть C_τ — пространство параметрических функций, заданных в замкнутой области Ω . Для каждого элемента $\tau \in C_\tau$ определим положительно полуопределенную функцию ошибки $e_c(x)$, например, $e_c(x) = (p(x) - \tau_c(x))^2$. Для любой величины ϵ определим функцию $\xi_i(\epsilon, x)$ равномерно распределенной на Ω случайной величины следующим образом:

$$\xi(\epsilon, x) = \begin{cases} x & \text{если } e_c(x) \geq \epsilon \\ \emptyset, \text{ иначе} & \end{cases} \quad (1)$$

Данная величина принадлежит некоторому вероятностному пространству $\bar{D} = (\Omega \cup \{\emptyset\}, \bar{\Sigma}, \bar{p})$. Спроецируем $\xi(\epsilon, x)$ на вероятностное пространство $D = (\Omega, \Sigma, p)$ так, что $\forall s \in \Sigma(\Omega) : p(s) = \overline{p(s)} \cdot \frac{1}{p(\Omega)}$. Таким образом, проекционное пространство получено из

исходного исключением из носителя значения \emptyset и нормированием вероятностной. Определенная таким образом случайная величина показывает распределение в Ω областей, в которых ошибка аппроксимации превышает заданное пороговое значение. Множества точек, в которых точность оказывается достаточной, имеют меру ноль, в остальной области распределение равномерно. Пусть ϵ_{\max} — величина порога, при которой проекционное пространство совпадает с вероятностным пространством величины $\xi(\epsilon_{\max}, x)$. Рассмотрев равномерно сходящуюся к нулю последовательность величин $\epsilon_0, \epsilon_1, \dots$, такую, что $\epsilon_0 = \epsilon_{\max}$, можно определить нормированную суперпозицию вероятностных мер:

$$p_c(s) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n p_k(\epsilon_k, s)}{n}, \quad (2)$$

как приближение к распределению величины γ , такой, что вероятность $P(\gamma = x)$ тем больше, чем выше ошибка аппроксимации в точке x . Имея возможность выбора последовательности ϵ_k сколь угодно плотной, можно аппроксимировать распределение величины γ формулой (2) сколь угодно точно.

Зададимся теперь произвольным значением порога ϵ и рассмотрим совокупность множеств меры ноль, соответствующих вероятностным мерам $p_{c_i}(\epsilon, s)$ функций $\tau_i \in C_\tau$. Нормированную суперпозицию порожденных сходящейся к аппроксимируемой функции последовательности кусочно-линейных функций последовательности распределений $p_{c_i}(\epsilon, s)$:

$$p_{c_i}(\epsilon, s) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n p_{c_k}(\epsilon, s)}{n}, \quad (3)$$

можно считать приближением распределения случайной величины η , такой, что $P(\eta = x)$ тем больше, чем больший порядок аппроксимации (размер накрывающего x сектора сетки) требуется для достижения достаточной точности.

В совокупности распределение величин γ и η дают исчерпывающую информацию о возможности аппроксимации заданной функции кусочно-линейными функциями. Объединяя приведенные рассуждения, можно рассмотреть случайную величину φ с плотностью распределения, сколь угодно точно аппроксимируемой выражением:

$$p(s) = \lim_{n \rightarrow \infty, k \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k p_{c_j}(\epsilon_i, s)}{n \cdot k} \quad (4)$$

Распределенная таким образом величина несет в себе информацию о том, «насколько сложно» аппроксимировать функцию в окрестности каждой точки $x \in \Omega$ кусочно–линейной функцией.

Конкретизируем введенное понятие «сложности аппроксимации». Пусть на замкнутой области Ω задана мера μ , на множестве аппроксимаций T также введем равномерную вероятностную меру τ . Назовем *обобщенной ошибкой аппроксимации*, определенной на σ –алгебре $\mathfrak{B}(\Omega)$, функцию $\bar{e}(s)$, задаваемую выражением:

$$\bar{e}(s) = \int_0^{\epsilon_{max}} E \left[T, \lambda \tau \cdot \frac{\mu(s_\epsilon(\tau))}{\mu(\Omega_\epsilon(\tau))} \right] d\epsilon, \quad (5)$$

где $s_\epsilon(\tau)$ и $\Omega_\epsilon(\tau)$ – краткая форма записи функции $Y(g, \epsilon, \tau) = \{x : x \in g, \tau(x) > \epsilon\}$, примененной к множествам s и Ω соответственно;

E – оператор равномерного усреднения (очевидно, линейный) по множеству значений, полученных применением функции (второму аргументу) к множеству (первому аргументу). Очевидно, что функция, по которой производится усреднение, ограничена единицей, причем верхняя грань достигается тогда и только тогда, когда множества $s_\epsilon(\tau)$ и $\Omega_\epsilon(\tau)$ совпадают (поскольку $s_\epsilon(\tau) \subseteq \Omega_\epsilon(\tau)$), то есть когда вся ошибка выше заданного порога ϵ сконцентрирована в s . Из определения следует, что $\bar{e}(\Omega) = \epsilon_{max}$, т.к.

$$\bar{e}(\Omega) = \int_0^{\epsilon_{max}} E \left[T, \lambda \tau \cdot \frac{\mu(\Omega_\epsilon(\tau))}{\mu(\Omega_\epsilon(\tau))} \right] d\epsilon = \int_0^{\epsilon_{max}} 1 d\epsilon = \epsilon_{max}$$

Легко видеть связь между определенной выше случайной величиной и обобщенной ошибкой, а именно, мера вероятностного пространства случайной величины φ совпадает с нормированной обобщенной ошибкой.

Теорема 1. Пусть обобщенная ошибка \bar{e} распределена на $(\Omega, \mathfrak{B}(\Omega), \mu)$, т.е. $\forall s \in \mathfrak{B}(\Omega) : \bar{e}(s) = \bar{e}(\Omega) \cdot \frac{\mu(s)}{\mu(\Omega)}$. Тогда средняя ошибка $E[T, e]$ также равномерна на Ω .

Доказательство. Из определения обобщенной ошибки (5) и того, что $\bar{e}(\Omega) = \epsilon_{max}$ следует, что:

$$\bar{e}(s) = \epsilon_{max} \cdot \frac{\mu(s)}{\mu(\Omega)} = \int_0^{\epsilon_{max}} \zeta(\epsilon, s) d\epsilon,$$

где $\zeta(\epsilon, s)$ – усредняемое выражение, причем из единственности первообразной следует, что ζ не зависит от ϵ и равно $\frac{\mu(s)}{\mu(\Omega)}$.

Для каждого $\epsilon \in [0; \epsilon_{max}]$ «вклад» в среднюю ошибку для фиксированного τ определяется выражением:

$$\Delta e_\epsilon = \lim_{\Delta\epsilon \rightarrow 0} \mu(s_\epsilon(\tau) \setminus s_{\epsilon+\Delta\epsilon}(\tau)).$$

Проинтегрируем это выражение по всем допустимым ϵ :

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta\epsilon \rightarrow 0} \int_0^{\epsilon_{max}} \mu(s_\epsilon(\tau) \setminus s_{\epsilon+\Delta\epsilon}(\tau)) d\epsilon = \\ = \lim_{\Delta\epsilon \rightarrow 0} \int_0^{\epsilon_{max}} (\mu(s_\epsilon(\tau)) - \mu(s_{\epsilon+\Delta\epsilon}(\tau))) d\epsilon. \end{aligned} \quad (6)$$

Поскольку $E \left[T, \lambda \tau \cdot \frac{\mu(\Omega_\epsilon(\tau))}{\mu(\Omega_\epsilon(\tau))} \right] = \frac{\mu(s)}{\mu(\Omega)}$, существует такое k , вообще говоря, зависящее от ϵ , что $E[T, \lambda \tau \cdot \mu(s_\epsilon(\tau))] = k(\epsilon)\mu(s)$ и $E[T, \lambda \tau \cdot \mu(\Omega_\epsilon(\tau))] = k(\epsilon)\mu(\Omega)$. Тогда усреднив (\backslash ref{part_of_error}) по T , получим:

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta\epsilon \rightarrow 0} \int_0^{\epsilon_{max}} E[T, \lambda \tau \cdot \mu(s_\epsilon(\tau)) - \mu(s_{\epsilon+\Delta\epsilon}(\tau))] d\epsilon = \\ = \lim_{\Delta\epsilon \rightarrow 0} \int_0^{\epsilon_{max}} (k(\epsilon)\mu(s) - k(\epsilon + \Delta\epsilon)\mu(s)) d\epsilon = \mu(s) \cdot \int_0^{\epsilon_{max}} k'(\epsilon)(d\epsilon)^2. \end{aligned} \quad (7)$$

Полученное выражение, эквивалентное усредненной по всему множеству аппроксимаций ошибки на s , пропорционально мере множества s , причем множитель не зависит от выбора s – что и требовалось доказать.

Следствие: при случайном выборе аппроксимации $\tau \in T$ в случае равномерности распределения обобщенной ошибки в области $s \in \Omega$ математическое ожидание разницы ошибки аппроксимации при другом выборе τ равна нулю. Иными словами, при равномерном распределении обобщенной ошибки статистически безразлично, какой вариант аппроксимации выбрать. Это дает основание предпочесть наиболее простой способ приближения – то есть в случае кусочно–линейной аппроксимации покрыть область Ω минимальным количеством элементов.

Поскольку непосредственное вычисление обобщенной ошибки и разбиение области Ω на участки, в которых распределение близко к равномерному, затруднительно, можно использовать ее связь со случайной величиной φ и свести построение «статистически оптимальной аппроксимации» заданного порядка к следующей формулировке.

Задача 1 (О статистически оптимальной аппроксимации). Пусть (Ω, ρ) – метрическое пространство, точка φ случайным образом выбирается из Ω согласно вероятностному распределению (5). Для заданного m выбрать такую схему кодирования случайной величины φ , которая минимизирует функционал ожидаемого искажения.

В зависимости от выбора метрического пространства и модели случайной величины возможны различные варианты функционала ожидаемого искажения. В случае, если входное пространство является векторным, стандартный функционал искажения имеет вид:

$$D = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} dx f_x(x) \rho(x, x'), \quad (8)$$

где x' – код сигнала x (предполагается, что кодер переводит величину в то же метрическое пространство);

f_x – плотность вероятности.

В случае необходимости учета дополнительных факторов, таких как шум вычислительных погрешностей, более предпочтительными оказываются другие формы функционала [1]. Необходимые условия оптимальности даются в обобщенном алгоритме Ллойда.

Совокупность опорных точек кодера разбивают область Ω на непересекающиеся области таким образом, в которых обобщенная ошибка может считаться распределенной равномерно, причем условие оптимальности данной схемы кодирования гарантирует то, что любое другое разбиение только увеличивает искажение. Как было показано, каждую такую область можно аппроксимировать одним элементом – и такая аппроксимация будет в указанном смысле оптимальной.

Ранее было отмечено, что положенные в основу предложенного метода допущения наиболее адекватны в случае локальной аппроксимации. Интересно в таком случае проверить результаты применения данного метода при подборе параметров аппроксиматоров, осуществляющих глобальную аппроксимацию.

Проверим результаты применения рассмотренного метода на примере аппроксимации функции одной переменной полиномами разных степеней. Известно, что оптимальный выбор узлов полиномиальной интерполяции определяется корнями полинома Чебышева, а наиболее частым «ручным» подбором узлов интерполяции служат равноотстоящие узлы. На графике (рисунок 1) показаны кривые степени близости интерполирующего полинома к аппроксимируемой функции по метрике пространства L^2 для трех перечисленных случаев. Из данного графика можно видеть, что предложенный метод хотя и не дает оптимума в привычном понимании, тем не менее приводит к улучшению точности получаемой аппроксимации по сравнению с тривиальным выбором узлов и почти совпадает с оптимальным в смысле Чебышева приближением. В некоторых случаях построенное приближение оказывается даже лучше в смысле близости по метрике пространства L^2 приближения, основанного на корнях полинома Чебышева, что объясняется формой построения этого полинома, дающего минимум в метрике другого пространства. Этот момент также следует учитывать, поскольку многие стандартные программы основаны на приближениях, оптимальных с иной точки зрения, нежели требуется в конкретном приложении.

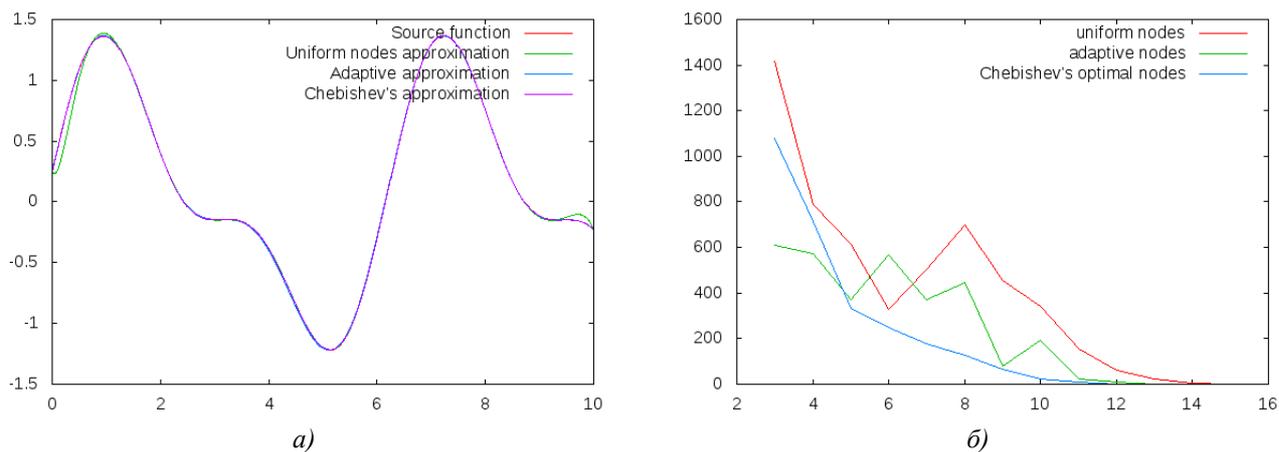


Рисунок 1 – К вопросу о точности полиномиальной аппроксимации при различных способах выбора узлов интерполяции:

а) Аппроксимируемая функция и ее приближения полиномами пятнадцатой степени при различных способах выбора узлов интерполяции; б) Степень близости полиномиальных приближения разных степеней к аппроксимируемой функции в метрике пространства L^2

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gersho A. and R.M. Gray. Vector Quantization and Signal Compression, Norwell, MA: Kluwer. – 1992.
2. Коллатц, Л. Теория приближений. Чебышевские приближения и их приложения / Л. Коллатц, В. Крабс. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1978. – 272 с.
3. Бахвалов, Н.С. Численные методы. – 7-е изд. / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 636 с.
4. Колмогоров, А.Н. Элементы теории функций и функционального анализа. – 7-е изд. / А.Н. Колмогоров, С.В. Фомин. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 572 с.

Кольцов Александр Юрьевич
 ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК»
 Аспирант каф. «Мехатроника и международный инжиниринг»
 E-mail: me@alexander-koltsov.ru

A.Yu. KOLTISOV

CONSTRUCTION OF THE OPTIMAL APPROXIMATION IN CLASS OF PARAMETRIC FUNCTIONS

The theme is a constructive definition of the free parameters of the approximating function in the absence of the possibility of an analytical study of the approximated function. Defined the method of statistical optimization of approximator's free parameters, the results of computational experiments for the case of polynomial approximation.

Keywords: numerical methods, statistic-optimal approximation, parametric adaptation.

BIBLIOGRAPHY

1. Gersho A. and R.M. Gray. Vector Quantization and Signal Compression, Norwell, MA: Kluwer. – 1992.
2. Kollatts, L. Teoriya priblizheniy. Chebyshevskiye priblizheniya i ikh prilozheniya / L. Kollatts, V. Krabs. M.: Nauka, Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1978. – 272 s.
3. Bakhvalov, N.S. Chislennyye metody. – 7-ye izd. / N.S. Bakhvalov, N.P. Zhidkov, G.M. Kobel'kov. M.: BINOM. Laboratoriya znaniv, 2011. – 636 s.
4. Kolmogorov, A.N. Elementy teorii funktsiy i funktsional'nogo analiza. – 7-ye izd. / A.N. Kolmogorov, S.V. Fomin. M.: FIZMATLIT, 2009. – 572 s.

Koltsov Alexandr Yurevich
 State University ESPC
 Postgraduate dep. «Mechatronics and international engineering»
 E-mail: me@alexander-koltsov.ru

ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЯТЕН В ЗАДАЧАХ МЕХАНИКИ ДИСКРЕТНОГО КОНТАКТА

Теория контактного взаимодействия предполагает наличие определенного закона распределения площадей пятен касания двух сопряжённых поверхностей. Эти пятна, являясь опорной поверхностью, непосредственно воспринимают нагрузку и во многом определяют процессы взаимодействия поверхностей. Их анализ с позиции фрактальной геометрии показал, что наиболее приемлемым законом распределения фактических площадок контакта является степенной, описывающий структуру и процессы, протекающие в сложных системах, какой и является контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. Компьютерные программные продукты, написанные авторами, позволяют определить фрактальную размерность контактного зазора, а также вид и форму степенной зависимости, описывающей распределение пятен контакта при взаимодействии инженерных поверхностей, что позволит по-новому подойти к решению контактных задач.

Ключевые слова: контактное взаимодействие поверхностей, зазор, фрактальная размерность, распределение пятен контакта.

При проектировании любого технического объекта инженер практически всегда сталкивается с контактными задачами, связанными с взаимодействием инженерных поверхностей. При непосредственном давлении одного тела на другое фактическая площадь их контакта состоит из отдельных пятен, несущих всю нагрузку. Представляет интерес оценить форму и размеры площадей дискретных пятен касания, а также закон распределения этих площадок. Обычно в задачах механики контактного взаимодействия шероховатых поверхностей используют распределение высот выступов так, чтобы опорные кривые профиля и модели совпадали. Так, в модели Гринвуда–Вильямсона [1] принят нормальный закон распределения, в работе [2] показано, что распределение высот вершин не всегда является гауссовым. Закон распределения высот выступов зависит от вида спектральной функции и ширины спектра, определяемого соотношением:

$$\delta = \frac{m_0 m_4}{m_2^2},$$

где m_0, m_2, m_4 – моменты спектральной плотности.

Чем меньше величина δ , тем больше вероятность появления высоких вершин, что характерно для поверхностей при обработке резанием. При $\delta \rightarrow \infty$ распределение высот выступов близко к гауссовому. В некоторых случаях приемлемым считается принятие для высот выступов бета-распределения. Для известных моделей шероховатой поверхности в виде набора сферических сегментов, высоты которых имеют вероятностное распределение, принимается для всех неровностей радиус закругления верхней части выступа одним и тем же. Ранее [3] показано, что учет вероятностного распределения радиусов закругления по сравнению с допущением о постоянстве радиуса приводит к существенному расхождению оценок параметров контактирования.

С физической точки зрения выявить и провести соответствующий анализ площадок контакта в микрометровом диапазоне измерения представляет собой довольно сложную задачу, и применение компьютерных технологий делает возможным проведение такого анализа [10]. Рассмотрим задачу оценки фрактальной размерности и определения закона распределения площадей пятен касания применительно к инженерным поверхностям.

Сравним соотношение «периметр–площадь» для не фрактальных (таблица 1) и фрактальных геометрических объектов (пятно касания представлено в виде острова).

Таблица 1 – Соотношение «периметр–площадь» для не фрактальных объектов

Фигура	Периметр P	Площадь A	$R = P/A^{1/2}$
Круг	πD	$\pi D^2/4$	3,545
Шестигранник	$6L$	$3^{3/2} L^2/2$	3,722
Квадрат	$4L$	L^2	4

По аналогии с не фрактальными объектами запишем соотношение «периметр–площадь» в виде

$$R(\delta) = \frac{P^{1/D}}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

где P – периметр;
 A – площадь;
 $R(\delta)$ – параметр, зависящий от масштаба измерения (размера квадратной ячейки);
 D – фрактальная размерность «береговой» линии исследуемого острова ($1 < D < 2$).
 Учитывая, что периметр равен $P(\delta) = c\delta^{1-D}[A(\delta)]^{D/2}$, запишем соотношение (1) в виде:

$$\frac{[P(\delta)]^{1/D}}{\sqrt{A}} = c^{1/D} \delta^{\frac{1-D}{D}} \quad (2)$$

где $c = N \cdot \lambda^D$ – коэффициент пропорциональности;
 N – число ячеек размером δ , которыми измерили остров;
 λ – произвольный параметр [4].

Соотношение (2) выражает условие самоподобия «островов» с фрактальными границами (при этом масштаб измерения δ должен быть сопоставим с масштабом сканирования поверхности, в нашем случае это 5 мкм). Прологарифмировав соотношение (2) и преобразовав его, запишем

$$\lg A(\delta) = -2\lg \left(c^{1/D} \delta^{\frac{1-D}{D}} \right) + \frac{2}{D} \lg P(\delta) \quad (3)$$

На рисунке 1 показана зависимость периметр – площадь, представленная в логарифмических координатах.

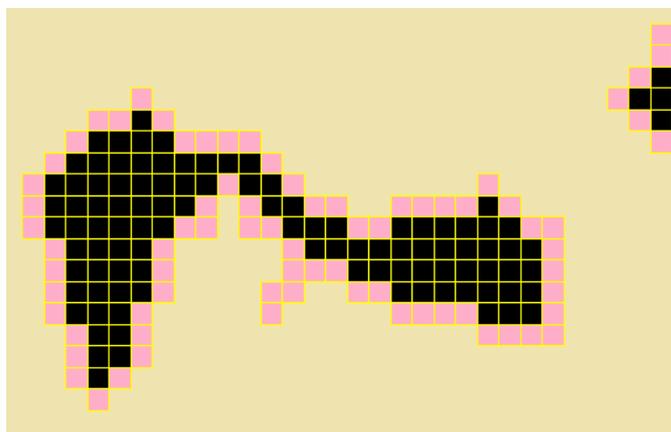
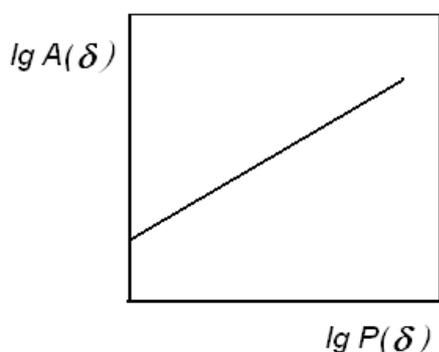


Рисунок 1 – Зависимость площадь – периметр Рисунок 2 – Модель инженерной поверхности (800 мкм x 800 мкм)

Угловым коэффициентом прямой, представленной на рисунке 1, равен $2/D$. Анализ выражения (3) показывает, что величиной $-2\lg(c^{1/D} \delta^{(1-D)/D})$, зависящей от масштаба измерения δ , можно пренебречь, так как при достаточно большом масштабе измерения «остров» становится не фрактальным объектом (при $D = D_E = 1$ и $c = 1$, имеем $-2\lg(\delta^0) = 0$).

Окончательно найдём фрактальную размерность «береговой» линии:

$$D = \frac{2\lg P(\delta)}{\lg A(\delta)} \quad (4)$$

График (рисунок 1), построенный в двойных логарифмических координатах, отражает условие самоподобия и позволяет найти фрактальную размерность. Процедура определения фрактальной размерности заключается в покрытии фрактального объекта – «острова» – квадратной сеткой с размером ячейки δ . В этом случае периметр и площадь фигуры можно определить по формулам $P(\delta) = N_P \delta$; $A(\delta) = N_A \delta^2$,

где N_P – число заполненных «береговой» линией ячеек;
 N_A – число ячеек, покрывающих площадь «острова» (рисунок 2).

Здесь светло-серые квадратики (ячейки) относятся только к периметру пятна контакта N_P , а тёмные – к площади N_A . Таким образом, после подсчета N_P и N_A , вычисляется фрактальная размерность D . Для определения фрактальной размерности поверхности используем подход, предложенный Б. Мандельбротом [4]: $D_S = D + 1$.

На рисунке 3 представлена поверхность, для которой следует найти фрактальную размерность и закон распределения площадей пятен касания.

Для этого исследуемую поверхность подвергнем сжатию гладким штампом [7]. В результате получим картину, содержащую пятна касания (рисунок 4).

На рисунке 4 показана разработанная нами компьютерная программа, позволяющая определить пятна контакта, размеры периметра и площади каждого пятна, (число

квадратиков, покрывающих береговую линию и саму площадь). Внизу показан профиль поверхности по линии, пересекающей пятна в главном окне программы.

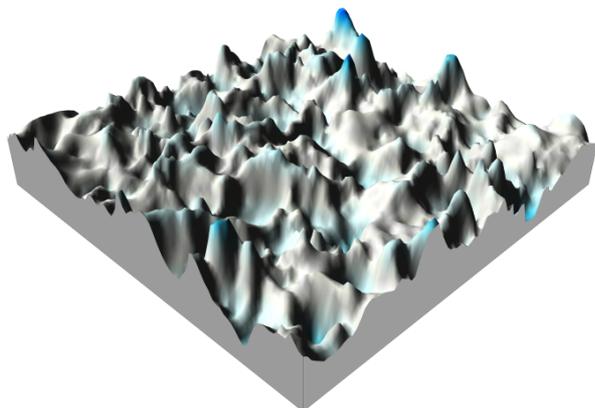


Рисунок 3 – Модель инженерной поверхности (800 мкм x 800 мкм)

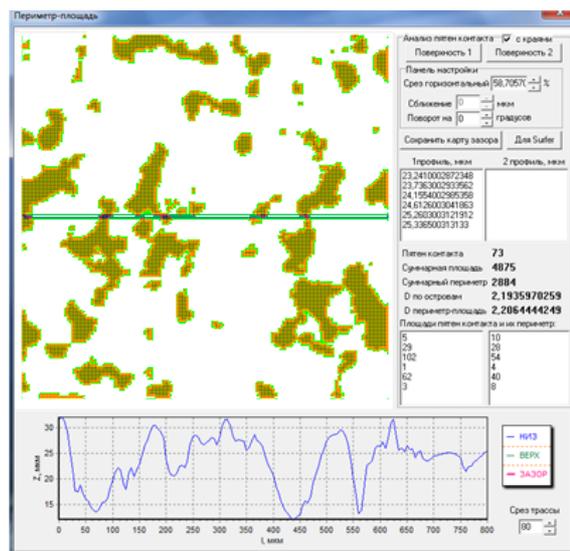


Рисунок 4 – К определению фрактальной размерности

Фрактальная размерность определялась двумя способами: методом «периметр–площадь» для всей карты контакта и методом «покрытия» каждого острова в отдельности квадратной сеткой и измерением числа ячеек, покрывающих площадь, при уменьшении размеров ячеек [8]. Во втором случае фрактальная размерность определялась для каждого i -го острова (пятна), и окончательный результат вычислялся как среднее арифметическое.

Проведенные дополнительные исследования показали, что более приемлемым методом для оценки фрактальной размерности является метод «периметр–площадь», т.к. метод «покрытия» каждого острова в отдельности является более затратным и даёт большой разброс значений.

Сравнение двух методов можно увидеть на рисунке 5, где толстой линией показан метод «периметр–площадь» для всей карты и тонкой – метод «покрытий» каждого острова в отдельности в зависимости от высоты среза.

После того, как произведена оценка всех площадей, используем набор данных для построения графика плотности распределения площадок пятен (рисунок 6). Для оценки рационального объема выборки используем в первом приближении нормальный закон распределения, т.к. он является предельным, к которому приближаются многие другие и часто встречается в природе. Тогда объем выборки найдем, используя соотношение $n = \frac{\sigma^2}{\Delta^2}$,

где σ^2 – дисперсия;
 Δ – ошибка.

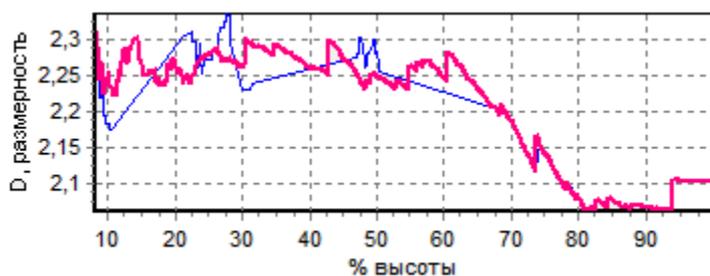


Рисунок 5 – Зависимость фрактальной размерности от высоты среза

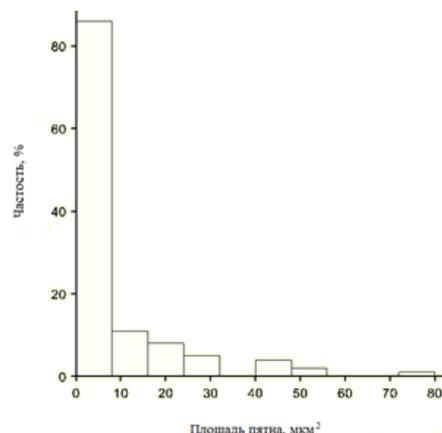


Рисунок 6 – Плотность вероятности распределения площадей пятен

Полагая, что $\Delta = \sigma/6$, оценим минимальное значение объема выборки, равное $n \geq 36$.

В данном примере $n=73$. Оценка выборки по методу К.Н. Воинова [5] показала, что закон распределения фактически сформировался при $n=62$. При меньшем объеме выборки следует произвести «размножение» данных, например, с помощью бутстреп-метода, предложенного Б. Эфроном.

Интегральная (эмпирическая) функция (ЭФР) распределения сравнивалась с теоретическими законами (ТФР), которые имели соответствующее отклонение d . В частности, на рисунке 7, представлено сравнение эмпирической функции (кружочки) и теоретической функции распределения Парето (рисунок 7, а) и логнормальной функции (рисунок 7, б).

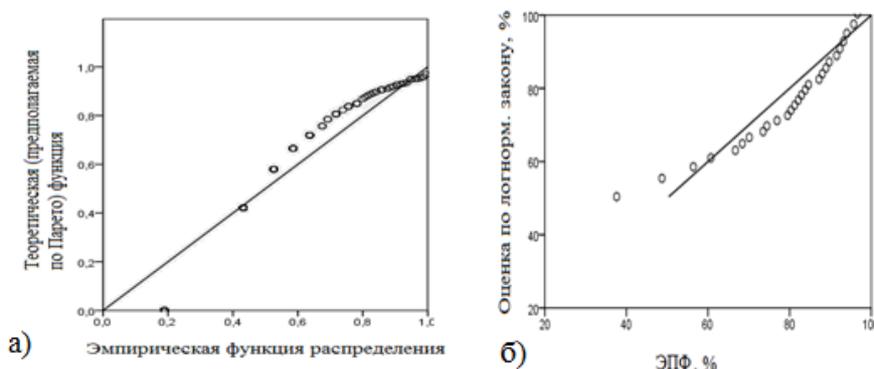


Рисунок 7 – Сравнение эмпирической и подбираемыми теоретическими функциями распределения

Критерием согласия эмпирической функции распределения с предлагаемым теоретическим законом распределения принят критерий А.Н. Колмогорова, в соответствии с которым предлагаемый теоретический закон распределения, наилучшим образом соответствующий эмпирическому закону, должен удовлетворять условию:

$$d < d_{кр} = \frac{\lambda}{\sqrt{N}}$$

где λ – критерий Колмогорова – Смирнова, соответствующий уровню значимости α ;
 N – объем выборки (число анализируемых пятен).

Отклонения между теоретическим и статистическим распределением по Парето $d=0,18$, логнормальный закон $d=0,16$, экспоненциальный закон $d=0,25$.

При $\alpha=0,05$ принимают $\lambda=1,36$. Для данного примера критическое значение расхождения эмпирического и теоретического закона распределения не должно быть больше $d_{кр} = \frac{1,36}{\sqrt{73}} = 0,159$, что указывает на то, что предлагаемые законы не отвечают требованию критерия согласия.

Фундаментальное положение в теории контактного взаимодействия о дискретности контакта предполагает наличие определенного распределения площадей пятен касания [6]. Сравним плотности вероятности величин, распределенных по степенному, экспоненциальному и нормальному (гауссовому) закону. Вид функции распределения каждого закона представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Вид функции распределения степенного, экспоненциального и нормального закона.

Степенной	Экспоненциальный	Нормальный (гауссов)
$f_{ст}(x) \sim Cx^{-\alpha};$	$f_{экс}(x) \sim e^{-\lambda x};$	$f_{норм}(x) \sim \exp \left[-\frac{(x - \langle x \rangle)^2}{2\sigma^2} \right]$

На рисунке 8, а представлены графики плотности вероятности случайных величин, распределенных в соответствии с нормальным, экспоненциальным и степенным законами. На рисунке 8, б эти же графики приведены в двойных логарифмических координатах.

Учитывая присутствие растущего перколяционного кластера при сближении поверхностей, можно отметить, что распределение пятен контакта является распределением с тяжелыми хвостами, которое хорошо описывается универсальным степенным законом. К тому же степенные законы отражают структуру и процессы, протекающие в сложных системах, и в двойных логарифмических координатах имеют вид прямой, что говорит о скейлинговом поведении, т.е. об отсутствии выделенных масштабов и наличии фрактального поведения.

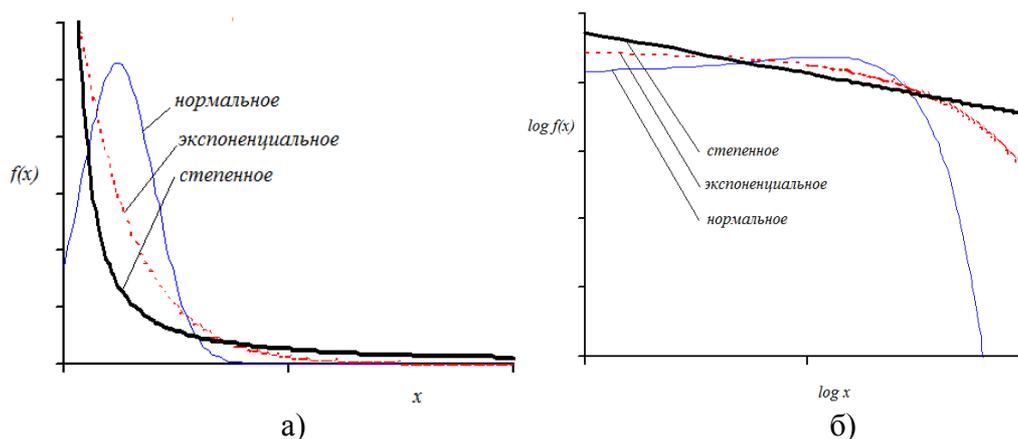


Рисунок 8 – Плотности распределения вероятности по соответствующим законам

Вероятность того, что случайным образом взятое пятно будет иметь фактическую площадь Pr большую a , равна функции: $Pr(A > a) = F(a^{-\alpha})$, где α – показатель степени.

Расположим площади пятен в порядке уменьшения их размера. Выбор одного такого пятна случайным образом с равномерным распределением означает выбрать один порядковый номер из списка. В этом случае можно заменить $Pr(A > a)$ на $N(A > a)$.

Число пятен контакта определяется выражением:

$$N(A > a) \propto \left(\frac{a}{a_{max}}\right)^{-\frac{D}{2}}.$$

Пусть плотность распределения относительной площади пятна контакта соответствует степенному закону $f(a^*) = C(a^*)^{-\alpha}$,

где $0 < a_{min}^* \leq a^* \leq 1$, $a_{min}^* = a_{min}/a_{max}$.

Средний размер площади пятна контакта равен

$$\langle a^* \rangle = \int_{a_{min}^*}^1 C(a^*)^{-\alpha} \cdot a^* da^*.$$

где a^* – переменная интегрирования.

Проинтегрировав, получим

$$\langle a^* \rangle = \frac{C}{2-\alpha} [1 - (a_{min}^*)^{2-\alpha}]. \quad (\alpha \neq 0)$$

Величину C найдем из условия нормировки:

$$C = \frac{1-\alpha}{1 - (a_{min}^*)^{1-\alpha}}.$$

Тогда площадь среднего пятна контакта (при бесконечно большом числе пятен N – это математическое ожидание) находится из выражения:

$$\langle a^* \rangle = \frac{1-\alpha [1 - (a_{min}^*)^{2-\alpha}]}{2-\alpha [1 - (a_{min}^*)^{1-\alpha}]}.$$

Интегральная функция распределения определяется как:

$$F(a^*) = \int_{a_{min}^*}^{a^*} C(a^*)^{-\alpha} da^* = \frac{C}{1-\alpha} [(a^*)^{1-\alpha} - (a_{min}^*)^{1-\alpha}] = \frac{(a^*)^{1-\alpha} - (a_{min}^*)^{1-\alpha}}{1 - (a_{min}^*)^{1-\alpha}}.$$

При $a_{min}^* \rightarrow 0$ имеем $F(a^*) = (a^*)^{1-\alpha}$.

Обозначим $p = 1 - \alpha$, $1 < D < 2$. Плотность вероятности распределения относительной площади пятен определяется соотношением:

$$f(a^*) = \frac{dF(a^*)}{da^*} = (1 - \alpha^*)(a^*)^{-\alpha}.$$

Тогда число пятен с площадью в диапазоне от a_1^* до a_2^* , будет равно:

$$N(a_1^* \leq a^* \leq a_2^*) = (a^*)^{-\frac{D}{2}} \int_{a_1^*}^{a_2^*} f(a^*) da^* = \frac{2p}{2p - D} \left[(a_1^*)^{\frac{2p-D}{2}} - (a_2^*)^{\frac{2p-D}{2}} \right].$$

На рисунке 9 представлены результаты компьютерного анализа фрактальной поверхности. Здесь представлены при определенном сближении гладкого штампа с шероховатой поверхностью форма и размеры пятен касания. В нижней правой части приведен график эмпирической функции распределения и подбираемой теоретической функции распределения (гладкая кривая). В данном случае после проверки согласия по критерию А.Н. Колмогорова приемлемой функцией распределения ($d = 0.042 \ll d_{кр} = 0,159$) будет функция:

$$F(a^*) = (a^*)^{1-\alpha} = (a^*)^{0,489}.$$

В этом случае число пятен контакта достаточно и их размножение бутстреп-методом не потребовалось.

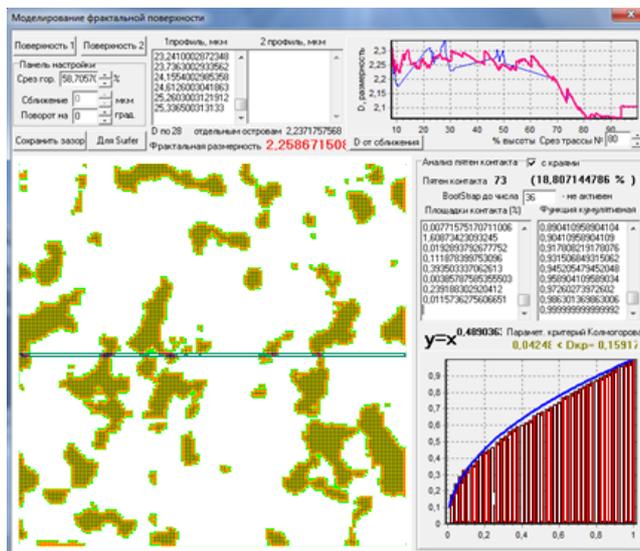


Рисунок 9 – Моделирование фрактальной поверхности и оценка параметров контактного взаимодействия

Таким образом, показано, что для инженерных поверхностей более точным законом распределения площадок пятен контакта является степенной закон. Разработанное нами программное обеспечение для анализа пятен контакта может определить фрактальную размерность инженерных поверхностей по методу «периметр–площадь» с расчётом геометрических параметров всех пятен контакта и их визуализацией. Приведенные соотношения и разработанное компьютерное обеспечение позволяет определить среднее значение площадки касания и число пятен в заданном диапазоне площадей с определением закона их распределения и оценкой погрешности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Greenwood, J.A. Contact of nominally flat surfaces/J.A. Greenwood, J.B.P. Williamson//Proc. Royal Soc. London.–Ser. A. – 1966. – V. 293. – pp. 300–319.
2. Найак, П. (Nayak, P.R.) Применение модели случайного поля для исследования шероховатых поверхностей/ П. Найак//Проблемы трения и смазки. – 1971. – №3. – С. 85–95.
3. Тихомиров, В.П. Двумерная модель неровностей поверхности твердых тел / В.П. Тихомиров, О.А. Горленко // Трение и износ. – 1986. – Т.7. – № 3. – С. 527–531.
4. Мандельброт, Б Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт // Пер. с англ. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
5. Войнов, К.Н. «Надёжность вагонов». – М.: изд-во "Транспорт", 1989. – 112 с.
6. Newman, M. E. J. Power laws, Pareto distributions and Zipf's law/ M.E.J. Newman//Contemporary Physics. – 2005. – V. 46. – № 5. – pp. 323–351.
7. Потапов, А.А. Теория рассеяния волн фрактальной анизотропной поверхностью / А.А. Потапов, А.В. Лактюнькин // Нелинейный мир. – 2001. – Т. 6. – № 6. – С. 3–36.
8. Тихомиров, В.П. Контактное взаимодействие фрактальных поверхностей/ В.П. Тихомиров// Трение и износ.–1997. – Т. 18. – №3. – С.369–374.
9. Маджумдар, А. Фрактальная модель упругопластического контакта шероховатых поверхностей /А. Маджумдар, Б. Бхушан // Современное машиностроение. Сер. Б. – 1991. – № 6. – С.11–23.
10. Bhushan, B. Contact mechanics of rough surfaces in tribology: Multiple asperity contact / B. Bhushan // Tribology Letters. – 1998. – V. 4. – pp. 1–35.

Измеров Михаил Александрович
ФГБОУ ВПО «Брянский государственный
технический университет»,
г. Брянск, Бульвар 50-летия Октября, д.7,
к.т.н., доц. каф. «Детали машин»
тел. 89529601719
E-mail: maik51@yandex.ru

Тихомиров Виктор Петрович
ФГБОУ ВПО «Брянский государственный
технический университет»,
г. Брянск, Бульвар 50-летия Октября, д.7,
д.т.н., зав. каф. «Детали машин»
тел. 8(4832)58-82-12
E-mail: dm-bgtu@yandex.ru

Воробьев Владимир Иванович
ФГБОУ ВПО «Брянский государственный
технический университет»,
г. Брянск, Бульвар 50-летия Октября, д.7,
к.т.н., доц. каф. «Подвижной состав железных дорог»
тел. 8(4832)56-02-61
E-mail: vladimvorobiev@yandex.ru

Волохов Станислав Григорьевич
ФГБОУ ВПО «Брянский государственный
технический университет»,
г. Брянск, Бульвар 50-летия Октября, д.7,
аспирант каф. «Детали машин»
тел. 8(4832)58-82-12
E-mail: aivent@mail.ru

M.A. IZMEROV, V.P. TIKHOMIROV, V.I. VOROBJEV, S.G. VOLOKHOV

DISTRIBUTION LAW OF SPOTS IN PROBLEMS OF DISCRETE CONTACT MECHANICS

The theory of contact interaction assumes existence of a certain law of distribution of the areas of spots of a contact of two interfaced surfaces. These spots, being a basic surface, directly perceive loading and in many respects define processes of interaction of surfaces. Their analysis from a position of fractal geometry showed that the most acceptable law of distribution of the actual platforms of contact is sedate, describing structure and the processes proceeding in difficult systems what contact interaction of rough surfaces is. The computer software products written by authors, allow to define fractal dimension of a contact gap, and also a look and a form of the sedate dependence describing distribution of spots of contact at interaction of engineering surfaces that will allow to approach to the solution of contact tasks in a new way.

Keywords: contact interaction of surfaces, gap, fractal dimension, distribution of spots of contact.

BIBLIOGRAPHY

1. Greenwood, J.A. Contact of nominally flat surfaces/J.A. Greenwood, J.B.P. Williamson//Proc. Royal Soc. London. – Ser. A. – 1966. – V. 293. – pp. 300–319.
2. Navak, P. (Navak, P.R.) Primenenive modeli sluchavnogo polva dlya issledovaniya sherokhovatykh poverkhnostev/ P. Navak//Problemv treniva i smazki. – 1971. – №3. – S. 85–95.
3. Tikhomirov, V.P. Dvumernaya model' nerovnostey poverkhnosti tverdykh tel / V.P. Tikhomirov, O.A. Gorlenko // Trenive i iznos. – 1986. – T.7. – № 3. – S. 527–531.
4. Mandel'brot, B. Fraktal'naya geometriya prirody / B. Mandel'brot // Per. s angl. – M.: Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2002. – 656 s.
5. Vovnov, K.N. «Nadozhnost' vagonov». – M.: izd-vo "Transport", 1989. – 112 s.
6. Newman, M. E. J. Power laws, Pareto distributions and Zipf's law/ M.E.J. Newman//Contemporary Physics. – 2005. – V. 46. – № 5. – pp. 323–351.
7. Potapov, A.A. Teoriya rassevaniya voln fraktal'noy anizotropnoy poverkhnost'yu / A.A. Potapov, A.V. Laktyun'kin // Nelineynyy mir. – 2001. – T. 6. – № 6. – S. 3–36.
8. Tikhomirov, V.P. Kontaktnoye vzaimodeystviye fraktal'nykh poverkhnostey/ V.P. Tikhomirov// Treniye i iznos. – 1997. – T. 18. – №3. – S.369–374.
9. Madzhumdar, A. Fraktal'naya model' usugoblasticheskogo kontakta sherokhovatykh poverkhnostey /A. Madzhumdar, B. Bkhusan // Sovremennoye mashinostroyeniye. Ser. B. – 1991. – № 6. – S.11–23.
10. Bhushan, B. Contact mechanics of rough surfaces in tribology: Multiple asperity contact / B. Bhushan // Tribology Letters. – 1998. – V. 4. – pp. 1–35.

Izmerov Mikhail Aleksandrovich
FGBOU VPO "Bryansk state technical university",
Bryansk, 50-letiya Oktyabrya Boulevard, 7,
Cand.Tech.Sci., associate prof. of the department. "Details
of cars"
ph. 89529601719
E-mail: maik51@yandex.ru

Tikhomirov Victor Petrovich
FGBOU VPO "Bryansk state technical university",
Bryansk, 50-letiya Oktyabrya Boulevard, 7,
Dr.Sci.Tech., Head. Department. "Details of cars"
ph. 8 (4832)58-82-12
E-mail: dm-bgtu@yandex.ru

Vorobyov Vladimir Ivanovich
FGBOU VPO "Bryansk state technical university",
Bryansk, 50-letiya Oktyabrya Boulevard, 7,
Cand.Tech.Sci., associate prof. of the department. "A
rolling stock of the railroads"
ph. 8 (4832)56-02-61
E-mail: vladimvorobiev@yandex.ru

Volokhov Stanislav Grigoryevich
FGBOU VPO "Bryansk state technical university",
Bryansk, 50-letiya Oktyabrya Boulevard, 7,
graduate student of the department "Details of cars"
ph. 8 (4832)58-82-12
E-mail: aivent@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

УДК 621.91.06–187.4–529:001.891.54

Н.В. КАНАТНИКОВ, Г.А. ХАРЛАМОВ, В.С. ШОРКИН

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗАНИЕМ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПРОФИЛЕЙ ДЕТАЛЕЙ

В статье рассматривается вопрос оптимизации технологического процесса обработки периодических поверхностей деталей машин по критерию энергоэффективности. В работе представлен вариант управления энергетической эффективностью резания. Это связано с тем, что механическая работа, совершаемая инструментом, влияет на нагрузочные потери в приводе и устанавливает общее количество энергии, потребляемой двигателем оборудования. В статье рассматриваются показатели, с помощью которых можно оценить процесс резания по критерию затрачиваемой энергии, в частности: удельной энергоёмкости и "энергетического КПД процесса резания". В качестве основы для управления резанием предлагается использовать методику, основанную на анализе виртуальной модели процесса обработки, позволяющую получить аналитические данные о кинематике и динамике резания.

***Ключевые слова:** периодический профиль, управление процессом обработки, виртуальная модель процесса обработки, энергоэффективность, энергетические затраты.*

Существует ряд показателей, по которым можно оценить процесс резания с точки зрения затрачиваемой энергии в частности удельная энергоёмкость процесса резания численно характеризует количество энергии, затрачиваемой режущим инструментом на отделение в виде стружки единицы объёма срезаемого слоя заготовки (предварительные стадии обработки), либо на образование единицы площади новой поверхности детали. Это универсальный физический показатель эффективности процесса резания. К достоинствам удельной энергоёмкости процесса резания следует отнести простоту её определения как теоретическими, так и экспериментальными методами [1].

Энергоёмкость валового внутреннего продукта России в 2,5 раза выше среднемирового уровня. В государственной программе Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года» запланировано к 2020 г. снижение общей энергоёмкости промышленного производства на 31,3%, снижение общей электроёмкости на 31,8%.

Остро проблема энергосбережения возникла в механообрабатывающем производстве. Отличительной чертой машиностроения по сравнению с другими отраслями промышленности является высокий уровень энергоёмкости изготавливаемых изделий. В последние несколько десятилетий удельный вес энергетической составляющей в себестоимости продукции, изготавливаемой на машиностроительных предприятиях, увеличился до 25 процентов. На отечественных машиностроительных предприятиях на образование тонны стружки расходуется в среднем 450–600 кВт·ч электроэнергии, в то время как на аналогичную продукцию, выпускаемую в индустриально развитых странах Европы расходуется в 1,5 – 2,0 раза меньше электроэнергии. В первую очередь это связано с тем, что при разработке технологических процессов в Германии, Франции и др. странах наряду с основными критериями (себестоимость, точность, производительность) применяют такие критерии, как удельная энергоёмкость и съём металла на единицу мощности [2].

Наибольшая часть формообразуемых деталей (более 2/3 общей номенклатуры) приходится на фигурные, профильные и другие детали сложной формы [3], а накопленный парк технологического оборудования не позволяет снизить операционное время на их изготовление и, к тому же, сконструирован ещё в 80-х годах, в эпоху дешевой энергии. Обработка данных поверхностей может занимать до 70% основного времени изготовления детали.

Таким образом, повышение энергоэффективности технологических процессов лезвийной обработки путём оптимизации энергетических затрат на их осуществление является актуальной задачей отечественного машиностроительного производства.

Целью данной работы является дополнение существующей методики управления процессом обработки периодических профилей деталей машин [4] с целью определения ра-

циональных параметров технологической системы, режимов обработки и конструкции режущего инструмента при которых требуемые значения качества получаемых поверхностей, стойкости режущего инструмента и производительности будут обеспечиваться за счёт минимально необходимого количества энергетических затрат.

В общем случае задача повышения энергетической эффективности процессов обработки резанием может решаться путем снижения энергетических потерь в:

- зоне резания;
- механической части оборудования;
- электрической части оборудования.

В данной работе рассмотрен вариант управления энергетической эффективностью процесса, так как механическая работа, совершаемая режущим инструментом при каждом рабочем ходе и определяемая закономерностями стружкообразования, влияет на нагрузочные потери в трансмиссии и устанавливает, в конечном счёте, общее количество энергии, потребляемой двигателем станка.

Существует ряд показателей, по которым можно оценить процесс резания с точки зрения затрачиваемой энергии, в частности, удельная энергоёмкость процесса резания численно характеризует количество энергии, затрачиваемой режущим инструментом на отделение в виде стружки единицы объёма срезаемого слоя заготовки (предварительные стадии обработки), либо на образование единицы площади новой поверхности детали. Это универсальный физический показатель эффективности процесса резания. К достоинствам удельной энергоёмкости процесса резания следует отнести простоту её определения как теоретическими, так и экспериментальными методами [1]. Однако показатель удельной энергоёмкости пропорционален мощности резания, при этом мощность полагается постоянной в течение всего времени рабочего хода, что справедливо только для стационарного резания и встречается редко.

В качестве интегральной характеристики эффективности обработки резанием возможно использование безразмерного показателя K – «энергетического КПД процесса резания» (выражение 1), предложенного А.В. Карповым [2, 5]:

$$K = \frac{\Delta w V}{n_{ц} A_{ц}} = \frac{\Delta w V}{n_{ц} \int_0^{\tau_{ц}} N(\tau) d\tau}, \quad (1)$$

где Δw – удельная энергоёмкость обрабатываемого материала;
 V – объём обрабатываемого материала, подвергнувшийся воздействию;
 $n_{ц}$ – число циклов изменения мощности резания $N(\tau)$ за время рабочего хода инструмента;
 $A_{ц}$ – работа резания за время $\tau_{ц}$ одного цикла изменения мощности.

Под продолжительностью $\tau_{ц}$ одного цикла изменения мощности резания понимается время рабочего хода, либо промежуток времени, в течение которого наблюдается полное однократное изменение мощности резания при неустановившемся режиме [6].

Показатель K отвечает требованиям, предъявляемым к критериям оптимальности технологических процессов: во-первых, этот показатель выражает КПД процесса резания и, следовательно, обладает физическим смыслом [5]; во-вторых, он однозначно описывается в математическом виде; в-третьих, он может быть сведён к целевой функции вида $K \rightarrow \max$, аргументами которой являются показатели свойств обрабатываемого и инструментального материалов, геометрические параметры инструмента и срезаемого слоя, элементы режима резания, кинематика процесса обработки. Таким образом, при оптимизации технологических процессов по критерию K в рассмотрение включается множество управляемых факторов системы резания.

Однако, в случае необходимости оценки энергетической эффективности резания процессов, происходящих методом обката (зубодолбление, зубофрезерование, зубострогание и т.д.), невозможно использовать выражение 1, так как на каждом цикле нагружения инструмент может работать различными режущими лезвиями и снимать стружку различной конфигурации, следовательно, работа резания будет изменяться на каждом цикле нагружения.

Для описания энергоэффективности процесса резания по методу обката выражение 1 примет вид:

$$K = \frac{\Delta w V}{\sum_{i=1}^{n_{ц}} A_{цi}}. \quad (2)$$

Выразим работу резания через режимы обработки и параметры обрабатываемого изделия, выражение 2 принимает вид:

$$K = \frac{60 \cdot 1020b\Delta wV}{v^2 \sum_{i=1}^{n_{\text{ш}}} P_{Zi}}, \quad (3)$$

где b – ширина обрабатываемого венца;

v – скорость резания;

P_{Zi} – осевая сила резания, возникающая на i -том резе.

Для определения параметров системы резания используем пространственную математическую модель процесса лезвийной обработки [4]. Она включает в себя описание движения каждого элементарного участка кромки режущего лезвия инструмента и позволяет произвести расчет кинематического изменения переднего и заднего углов, толщины срезаемого слоя и определения составляющих силы резания.

Любой процесс лезвийной обработки может быть представлен зависимостью [4]:

$$\begin{aligned} X &= f(\varphi(V), \varphi(S), \varphi(l), t, u); \\ Y &= f(\varphi(V), \varphi(S), \varphi(l), t, u); \\ Z &= f(\varphi(V), \varphi(S), \varphi(l), t, u), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\varphi(V)$ – параметр скорости резания;

$\varphi(S)$ – параметр подачи;

$\varphi(l)$ – параметр режущего лезвия;

t – время;

u – управляющий параметр.

Сравним показатели «энергетического КПД процесса резания» для различных видов обработки зубчатого профиля прямозубого конического колеса ($m_s = 6$ мм, $b = 30$ мм). Рассмотрим вариант резания в два прохода, первый (черновой) осуществляется методом врезания трапецевидным резцом, второй (чистовой) осуществляется обкатом стандартным чистовым зубострогальным резцом. Другой вариант резания – в один проход специальными зубострогальными резцами с дифференцированной схемой резания [7].

В таблице 1 представлены возможные варианты режимов обработки, ограниченные минимальными требуемыми параметрами качества и возможностями типовых зубострогальных станков (5А250П, 5С286П и др.)

В строке 4 таблицы 1 представлено сравнение энергетического критерия резания, за K_1 , было принято значение K для обработки в два прохода. Анализ результатов аналитического расчета показывает, что стандартный вариант обработки имеет большую энергетическую эффективность, однако значительно уступает в производительности.

Таблица 1 – Сравнение «энергетического КПД процесса резания» для различных технологических решений обработки зубчатого профиля прямозубого конического колеса.

Вид обработки	В два прохода		В один проход, резцами с дифференцированной схемой резания	
	Черновой (врезание)	Чистовой (обкат)		
1 t_z , мин/зуб	0,56	0,15	0,75	0,48
2 v , м/мин	15	20	13	20
3 $t_{\text{маш}}$, мин	22		13,7	8,8
4 $K_1/K_{\text{обр}}$	1		1,38	3,33

В зависимости от режимов резания, количество энергии затрачиваемой на обработку может значительно изменяться даже при условии использования одного и того же метода обработки и инструмента.

Использование предложенного энергетического критерия «энергетического КПД процесса резания» в сочетании с пространственной математической моделью резания позволяет прогнозировать результаты процесса обработки (точность, шероховатость, производительность, затраты энергии и т.д.) на этапе технологической подготовки производства и, основываясь на полученных результатах, определить рациональный метод обработки, параметры технологической системы, режимы обработки и конструкцию инструмента необходимые для обработки детали требуемой точности, с минимальными энергетическими затратами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старков, В.К. Физика и оптимизация резания материалов / В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.
2. Карпов, А. В. Оценка эффективности лезвийной обработки с использованием безразмерного энергетического критерия / А.В. Карпов, С. Н. Игнатов, А. П. Распопин // СТИН. – 2004. – № 12. – С. 23–26.
3. Барсуков, Г.В. Оптимизация энергетических затрат технологии резания материалов гидроабразивной струей / Г.В. Барсуков, А.В. Михеев, А.А. Александров // Наука и Мир. – 2013. – № 2(2). – С. 46–48.
4. Харламов, Г.А. Теория проектирования процессов лезвийной обработки. / Г.А. Харламов, А.С. Тарапанов. – М: Машиностроение. 2003. – 252 с.
5. Карпов, А.В. К вопросу снижения энергоёмкости технологических процессов обработки резанием // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2.
6. Карпов, А. В. Оптимизация процессов обработки резанием на основе энергетических закономерностей деформации и разрушения материалов // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2012. – № 1. – С. 58–63.
7. Канатников, Н.В. Зубострогальные резцы с дифференциальными схемами резания. / Н.В. Канатников, А.В. Канатников, Г.А. Харламов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 3–2. – С. 136–141.

Канатников Никита Владимирович
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УПНК», г. Орел, Россия
лаборант кафедры "КТМП"
Тел.: +7 (920) 086–57–82;
E-mail: NKanatnikov@ya.ru

Харламов Геннадий Андреевич
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УПНК», г. Орел, Россия
д.т.н., проф. каф. "КТМП"
Тел.: +7 (4862) 41–65–75;
E-mail: ipk@ostu.ru

Шоркин Владимир Сергеевич
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УПНК», г. Орел, Россия
д.ф.–м.н., проф. каф. "Физика"
Тел.: +7 (4862) 41–98–89;
E-mail: Voturin@ostu.ru

N.V. KANATNIKOV, G.A. HARLAMOV, V.S. SHORKIN

**OPTIMIZATION ENERGY COST FOR PROCESSING CUT
A PERIODIC PROFILE OF DETAILS**

The article discusses the optimization of technological processing periodic surfaces of machine parts according to the criterion of efficiency. This paper presents a control option of cutting energy efficiency. Due to that the mechanical work done by the tool affects the load losses in the drive and sets the total amount of energy consumed by the motor equipment. The article considers the indicators which we can use for estimating the processed cutting by the criterion of expended energy, for example specific power intensity and "energy efficiency of the cuttin." As a basis for control cutting is proposed to use based on the analysis of virtual process model, which allows to obtain analytical data about kinematics and dynamics of cutting.

Keywords: *periodic profile, control the processing, the virtual model of the processing, energy efficiency, energy costs.*

BIBLIOGRAPHY

1. Starkov, V.K. Fizika i optimizacija rezanija materialov / V.K. Starkov. – М.: Mashinostroenie, 2009. – 640 s.
2. Karpov, A. V. Ocenka jeffektivnosti lezviyjnoj obrabotki s ispol'zovaniem bezrazmernogo jenergeticheskogo kriterija / A.V. Karpov, S. N. Ignatov, A. P. Raspopin // STIN. – 2004. – № 12. – S. 23–26.
3. Barsukov, G.V. Optimizacija jenergeticheskikh zatrat tehnologii rezanija materialov gidroabrazivnoj struej / G.V. Barsukov, A.V. Miheev, A.A. Aleksandrov // Nauka i Mir. – 2013. – № 2(2). – S. 46–48.
4. Harlamov, G.A. Teorija proektirovanija processov lezviyjnoj obrabotki. / G.A. Harlamov, A.S. Tarapanov. – М: Mashinostroenie, 2003. – 252 s.
5. Karpov, A.V. K voprosu snizhenija jenergojomkosti tehnologicheskikh processov obrabotki rezaniem // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. – 2013. – № 2.
6. Karpov, A. V. Optimizacija processov obrabotki rezaniem na osnove jenergeticheskikh zakonomernostej deformacii i razrushenija materialov // Mashinostroenie i bezopasnost' zhiznedejatel'nosti. – 2012. – № 1. – S. 58–63.
7. Kanatnikov, N.V. Zubostrogal'nye rezcy s differencial'nymi shemami rezanija. / N.V. Kanatnikov, A.V. Kanatnikov, G.A. Harlamov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehnik i tehnologii. – 2013. – № 3–2. – С. 136–141.

Kanatnikov Nikita Vladimirovich
State University – ESPC
laboratory, Department of "CTSMM"
Phone: +7 (920) 086–57–82;
E-mail: NKanatnikov@ya.ru

Harlamov Gennadiy Andreevich
State University – ESPC
Doctor of Engineering Science,
professor, Department of
"CTSMM"
Phone: +7 (4862) 41–65–75;
E-mail: ipk@ostu.ru

Shorkin Vladimir Sergeyevich
State University – ESPC
Doctor of Mathematical Physics Science, professor, Department of
"Phsics"
Phone: +7 (4862) 41–98–89;
E-mail: Voturin@ostu.ru

КОНСТРУИРОВАНИЕ, **РАСЧЕТЫ, МАТЕРИАЛЫ**

УДК 661

А.А. АЛЕКСАНДРОВ, Г.В. БАРСУКОВ, К.Ю. ФРОЛЕНКОВ

КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ ИЗ ОТВАЛЬНЫХ ШЛАКОВ ЦВЕТНЫХ ПРОИЗВОДСТВ НОВЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

Авторами статьи разработана концепция создания из отвальных шлаков цветных производств новых наноструктурированных абразивных материалов, обладающих заданным набором функциональных свойств опираясь на представления о механизме и последовательности реакций в смесях твердых веществ.

Ключевые слова: наноструктурирование поверхностного слоя, техногенные неорганические вещества, твердость, прочность, адгезия.

Высокие требования, предъявляемые к точности и качеству деталей машин, а также применение труднообрабатываемых материалов в машиностроении и других отраслях промышленности привели к возрастанию удельного веса абразивной обработки в общем объеме механической обработки.

Основными достоинствами абразивных материалов являются их высокие твердость, износо- и теплостойкость. Эти материалы позволяют обрабатывать заготовки со скоростью резания до 120 м/с, а в отдельных случаях и более. Такие инструменты дают возможность проводить окончательную обработку заготовок, имеющих высокую твердость, полученную после термической обработки. Такие заготовки, как правило, не подлежат обработке лезвийным инструментом. Применяемые в качестве абразивов минералы естественного и искусственного происхождения: алмазы; кубический нитрид бора; электрокорунды белый, нормальный и легированный хромом и титаном и др. очень дорогие и у них низкая стойкость к удару. Ежегодная потребность в таких материалах более 100 млн. тонн.

Основная особенность предлагаемой разработки это использование техногенных побочных продуктов промышленности, например, отходов цветных производств, что позволит снизить стоимость абразивного материала в 5 – 10 раз при обеспечении необходимой твердости и прочности, а так же ввести в хозяйственный оборот вторичные ресурсы.

В настоящее время в России скопилось в отвалах миллионы тонн конвертерного шлака, который серьезно осложняет экологическую обстановку. Химический состав, например, никелевого шлака: 0,8–2,0% Ni, 0,3–0,5% Co, ~ 60% FeO ~ 25% SiO₂, 2,0% CaO, 2,0% MgO, 1,5% Al₂O₃, включений штейна до 5%.

В настоящее время основные их недостатки – не высокая твердость и низкая ударная вязкость. Остается не решенной проблема улучшения функциональных свойств этих материалов для абразивной обработки. Поэтому изучение формирования структурно-фазового состояния тонкого поверхностного слоя техногенных неорганических веществ может стать чрезвычайно перспективным направлением как в фундаментальном аспекте понимания механизма наноструктурирования хрупких материалов, так и в прикладном – при разработке абразивных материалов с уникальными физико-механическими характеристиками для промышленного применения [1, 2].

Успешное выполнение данной работы позволяет решить весьма актуальную проблему создания термостойких, механически прочных, инертных и относительно дешёвых абразивных инструментов из отвальных шлаков цветного производства на основе оксидов железа, кремния, магния и кальция.

Задача изучения строения и энергетического состояния поверхностных фаз – сверхтонкого (в несколько атомов) слоя на границе раздела фаз, находящегося в состоянии термо-

динамического равновесия с объёмом и обладающего своей собственной кристаллической и электронной структурами – важнейшее направление в области создания наноматериалов.

Исходя из состава шлака предложена гипотеза о возможности получения на поверхности зерен Fe_2O_3 и SiO_2 диффузионных покрытий, соответственно карбида железа (цементита) Fe_3C и карбида кремния (карборунда) SiC путём высокотемпературной обработки данного шлака в восстановительной среде содержащей углерод. Указанные карбиды отличаются очень высокой твёрдостью, износостойкостью и прочностью, что позволит использовать отвалный шлак после соответствующей обработки, в качестве нового наноструктурированного абразивного материала.

В основе методов получения диффузионных покрытий лежат технологические реакции, то есть реакции, протекающие с участием твердых веществ и локализованные на поверхности раздела твердых фаз реагента и продукта [3]. В этой связи, концепцию создания вторичных техногенных неорганических веществ новых наноструктурированных абразивных материалов, обладающих заданным набором функциональных свойств, было признано целесообразным разрабатывать на основе механизма и последовательности реакций в смесях твёрдых веществ [4].

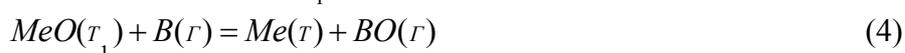
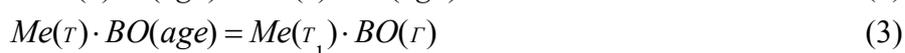
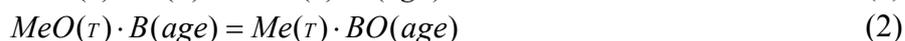
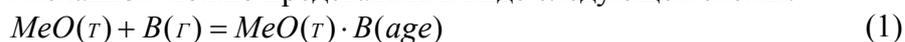
В газовых или жидких смесях термодинамически возможные реакции происходят сравнительно легко при условиях, определяемых простыми статистическими законами. При взаимодействии же твердых тел, элементы, структуры которых обладают малой подвижностью, способность веществ вступать в химическое взаимодействие друг с другом является недостаточным условием протекания реакции. Кроме того, реакциям с участием твердых тел присущи и другие особенности [4]:

- 1) химическое превращение происходит внутри ограниченной зоны твердого тела;
- 2) если в реакции участвует несколько реактивов, то твердые продукты взаимодействия могут образовывать слой, затрудняющий протекание реакций, в частности, при взаимодействии твердых частиц кремния и углерода на их контактах сравнительно быстро образуется слой твердого SiC , тормозящие развитие реакции между компонентами;
- 3) как правило, твердофазовая реакция начинается на поверхности.

Развитие теоретических представлений в области твердофазовых реакций связано с работами Г.И. Чуфарова с сотрудниками, О.А. Есина и П.В. Гельда, С.Т. Ростовцева и других исследователей.

В частности, адсорбционно–автокаталитическая теория восстановления [3], разработанная применительно к восстановлению оксидов металлов газообразными агентами (CO , H_2) рассматривает взаимодействие оксидов металлов с восстановителем как топохимический процесс и базируется на классических работах по кинетике гетерогенных реакций и гетерогенному катализу. Такой подход к проблеме привел к принципиально важному выводу о первостепенной роли явлений адсорбции в процессах восстановления оксидов металлов.

Согласно адсорбционно–автокаталитической теории, сначала происходит адсорбция газа–восстановителя (В) на реакционной поверхности (MeO), затем следует отрыв кислорода от оксида (MeO) и переход его к адсорбированным молекулам восстановителя (В), сопровождающийся возникновением новой газовой молекулы (ВО) и решетки новой фазы $Me(t)$, и наконец, десорбция ВО. Этот механизм можно представить в виде следующей схемы:



Полагают [5], что в условиях чисто кинетического режима в начальный период начинается зарождение центров новой фазы и скорость восстановления мала. Это так называемый индукционный период. В дальнейшем вокруг появившихся центров реакции идет развитие процесса восстановления и вместе с непрерывным ростом поверхности раздела твердых фаз увеличивается и скорость взаимодействия. Максимум скорости достигается в тот момент, когда пересекающиеся сферы реакции дают максимальную величину реакционной поверхности. В третий период, когда поверхность раздела старой и новой фаз начинает уменьшаться

ся по мере протекания процесса, скорость восстановления соответственно снижается. Таким образом, автокатализ связан с увеличением реакционной поверхности.

Однако полученные результаты не дают однозначных выводов. Ряд кинетических закономерностей, которыми оперирует адсорбционно–каталитическая теория, поддается толкованию с совершенно другой точки зрения, учитывающей протекание диффузионных явлений в газовой фазе. Слабым местом экспериментального обоснования адсорбционно–каталитической теории является также отсутствие данных по адсорбции газообразных восстановителей на поверхности оксидов металлов при повышенных температурах.

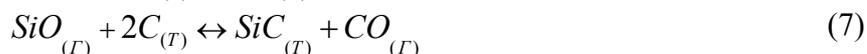
А.С. Бережной, П.П. Будников, А.М. Гинстлинг и ряд других исследователей выявили существенную роль паровой, газовой и жидкой фаз во многих реакциях, протекающих при нагревании смеси кристаллических веществ. Наиболее обстоятельно вопрос о классификации твердофазовых реакций рассмотрен П.П. Будниковым и А.М. Гинстлингом. Они предложили группировать данные реакции следующим образом[6]:

- 1) непосредственное взаимодействие частиц твердых веществ;
- 2) процессы протекают при участии жидкой фазы;
- 3) процессы протекают при участии газовой фазы;
- 4) процессы протекают при одновременном участии газовой и жидкой фаз.

В качестве одного из возможных и распространенных на практике вариантов подобного взаимодействия описывается реакция между двумя веществами А и В, происходящая через стадию возгонки А:

- стадия возгонки $A(T) \rightarrow A(G)$
- стадия превращения $A(G) + B(T) \rightarrow AB$

В качестве примера такой реакции можно привести, в частности, интересующее нас восстановление монооксида кремния с углеродом:



Чрезвычайно важным является следующее обстоятельство. Если при каких либо определенных условиях реакция может протекать как без участия, так и при участии жидкой или газовой фазы, то в подавляющем большинстве случаев она идёт преимущественно по второму пути.

Это не означает, разумеется, что процессы непосредственного химического взаимодействия в твердых телах не могут протекать или не встречаются в действительности. Однако, несомненным является тот факт, что лишь часть реальных процессов, протекающих в смесях кристаллических веществ при нагревании, может быть отнесена к строго твердофазным.

Возможны и иные принципы классификации твердофазовых реакций. Так, например, с учетом кинетических особенностей выделяют четыре наиболее важных класса твердофазовых реакций, лимитируемых:

- 1) скоростью собственного химического взаимодействия;
- 2) скоростью диффузии;
- 3) скоростью химического взаимодействия и диффузии одновременно;
- 4) скоростью испарения или возгонки.

Твердофазовое взаимодействие в отличие от реакций в жидкой и газовой фазах складывается из двух фундаментальных процессов: собственно химической и переноса вещества к реакционной зоне [5]. Так как массоперенос осуществляется путем диффузии, рассмотрим основные закономерности диффузионных процессов.

Диффузия – самопроизвольное перемещение частиц вещества, в результате которого устанавливается равновесное распределение концентрации этих частиц в данном объеме газа, жидкости или твердого тела. Причиной диффузии является тепловое движение частиц, вызываемое градиентом температуры (самодиффузия в однокомпонентных системах), и направленный перенос вещества, обусловленный градиентом концентрации или, точнее, градиентом химического потенциала (гетеродиффузия в многокомпонентных системах).

Диффузия в твердых телах имеет существенное значение для процессов получения диффузионных покрытий.

В общем виде законы диффузии в твердых телах были сформулированы Фиком [7]. Первый закон Фика связывает количество диффундирующего вещества в единицу времени через площадь S (поток вещества j) с градиентом концентрации $\frac{\partial c}{\partial x}$ и коэффициентом диффузии D :

$$j = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (8)$$

В данном уравнении коэффициент диффузии D характеризует поток вещества вдоль оси x при градиенте концентрации имеет размерность $\frac{m^2}{c}$.

Практическое использование первого закона Фика затруднено тем, что во всех случаях необходимо знать величину градиента концентрации $\frac{\partial c}{\partial x}$. Это удастся сделать только в ограниченном числе случаев, например при стационарных диффузионных потоках.

В связи с этим чаще используется второй закон Фика, который в дифференциальной форме отражает изменение концентрации во времени $\frac{\partial c}{\partial t}$ (предполагается, что D не зависит от концентрации):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (9)$$

В данном случае задача сводится к получению экспериментальных данных по зависимости изменения концентрации от времени, составлению и решению дифференциальных уравнений и определению коэффициента D . При этом задаются определенным механизмом переноса частиц.

В случае взаимной диффузии двух или более компонентов (гетеродиффузия) коэффициент диффузии отражает сложную картину процесса и представляет собой суммарную (эффективную) величину. Если диффундируют два сорта частиц A и B с индивидуальными коэффициентами диффузии D_A и D_B , то суммарный (эффективный) коэффициент диффузии может быть определен из соотношения [3]:

$$D = N_A D_A + N_B D_B \quad (10)$$

где N_A и N_B – молекулярные доли компонентов.

Гетеродиффузия часто бывает связана со значительными градиентами концентрации и различными скоростями диффузии, что приводит к так называемому эффекту. Сущность его заключается в том, что вследствие неодинаковых коэффициентов диффузии перенос компонента A в одном направлении будет больше, чем компонента B в противоположном направлении, в результате чего плоскость раздела диффундирующих веществ смещается в сторону медленно диффундирующего компонента B . Эта картина справедлива не только для металлических сплавов, где эффект Киркендалла установлен экспериментально, но и для оксидов металлов.

Приведенные выше значения Фика описывают диффузию в общем виде, не касаясь атомной структуры твердого тела. Рассмотрим микроскопическую теорию диффузии, которая охватывает атомистическое строение твердого тела и рассматривает элементарный акт перемещения атомов. Известно, что атомы в кристалле колеблются около положений равновесия. Иногда эти колебания становятся настолько сильными, что атом меняет свое положение. Именно такие перескоки с места на место вызывают диффузию в твердых телах.

Согласно современным представлениям [7] атом в кристаллической решетке твердого тела может перемещаться двумя способами: по междоузлиям и с помощью вакансий. Такой вид диффузии называют объемной диффузией. По вакансионному механизму атом (ион) находящийся в узле решетки, переходит в соседний незанятый (вакантный) узел и создает на своем старом месте новую вакансию. Эту новую вакансию замещает соседний атом, на месте которого возникает новая вакансия. Таким образом, происходит непрерывное перемещение вакансий по всему объему кристаллической решетки, причем движение атомов в этом случае противоположно движению вакансий.

Междоузельный механизм реализуется в сплавах внедрения, где в междоузлиях находятся маленькие атомы легких элементов, которые могут диффундировать по междоузлиям.

Перемещение атомов по междоузлиям требует больших энергетических затрат, чем диффузия по вакансиям. Так как переход атома из узла в междоузлие вызывает большие искажения кристаллической решетки, то основным является вакансионный механизм диффузии.

Движение атомов (ионов) может происходить так же по механизму скоплений, когда внедренный атом выталкивает один из ближайших атомов в междоузлие, а сам занимает его место в узле решетки [7].

Наряду с описанными механизмами диффузия может протекать по границам зерен и другим поверхностным дефектам (дислокациям на поверхности кристаллов, межфазным границам и т.п.). Для этих видов диффузии характерна малая энергия активации. Поэтому, как правило, при высоких температурах получает заметное развитие объемная диффузия, а в области низких температур – диффузия по границам зерен, характеризующаясь меньшей энергией активации.

Скорость диффузии зависит от температуры, агрегатного состояния, природы диффундирующих частиц, давления и т.п. По мере увеличения вязкости и плотности скорость диффузии сильно замедляется, например, в ряду: газ > жидкость > кристалл. С повышением температуры скорость диффузии возрастает, но в указанном ряду устанавливается обратный порядок роста скорости кристалл > жидкость > газ.

Коэффициент диффузии D определяющий скорость диффузии зависит от ряда факторов, основным из которых является температура процесса, концентрация диффундирующего агента в диффузионной среде, размер и особенности атомов растворителя и растворенного вещества.

Работа разрыхления решетки или точнее энергия активации диффузии в процессе диффузии уменьшается, если атомы растворенного вещества и растворителя разнородны. В ионных решетках энергия, необходимая для придания иону подвижности, значительно уменьшается в случае поляризации: чем более поляризован катион, тем более свободно он диффундирует в решетке.

В заключение следует отметить, что не следует отдавать предпочтение какому-либо одному механизму диффузии в твердом теле как единственному и универсальному. В реальных материалах каждый из механизмов может иметь определенный удельный вес, зависящий от типа кристаллической решетки твердого тела, наличия примесей, обработки образца и других факторов.

Процессы перехода веществ в паровую фазу играют важную роль во многих областях современной техники. При получении диффузионных покрытий нельзя не принимать во внимание наличия над конденсированными системами парогазовой фазы, роль которой особенно возрастает в условиях высоких температур. Поведение различных материалов при нагревании может быть полностью описано лишь, если учитывать их взаимодействие с окружающими газами и парами, состоящими, как известно, из ненасыщенных реакционно-способных частиц.

Из данных по возгонке и диссоциации оксидов металлов сделаны некоторые обобщения относительно характера перехода различных оксидов в газообразное состояние в зависимости от положения, которое занимает в периодической таблице элементов металл, образующий данный оксид.

В группе щелочноземельных металлов способность оксида к возгонке без диссоциации закономерно возрастает с увеличением порядкового номера элемента образующего оксид. Оксид бария возгоняется практически без диссоциации. Аналогичная закономерность наблюдается для оксидов металлов *IV B* подгруппы Периодической системы при переходе от диоксида титана, возгонка которого сопровождается преимущественной потерей кислорода, к диоксиду тория, парогазовая фаза над которым состоит на 0,9 из ThO_2 .

Необходимо, однако, отметить, что соотношение между возгонкой и диссоциацией оксидов может и по-иному зависеть от порядкового номера металла внутри данной подгруппы. Например, диссоциация Li_2O сопровождается заметной выгонкой, а оксиды натрия и калия почти полностью диссоциируют, то есть здесь наблюдается увеличение склонности ок-

сида к диссоциации с повышением порядкового номера металла. Такая же картина наблюдается в подгруппах ванадия и хрома.

Летучесть оксидов определяется в большой степени относительной стабильностью их газовых молекул. Однако в ряде случаев определенное значение имеет и степень устойчивости конденсированных фаз. Например, твердый триоксид вольфрама настолько превосходит по стабильности твердый триоксид молибдена, что это перевешивает различие в стабильности соответствующих фаз, вследствие чего WO_3 менее летуч чем MoO_3 [8].

Термическая устойчивость оксидов металлов существенно зависит и от особенностей их кристаллического строения. Наиболее устойчивые оксиды характеризуются средними значениями степени ионности химической связи: 49% для HfO_2 , 47% для BeO , 46% для ZnO_2 , 56% для Y_2O_3 и La_2O_3 [8].

Процесс перехода оксида в газообразное состояние можно рассматривать как расчленение упорядоченной структуры кристалла на отдельные молекулы и атомы. С этой точки зрения указанный процесс имеет некоторое сходство с процессом плавления, поскольку расплав представляет собой систему, состоящую из отдельных частиц – молекул, атомов или ионов, в то время как твердый оксид характеризуется существованием дальнего порядка. Поэтому следует ожидать проявления зависимости между характером кристаллического строения различных оксидов и параметрами происходящих в них процессов фазового перехода.

Можно показать, что тип кристаллической решетки необходимо в первую очередь принимать во внимание при выяснении причин, определяющих величину температуры оксида. Исходя из представлений о процессе плавления как о переходе от координационной (обладающей дальним порядком) структуры твердого тела к молекулярному (обладающему ближним порядком) состоянию жидкости, легко понять, что способность оксидов к переходу твердое состояние – жидкое состояние очень различна в силу несходства их кристаллического строения.

Исходя из вышесказанного, можно сделать следующие выводы:

1. Рассмотрены особенности твердофазовых реакций и их классификация. Показано, что лимитирующими стадиями этих реакций могут быть: химическое взаимодействие; диффузия; химическое взаимодействие; химическое взаимодействие и диффузия; испарение и возгонка твердых веществ.

2. Изучены основные закономерности диффузии в твердых телах и её основные механизмы. Установлено, что не следует отдавать предпочтение какому либо одному механизму диффузии в твердом теле, как единственному и универсальному. В реальных материалах каждый из механизмов может иметь определенный удельный вес, зависящий от типа кристаллической решетки твердого тела, наличия примесей, обработки образца и других факторов.

3. Изучены основные закономерности возгонки оксидов металлов. Отмечено, что процессы диссоциации оксидов металлов очень сложны и ещё недостаточно изучены. Основное число работ, посвященных изучению механизма испарения, проведено на простых и органических веществах. Механизм испарения неорганических соединений, в частности оксидов металлов, исследован до сих пор недостаточно. Возгонка оксидов металлов при температурах, близким к температурам начала их восстановления, почти совершенно не исследована.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барсуков, Г.В. Разработка технологии модификации вторичных техногенных абразивных материалов для гидроабразивного резания / Г.В. Барсуков, А.А. Александров, К.Ю. Фроленков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – № 3–2. – 2013. – С. 82 – 90.

2. Барсуков, Г.В., Исследование процесса диффузионного нанесения покрытий на поверхность абразивного зерна / Г.В. Барсуков, А.А. Александров, А.В. Михеев, К.Ю. Фроленков / Международная конференция «Научные принципы и подходы, методы и технологии, системный анализ и статистическая обработка данных о создании, диагностике, модернизации композиционных материалов и покрытий с нанодобавками, работающих в условиях динамического и высокоэнергетического нагружения» 26 – 27 сентября 2013 г. Россия, Москва. – С. 78–85.

3. Бачин, В.А. Диффузионная сварка стекла и керамики с металлами / В.А. Бачин. – М.: Машиностроение, 1986. – 184 с.

4. Казаков, Н.Ф. Диффузионная сварка материалов / Н.Ф. Казаков. – М.: Машиностроение, 1976. – 312 с.
5. Будников, П.П. Реакции в смесях твердых веществ / П.П. Будников, А.М. Гинстлинг. – М.: Стройиздат, 1971. – 482 с.
6. Бобкова, Н.М. Физическая химия тугоплавких неметаллических и силикатных материалов: учебник/Н.М. Бобкова.– Минск: Выш. шк., 2007. – 301 с.
7. Филоненко, Б.А. Комплексные диффузионные покрытия / Б.А. Филоненко. – М.: Машиностроение, 1981.– 136 с.
8. Елютин, В.П. Взаимодействие оксидов металлов с углеродом / В.П. Елютин, Ю.А. Павлов, В.П. Аляков, С.Б. Шеболдаев. – М.: Metallurgia, 1976. – 360 с.

Барсуков Геннадий Валерьевич
Государственный университет – УНПК, г. Орел
д.т.н., профессор, зав. кафедрой
КТОМП
Тел. (4862) 54–14–51
E-mail: awj@list.ru

Фроленков Константин Юрьевич
Государственный университет – УНПК, г. Орел
к.т.н., доцент кафедры химии
Тел. (4862) 54–14–51
E-mail: awj@list.ru

Александров Артем Александрович
Государственный университет – УНПК, г. Орел
Аспирант кафедры КТОМП
Тел. (4862) 54–14–51
E-mail: awj@list.ru

A.A. ALEXANDROV, G.V. BARSUKOV, K.Yu. FROLENKOV

CONCEPT OF CREATION DUMP SLAG NEW COLOR PRODUCTION NANOSTRUCTURED MATERIALS ABRASION

The authors developed the concept of the creation of man-made secondary inorganic substances abrasive new nanostructured materials with a given set of functional properties based on the concept of the mechanism and the sequence of reactions in mixtures of solids.

Keywords: nanostructuring of the surface layer, the inorganic substance manmade, hardness, strength, adhesion.

BIBLIOGRAPHY

1. Barsukov, G.V. Razrabotka tehnologii modifikacii vtovichnyh tehnogennyh abrazivnyh materialov dlja gidroabrazivnogo rezanija / G.V. Barsukov, A.A. Aleksandrov, K.Ju. Frolenkov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – № 3–2. – 2013. – S. 82 – 90.
2. Barsukov, G.V., Issledovanie processa diffuzionnogo nanesenija pokrytij na poverhnost' abrazivnogo zerna / G.V. Barsukov, A.A. Aleksandrov, A.V. Miheev, K.Ju. Frolenkov / Mezhdunarodnaja konferencija «Nauchnye principy i podhody, metody i tehnologii, sistemnyj analiz i statisticheskaja obrabotka dannyh o sozdanii, diagnostike, modernizacii kompozicionnyh materialov i pokrytij s nanodobavkami, rabotajushhih v uslovijah dinamicheskogo i vysokojenergeticheskogo nagruzhennija» 26 – 27 sentjabrja 2013 g. Rossiya, Moskva. – S. 78–85.
3. Bachin, V.A. Diffuzionnaja svarka stekla i keramiki s metallami / V.A. Bachin. – М.: Mashinostroenie, 1986. – 184 s.
4. Kazakov, N.F. Diffuzionnaja svarka materialov / N.F. Kazakov. – М.: Mashinostroenie, 1976. – 312 s.
5. Budnikov, P.P. Reakcii v smesjah tverdyh veshhestv / P.P. Budnikov, A.M. Ginstling. – М.: Strojizdat, 1971. – 482 s.
6. Bobkova, N.M. Fizicheskaja himija tugoplavkih nemetallicheskih i silikatnyh materialov: uchebnik/N.M. Bobkova.– Minsk: Vysh. shk., 2007. – 301 s.
7. Filonenko, B.A. Kompleksnye diffuzionnye pokrytija / B.A. Filonenko. – М.: Mashinostroenie, 1981. – 136 s.
8. Eljutin, V.P. Vzaimodejstvie oksidov metallov s uglerodom / V.P. Eljutin, Ju.A. Pavlov, V.P. Aljakov, S.B. Sheboldaev. – М.: Metallurgija, 1976. – 360 s.

Barsukov Gennady Valerievich
StateUniversity – ESPC, Orel
Professor, Head. Department
KTOMP
Tel. (4862) 54–14–51
E-mail: awj@list.ru

Frolenkov Konstantin Yurievich
StateUniversity – ESPC, Orel
Ph.D., assistant professor of chemistry
Tel. (4862) 54–14–51
E-mail: awj@list.ru

Aleksandrov Artyom Aleksandrovich
StateUniversity – ESPC, Orel
Graduate student KTOMP
Tel. (4862) 54–14–51
E-mail: awj@list.ru

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СЛОИСТЫХ И КАРКАСНЫХ СИЛИКАТОВ

Определены модификаторы для модифицирования полимерной матрицы на базе силикатов. Предложены составы композиционных материалов, которые обладают свойствами явлением самосмазывания при эксплуатации узлов трения без смазки или при ее ограничении. Установлено, введение в состав композиции модификатора на базе силикатов улучшает триботехнические характеристики. Использование в качестве сухой смазки силикатсодержащего продукта – каолинита дополнительно увеличивает прочностные и адгезионные характеристики. Разработанный композиционный материал предназначен для изготовления деталей узлов трения различных машин и механизмов, эксплуатируемых без смазки или при ее ограничении.

Ключевые слова: силикат, состав, прочность, трение, полимер, модификатор.

При создании композиционных материалов различного назначения в последние годы широко используются вещества на полимерной основе с наполнителями из геосиликатных материалов [1]. Очень часто такими модификаторами служат силикаты, в основе структуры находятся каркас – кислородный тетраэдр (рисунок 1).

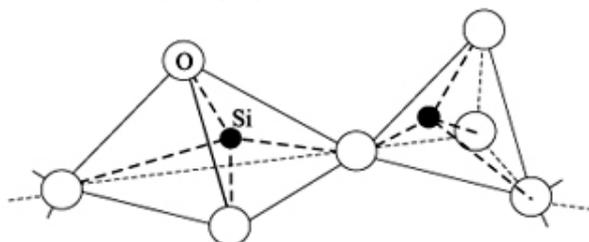


Рисунок 1 – Кремниево-кислородный тетраэдр:

В вершине тетраэдра – атомы кислорода, в центре тетраэдра – атом кремния

Кристаллохимическая формула такой структурной единицы имеет вид SiO_4^{4-} . Эти тетраэдры объединяются друг с другом через общие кислородные вершины. При этом может изменяться угол Si-O-Si , что обуславливает различные мотивы структур с общей тетрагональной основой (рисунок 2).

Тетраэдры SiO_4^{4-} , наряду с октаэдрическими сетками лежат в основе слоистых силикатов. Возможен разворот тетраэдров относительно образованных ими сеток. В этом случае возникают полярные и неполярные мотивы сеток (рисунок 3).

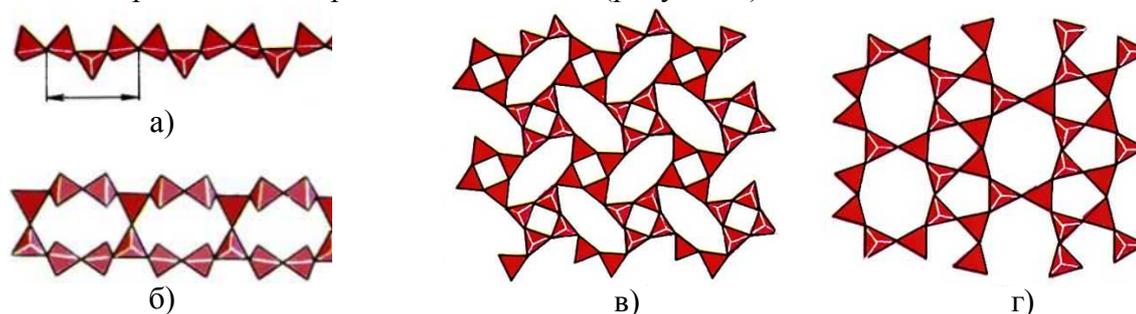


Рисунок 2 – Мотивы структур с общей тетрагональной основой:

а) волластонитовая лента, б) ксонотлитовая лента, в) апофиллитовая сетка, г) окенитовая сетка

Слоистые минералы являются основой земной коры, которая на 70% состоит из этих веществ. Практически все эти минералы склонны к изоморфизму, что приводит к выделению отдельных разновидностей из перечня изоструктурных групп. Многие минералы достаточно хорошо изучены. Для ряда из них имеются эталонные рентгенограммы [2–4].

Систематизация слоистых силикатов приведена во многих работах. Однако наиболее полная и, главное с логически обоснованной последовательностью таблица слоистых минералов приведена в работе [5].

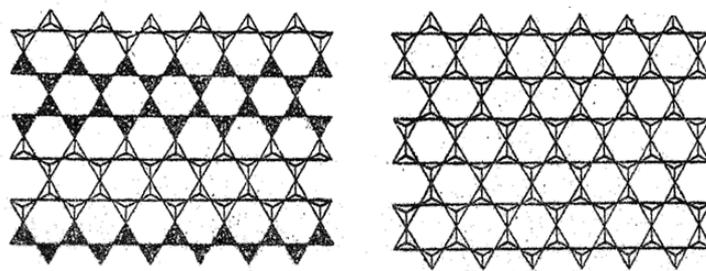


Рисунок 3 – Тетраэдрические гексагональные сетки: а–полярная, б–неполярная

Так как эта работа издана очень небольшим тиражом и малоизвестна специалистам, мы считаем необходимым, с нашими изменениями привести данную классификацию: слюдоподобный мотив–бериллонит (с), гр. вермикулита (с), гр. галлузинита (с), канемит (с), гр. каолинита (с), кимрит (сд), кристобаллит (к), гр. монтмориллонита (с), гр. нефелина (к), пентагонит (с), петалит (с), рейерит (сд), санборнит (с), гр. сапонита (с), гр. сепиолита (с), гр. серпентина (с), гр. слюд (с), гр. тридимита (к), тяньшанит (с), федорит (сд), гр. хлорита (с); пиросмалитоподобный мотив–гр. гельвина (к), гр. канкринита (к), гр. содалита (к), гр. пиросмалита (с), гр. шабазита (к); апофиллитоподобный мотив–гр. апофиллита (с), гадолинит (к), гармотом (к), данбурит (к), датолит (к), дельхаейелит (сд), джилеспит (с), жисмондин (с), кавансит (к), карлтонит (сд), гр. пол. шпатов (к), родзит (сд), гр. скаполита (к), филлипсит (сд); армстронгитоподобный мотив–армстронгит (с), гемиморфит (к), делиит (с), сажинит (с), даванит (с); мелилитовый мотив–гардисонит (с), гугиайт (с), лейкофанит (с), гр. мелилита (с), сирлезит (с); ленточные мотивы–гр. амфибола, виноградовит, власовит, силлиманит, тухуалит, эвидимит, эльпидит; прочие мотивы–берилл, бикитаит, зусманит, кордиерит, лейкофенит, мезолит, натролит, турмалин. В данной классификации каркасные структуры обозначены (к), слоистые (с), двойники (д). Подавляющее большинство минералов таблицы склонны к изоморфизму. При увеличении числа разновидностей рассматриваются кристаллы только одинакового состава. Если в кристалле возможно сосуществование локальных структур к– или с–типов, причем их объем не превысил объем нескольких ячеек, то символ структуры не приводится. Наличие достаточно большого класса данных силикатных частиц в большинстве случаев с уникальными физико–механическими характеристиками и обусловил возможность применения данных минералов в качестве модифицирующих агентов в полимерных матрицах.

Целью данной работы является разработка составов композиционных материалов на базе каркасных и слоистых силикатов для термопластичных полимерных матриц.

Для изготовления покрытий триботехнического назначения широко применяют полимерные связующие, главным образом полиамиды, полиолефины, фторсодержащие полимеры, полиэфир [6]. Наиболее распространенной технологией нанесения таких покрытий является метод псевдооживленного слоя, в котором металлическую заготовку, на которую наносят покрытие, окунают в псевдооживленный слой, представляющий собой воздушную взвесь полимерного порошка. Оплавление осадившегося порошка формирует покрытие заданной толщины на рабочей поверхности детали. Для обеспечения необходимых функциональных характеристик покрытия в состав композиций вводят различные добавки: сухие смазки, порошки металлов, силикатов, оксидов и др. Содержание таких добавок обычно составляет от 5% мас. до 40% мас.

Введение порошкообразных добавок в состав композиций для получения покрытий существенно усложняет технологию их нанесения, т.к. из–за различия в удельном весе полимерных порошков и добавок наблюдается сепарация, в результате которой получается покрытие неоднородного состава. Известен состав композиционного триботехнического материала на основе полиамида, содержащий в качестве функциональной добавки полимерный компонент в качестве которого выбран порошкообразный полиолефин [7]. Введение в состав полиамида 6 полиэтилена низкого давления приводит к формированию гетерогенного покрытия, состоящего из полиамидной матрицы с включениями полиэтилена. При эксплуатации такого покрытия под действием сил трения происходит плавление частиц полиэтилена с образованием в зоне фрикционного контакта пленки расплава, выполняющей роль смазки. Покрытия из данного материала применяют в узлах трения различных машин, эксплуатируемых при $[PV] \leq 5$ МПа·м/с. Недостатки материала заключаются в следующем:

– недостаточно высокое значение адгезионной прочности покрытий на металлической подложке, вследствие того, что полиолефины имеют низкую адгезию к металлам;

– существенное снижение физико–механических и теплофизических характеристик базового материала – полиамида при введении в его состав значительных количеств (10% мас. – 15% мас.) низкомолекулярного полимера – полиэтилена;

– необходимость применения специальных методов подготовки металлических поверхностей для обеспечения заданного уровня адгезионной прочности покрытий.

Задачи, на решение которых направлена разработка состава композиционного триботехнического материала:

– увеличение адгезионной прочности покрытий на основе полиамида с металлическими подложками;

– увеличение физико–механических и теплофизических характеристик покрытий;

– улучшение триботехнических характеристик покрытия при трении без смазки при повышенных температурах.

Поставленные задачи решаются тем, что в составе композиционного триботехнического материала, содержащего связующие, содержится полиамид 11 в количестве 1% – 20%, сухая смазка – 0,1% – 5%, механоактивированный порошок полиамида 6 – остальное до 100%.

Составы конкретного исполнения композиционных триботехнических материалов согласно известному и разработанному материалам приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Составы композиционных триботехнических материалов

Компонент	Содержание в материале, % мас.									
	Аналог		Разработанные составы							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Полимерные связующие										
– полиамид 6	90	89	–	–	–	–	–	–	88,95	–
– полиамид 6 криогенно измельченный	–	–	98,99	88,95	55,0	50	99,44	88,95	–	88,95
Полимерный компонент										
– полиэтилен низкого давления (ПЭНД)	10	10	–	–	–	–	–	–	–	–
– полиамид 11	–	–	1	10	40	45	0,5	10	10	10
Сухая смазка										
– графит коллоидный	–	1	–	1	4,9	4,9	0,05	–	1	1
– каолинит	–	–	0,01	0,05	0,1	0,1	0,01	0,05	0,05	0,05
– ультрадисперсный политетрафторэтилен	–	–	–	–	–	–	–	1	–	–
– дисульфид молибдена	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1

В качестве полимерных матриц использовали порошки полиамида 6 и полиамида 11 с размерами частиц 80 – 100 мкм. Порошок полиамида 6 получали механическим дроблением в мельнице гранул, охлажденных до температуры жидкого азота (–198°С) или других сжиженных газов (кислорода, воздуха, углекислого газа). Необходимую фракцию получали отсевом. Полученный порошок полиамида 6 механоактивировали на установке АГО–2 в течение 40 с при ускорении 30 g.

Порошкообразные сухие смазки с размером частиц не более 80 мкм смешивали с полимерной матрицей и полимерным компонентом в барабанном смесителе с мелющими (активирующими) элементами. Покрытия наносили из псевдооживленного слоя окунанием нагретого до 240°С – 280 °С металлического образца с последующим оплавлением осадившегося порошкообразного материала. Поверхность металлического образца очищали от оксидов и загрязнений путем обработки абразивным полотном и обезжиривали бензином. Физико–механические характеристики покрытий оценивали по общепринятым методикам. Адгезионную прочность покрытия оценивали методом отслаивания под углом 180°. Триботехнические характеристики определяли по схеме «палец – диск» при скорости скольжения 1 м/с и удельной нагрузке 5 – 10 МПа. Покрытия наносили на торцевую поверхность металлического цилиндрического образца диаметром 10 мм. Для изготовления образцов использовали сталь 08кп (адгезионная прочность) и ст45 (триботехнические испытания). Сравнительные характеристики заявленных составов и прототипа приведены в таблице 2.

Как следует из представленных данных, разработанные составы (III–V, VIII, X) превосходят известный материал (составы I, II) по прочностным, адгезионным и триботехническим характеристикам. Так, при повышении температуры до 50°С показатель прочности разработанных составов на 30% – 40% выше чем у известного аналога. После кипячения в воде разработанные составы сохраняют более высокие значения адгезионной прочности.

Таблица 2 – Сравнительные характеристики разработанных составов и известного аналога.

Компонент	Значение параметра									
	Аналог		Разработанные составы							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа										
–при температуре 20°С	55	54	74	71	64	62	74	68	63	71
– при температуре 50°С	28	31	39	34	36	29	37	34	30	32
Твердость по Бринеллю, МПа										
– при температуре 20°С	80	79	121	106	96	89	118	103	95	108
– при температуре 50°С	64	63	97	83	76	72	94	83	76	87
Адгезионная прочность, МПа										
–исходная	1,5	1,5	1,9	2,2	2,3	2,5	1,8	2,0	1,9	2,1
–после кипячения в течение 1 ч	0,6	0,6	1,0	1,1	1,2	1,3	0,8	1,2	1,1	1,15
Коэффициент трения при V=1 м/с										
–при нагрузке 5 МПа	0,22	0,19	0,19	0,18	0,18	0,17	0,20	0,19	0,19	0,19
–при нагрузке 10 МПа	0,15	0,13	0,13	0,11	0,13	0,11	0,13	0,11	0,12	0,112

Уменьшения содержания в композиции полиамида 11 (состав VII) уменьшает адгезионную прочность материала, а превышение содержания полиамида 11 выше разработанного соотношения (состав VI) – уменьшает прочность материала. Замена графита на другие виды сухих смазок – политетрафторэтилен (состав VIII) или дисульфид молибдена (состав X) сохраняет основные показатели физико–механических, адгезионных и триботехнических характеристик.

При механоактивации порошка полиамида происходит разрыв связей в основной молекулярной цепи с образованием долгоживущих активных радикалов. Такие радикалы придают частице полимера высокую активность вследствие их способности к реакции присоединения. Кроме того, наличие у частиц полиамида неспаренных электронов приводит к возникновению у нее собственного силового поля, которое оказывает ориентирующее действие на расплав.

Учитывая, что температура плавления полиамида 11 и полиамида 6 различается на ~70°С, действие силового поля частиц матричного полимера (ПА6) сохраняется после плавления частицы полимерного компонента (ПА11). В результате этого происходит ориентация расплава полиамида 11 в граничных слоях частиц ПА6. Это приводит к образованию ориентированного граничного слоя с повышенными прочностными характеристиками. Ориентирующее действие частиц полиамида 6 способствует термодинамической совместимости матрицы и полимерной добавки, что приводит к гомогенизации композита, увеличивающей его прочностные характеристики.

Композиционный материал, состоящий из термодинамически совместимых компонентов (ПА6 и ПА11) превосходит по служебным характеристикам композит из термодинамически несовместимых компонентов (ПА6 и ПЭНД). При трении вследствие существенного различия температур плавления ПА6 и ПА11 происходит плавление более низкоплавкого компонента (ПА11) с образованием пленки расплава, выполняющей роль смазки.

Таким образом, разработанная композиция обладает свойствами самосмазывания при эксплуатации узлов трения без смазки или при ее ограничении. Дополнительное введение в состав композиции сухой смазки улучшает триботехнические характеристики. Использование в качестве сухой смазки силикатосодержащего продукта – каолинита дополнительно увеличивает прочностные и адгезионные характеристики. Дисперсность монокристаллов продукта составляет 15 – 30 нм, а его наночастицы обладают повышенной активностью в реакциях взаимодействия с полимерными матрицами. Разработанный композиционный материал предназначен для изготовления деталей узлов трения различных машин и механизмов, эксплуатируемых без смазки или при ее ограничении.

Работа выполнена в рамках темы №24–14 ГПНИ «Конвергенция».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдейчик, С.В. Полимер–силикатные машиностроительные материалы: физико–химия, технология, применение / С.В. Авдейчик [и др.]; под ред. В.А. Струка, В.Я. Щербы. – Минск: Тэхналогія, 2007. – 431 с.
2. Рентгенография основных типов породобразующих минералов (слоистые и каркасные силикаты) (редактор д–р. геол–мин.наук, проф. В.А. Франк–Каменецкий). – Л.: Недра, 1983. – 213 с.

3. Кашаев, А.А. Основные типы структур силикатов и их аналогов со сложными тетраэдрическими радикалами—ленточными, слоистыми, каркасными / А.А. Кашаев, Н.А. Фролова. – Иркутск: Изд. Ирк. пед. института, 1994. – 25 с.
4. Белов, Н.В. Очерки по структурной минералогии / Н.В. Белов. – М.: Недра, 1976. – 344 с.
5. Брэгг, У. Кристаллическая структура минералов / У. Брэгг, Г. Кларингбулл. – М.: Мир, 1967. – 390 с.
6. Довгяло, В.А. Композиционные материалы и покрытия на основе дисперсных полимеров. Технологические процессы / В.А. Довгяло, О.Р. Юркевич. – Мн.: Наука и техника, 1992. – 256 с.
7. Белый, В.А. Самосмазывающие материалы на основе смесей термопластичных полимеров / В.А. Белый, В.Г. Савкин, В.В. Невзоров // Вестник машиностроения. – 1977. – № 11. – С. 53–55.

Яцьшин Николай Александрович
УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы», г. Гродно
студент 5 курса факультета инновационных технологий машиностроения
E-mail: ovchin_1967@mail.ru

Прушак Дмитрий Александрович
Закрытое акционерное общество «Солигорский институт проблем ресурсосбережения с опытным производством»
соискатель
E-mail: ipr@sipr.by

Кравченко Константин Викторович
УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы», г. Гродно
аспирант
E-mail: ovchin_1967@mail.ru

Овчинников Евгений Витальевич
УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы», г. Гродно
кандидат технических наук, зам. декана факультета инновационных технологий
E-mail: ovchin_1967@mail.ru

Лиопо Валерий Александрович
УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы», г. Гродно
доктор физико–математических наук, профессор
E-mail: liopo@grsu.by

N.A. YATSYSHIN, D.A. PRUSHAK, K.V. KRAVCHENKO, V.A. LIPOPO, E.V. AUCHYNNIKAU

POLYMER COMPOSITE MATERIALS BASED ON LAYERED AND FRAMEWORK SILICATES

Defined modifiers for modifying polymer matrix based on silicates. Proposed formulations of composite materials that are self-lubricating properties of the phenomenon by following the operating units of friction without lubrication or with its limitation. Installations, the introduction of the modifier composition on the basis of silicate improves the tribological characteristics. Use as a dry lubricant silicatecontaining product – kaolinite further increases strength and adhesion characteristics. Developed composite material intended for manufacturing parts of friction of various machinery operated without lubrication or with its limitation.

Keywords : silicate, composition, durability, friction, polymer, modifier.

BIBLIOGRAPHY

1. Avdevchik, S.V. Polimer–silikatnnye mashinostroitel'nyye materialy: fiziko–khimiya, tekhnologiya, primeneniye / S.V. Avdevchik [i dr.]; pod red. V.A. Struka, V.Ya. Shcherby. – Minsk: Tekhnologiya, 2007. – 431 s.
2. Rentgenografiya osnovnykh tipov porodoobrazovushchikh mineralov (sloistvye i karkasnyye silikaty) (redaktor d-r. geol–min.nauk. professor V.A. Frank–Kamenetskiv). – L.: Nedra. 1983. – 213 s.
3. Kashavev, A.A. Osnovnyye tipy struktur silikatov i ikh analogov so slozhnyimi tetraedricheskimi radikalami–lentochnymi, sloistvymi, karkasnymi / A.A. Kashavev, N.A. Frolova. Irkutsk: Izd. Irk. ped. Institute. 1994. – 25 s.
4. Belov, N.V. Ocherki po strukturnoy mineralogii / N.V. Belov. – M.: Nedra. 1976. – 344 s.
5. Bregg, U. Kristallicheskaya struktura mineralov / U. Bregg, G. Klarinbull. – M.: Mir. 1967. – 390 s.
6. Dovgvalo, V.A. Kompozitsionnyye materialy i pokrvtiva na osnove dispersnykh polimerov. Tekhnologicheskiye protsessy / V.A. Dovgvalo, O.R. Yurkevich. – Mn.: Nauka i tekhnika. 1992. – 256 s.
7. Belvv, V.A. Samosmazvavushchie materialy na osnove smesev termoplastichnykh polimerov / V.A. Belyy, V.G. Savkin, V.V. Nevzorov // Vestnik mashinostroyeniya. – 1977. – № 11. – S. 53–55.

Yatsyshin Nikolai Aleksandrovich
UO "Grodno State University. Yanka Kupala" Grodno
5 student – faculty course innovative engineering technology
E-mail: ovchin_1967@mail.ru

Prushak Dmitry Aleksandrovich
Closed Joint Stock Company "Soligorsk Institute of Resource with pilot production"
to applicants
E-mail: ipr@sipr.by

Kravchenko Konstantin Viktorovich
UO "Grodno State University. Yanka Kupala" Grodno
graduate student
E-mail: ovchin_1967@mail.ru

Auchynnikau Yauheni Vitalievich
UO "Grodno State University. Yanka Kupala" Grodno
Ph.D., deputy. Dean of the Faculty of innovative technologies
E-mail: ovshin_1967@mail.ru

Liopo Valery Aleksandrovich
UO "Grodno State University. Yanka Kupala" Grodno
Doctor of physico–mathematical sciences, professor
E-mail: liopo@grsu.by

В.Г. ГУСЕВ, А.А. МАРЫШЕВ

УСТРОЙСТВО ПРЕЦИЗИОННОГО МЕХАНИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Рассмотрено устройство, обеспечивающее точное перемещение режущего инструмента в металлорежущих станках при настройке на заданный размер. Принцип работы устройства основан на векторном сложении скоростей, сообщаемых перемещаемому органу.

Ключевые слова: точные перемещения, позиционирование, устройство механического перемещения.

Известны различные механизмы малых перемещений, которые преобразуют вращательное движение в поступательное – от простых винтовых механизмов, до устройств, работающих на принципе магнестрикции. Создание высокоточного привода должно основываться на стыке нескольких типов зацеплений, то есть путем использования специальных комбинаций кинематических цепей, а не за счет увеличения числа ступеней, поскольку при этом увеличивается погрешность функционирования механизма.

Авторами предложен механический способ, обеспечивающий нанометрические механические перемещения рабочего органа, например, суппорта с резцом. Устройство отличается простотой конструктивного исполнения и реализацией на практике. Оно может быть использовано в прецизионных металлорежущих станках, высокоточном приборостроении, механизмах наведения телескопов и др. областях.

Рассмотрим близкие по конструкции устройства. Известен механизм малых перемещений [1], который содержит корпус, расположенную в корпусе с возможностью вращения гайку, взаимодействующий с гайкой винт, установленный с возможностью осевого перемещения, кинематическую цепь, представляющую собой две пары зубчатых колес, связывающих винт с гайкой таким образом, что колесо, сидящее на винте, сопряжено с колесом, сидящим на валу, а следующее колесо, сидящее на валу, сопряжено с колесом, сидящим на гайке.

Механизм [1] позволяет передавать большие усилия с относительно малой скоростью перемещения и обеспечивает увеличение хода перемещения.

Недостатком данного механизма является то, что оно не обеспечивает высокой точности позиционирования, зависящей от шага винта, который невозможно выполнить малой величины (например, в пределах сотых долей миллиметра).

Известен также механизм малых перемещений [2], содержащий корпус с прямолинейной направляющей и резьбовым отверстием. В направляющей с возможностью поступательного перемещения установлен полый ползун с резьбой, предназначенный для взаимодействия с резьбовым отверстием корпуса. Механизм содержит также два винта, один из которых является полым и содержит маховичок для его вращения. Второй винт также содержит маховичок и предназначен для взаимодействия с резьбой ползуна. Механизм снабжен элементом связи маховичков первого и второго винтов для обеспечения периодического кинематического их соединения.

Недостатком данного механизма является низкая точность позиционирования рабочего органа, так как она зависит лишь от разности шагов двух винтов. Иными словами, точностью позиционирования рабочего органа можно управлять лишь изменением одного фактора, чего явно недостаточно для обеспечения высокой точности настройки рабочего органа.

Предлагаемое устройство точной настройки режущего инструмента на размер, обеспечивает более высокую точность позиционирования рабочего органа (например, резца) по сравнению с описанными выше аналогами.

Сущность устройства поясняется чертежом, представленным на рисунке 1.

Устройство состоит из основания 1, относительно которого может поступательно перемещаться суппорт 2 по направляющим качения 3. В свою очередь по суппорту 2 могут поступательно перемещаться салазки 4 по направляющим качения 5, на которых жестко закреплен резец 6, предназначенный для обработки заготовки 7. В основании 1 на подшипниках качения 8,9 расположен винт 10, находящийся в зацеплении с гайкой 11, жестко связанной с суппортом 2. На винте 10 жестко закреплена шестерня 12 с числом зубьев Z_1 , находящаяся в постоянном зацеплении с зубчатым колесом 13, имеющим число зубьев Z_2 . На левом конце винта 10 установлен лимб 14 для отсчета угла поворота. Зубчатое колесо 13 жест-

ко установлено на винте 15, закрепленном в подшипниках 16,17 в корпусе суппорта 2. Винт 15 находится в зацеплении с гайкой 18, которая жестко связана с салазками 4.

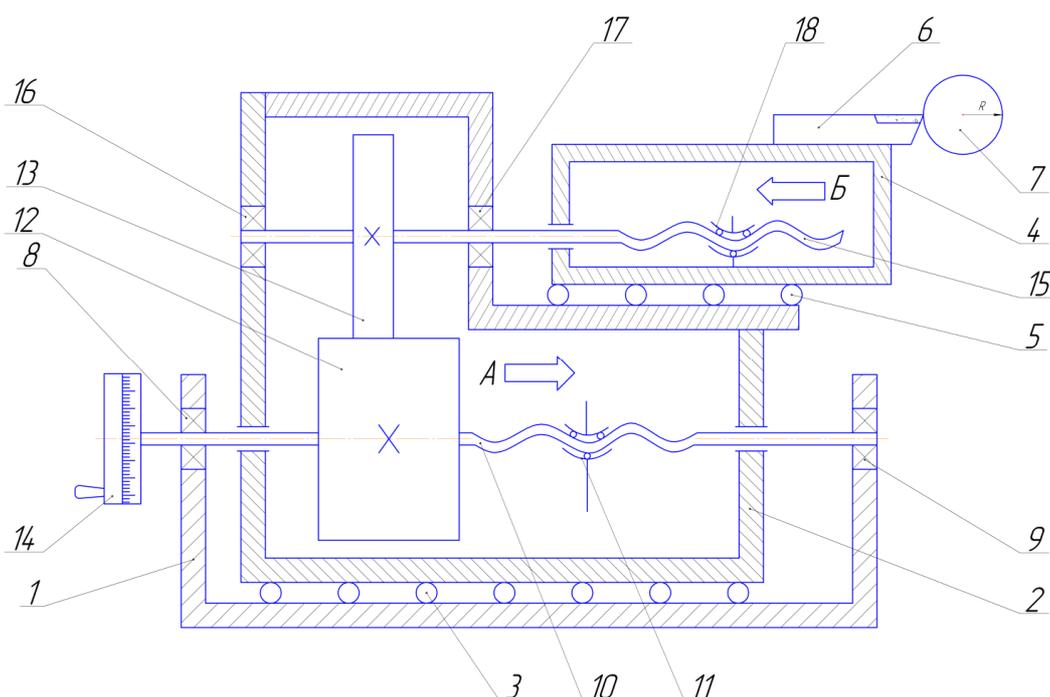


Рисунок 1 – Устройство прецизионного механического позиционирования

Устройство работает следующим образом. При повороте рукоятки лимба 14 поворачивается шестерня 12, а, следовательно, и винт 10, который, находясь в зацеплении с гайкой 11, перемещает суппорт 2 (например, вправо). При этом вправо перемещаются также салазки 4 вместе с винтом 15 и зубчатым колесом 13. В связи с тем, что шестерня 12 находится в зацеплении с зубчатым колесом 13, то при повороте шестерни 12 на 360° происходит поворот зубчатого колеса 13 в обратном направлении на угол $360^\circ \cdot z_1/z_2$. Винт 10 установлен в подшипниках 8, 9 неподвижного корпуса 1, шестерня 12 не может перемещаться поступательно и при этом суппорт 2 перемещается вправо, поэтому зубья колеса 13 скользят по зубьям широкой шестерни 12.

Вследствие поворота винта 15 и постоянного его зацепления с гайкой 18, жестко связанной с салазками 4, происходит дополнительное перемещение последних в обратном направлении (обратном перемещению суппорта 2). То есть суппорт 2 перемещается по стрелке А, а салазки – в направлении стрелки Б.

В результате происходит перемещение резца 6, равное сумме перемещений нижнего суппорта 2 и верхних салазок 4. Задавая малые углы поворота рукоятки лимба (например, 15°) получаем величины перемещений в направлении стрелок А и Б близкие по значению. В результате рабочий орган – резец переместится в радиальном направлении к обрабатываемой заготовке 7 на малую величину. Чем меньше радиальное перемещение резца за один оборот лимба 14, тем точнее позиционирование резца в заданной точке, а, следовательно, и точность настройки режущего инструмента на размер. Более точное позиционирование вершины резца относительно оси вращающейся заготовки обеспечивает более точный размер детали при обработке.

Таким образом, предложенное устройство позволяет осуществлять настройку режущего инструмента на заданный размер с более высокой точностью по сравнению с известными аналогичными механизмами и устройствами.

Величина перемещения рабочего органа (вершины резца):

$$\Delta = S_1 + S_2, \quad (1)$$

где S_1, S_2 – перемещение суппорта 2и салазок 4 соответственно.

Перемещение суппорта 2:

$$S_1 = n t_1 \quad (2)$$

где n – число оборотов лимба 14;

t_1 – шаг винта 10.

Перемещение салазок 4:

$$S_1 = n \cdot \frac{z_1}{z_2} \cdot t_2 \quad (3)$$

где z_1 – число зубьев широкой шестерни 12;
 z_2 – число зубьев узкого зубчатого колеса 13;
 t_2 – шаг винта 15.

С учетом выражений (2) и (3) величина перемещения рабочего органа представится в виде:

$$\Delta = n t_1 - n t_2 \frac{z_1}{z_2} \quad (4)$$

Вынесем фактор n за скобки и выполним преобразования, после чего получим следующее аналитическое выражение для определения величины перемещения рабочего органа:

$$\Delta = n \cdot (t_1 - t_2 \frac{z_1}{z_2}) = n t_2 (\frac{t_1}{t_2} - \frac{z_1}{z_2}), \quad (5)$$

где n – число оборотов лимба, которое задает оператор, настраивающий режущий инструмент на заданный размер (фактор n может быть целым или дробным положительным числом);
 t_1, t_2 – шаг винта 10 и винта 15 соответственно;

$\frac{z_1}{z_2}$ – передаточное отношение пары зубчатых колес 12 – 13.

Из выражения (5) следует, что величина перемещения рабочего органа тем меньше, чем ближе друг к другу располагаются численные значения отношений шагов винтов и чисел зубьев колес $\frac{t_1}{t_2}$ и $\frac{z_1}{z_2}$, то есть, когда выражение $\frac{t_1}{t_2} - \frac{z_1}{z_2}$ стремится к нулю.

Таким образом, для повышения точности позиционирования рабочего органа необходимо соблюдать условие:

$$(\frac{t_1}{t_2} - \frac{z_1}{z_2}) \rightarrow 0. \quad (6)$$

Высокая точность позиционирования обеспечивается при примерном равенстве отношения шагов винтов и отношения числа зубьев колес, установленных на этих винтах, но равенство этих отношений допускать нельзя, поскольку в этом случае устройство прецизионного механического позиционирования не существует.

На основании формул (1)–(6) выполнены расчеты величины перемещения Δ , характеризующей точность позиционирования для различных шагов винтов t_1, t_2 , чисел зубьев z_1, z_2 и их отношений.

Из таблицы 1 следует, что при разных сочетаниях шагов t_1, t_2 и чисел зубьев z_1, z_2 величина Δ изменяется. Чем ближе друг к другу находятся отношения шагов и чисел зубьев, тем точнее происходит позиционирование резца относительно оси вращающейся заготовки.

На основании данных таблицы можно сделать вывод о том, что наибольшая точность позиционирования рабочего органа обеспечивается при значениях шагов $t_1 = 0,5$ мм, $t_2 = 0,75$ мм и числах зубьев $z_1 = 79$ и $z_2 = 119$. При этих значениях ожидаемая точность позиционирования составляет 87,5 нанометров. Возможны другие сочетания шагов и чисел зубьев, которые обеспечивают большую или меньшую точность позиционирования рабочего органа, то есть в зависимости от точности размера, которую необходимо обеспечить при обработке, можно использовать меньшие или большие значения шагов винтов и зубчатых колес.

Рассмотренное устройство механического позиционирования относится к области машиностроения, в частности, к способам точных перемещений и может быть использовано в механизме настройки режущего инструмента прецизионных металлорежущих станков и в высокоточном приборостроении.

На основе изложенного принципа функционирования устройства можно разработать механизм для точного позиционирования рабочего органа в угловом положении, при этом появляется возможность использования подобных устройств в аппаратуре наведения телескопов, где ошибка в угловом перемещении на большом расстоянии космического пространства многократно возрастает. Рассмотренное устройство отличается простотой конструкции и одновременно с этим обеспечивает высокую точность настройки исполнительного органа.

Таблица 1 – Значения величины перемещения Δ для различных шагов винтов t_1, t_2 , чисел зубьев z_1, z_2 и их отношений.

Величина перемещения Δ	Число оборотов	Шаг винта суппорта	Шаг винта салазок	Число зубьев		Разность отношений	Отношение шагов винтов	Отношение чисел зубьев
				Шестерни	Колеса			
$\Delta, \text{мм/об}$	n	$t_1, \text{мм}$	$t_2, \text{мм}$	z_1	z_2	$\frac{t_1}{t_2} - \frac{z_1}{z_2}$	$\frac{t_1}{t_2}$	$\frac{z_1}{z_2}$
0,0023364	1	0,5	0,75	71	107	0,003115	0,666667	0,663551
0,0000974	1/24	0,5	0,75	71	107	0,003115	0,666667	0,663551
0,0022124	1	0,5	0,75	75	113	0,002950	0,666667	0,663717
0,0000922	1/24	0,5	0,75	75	113	0,002950	0,666667	0,663717
0,0021008	1	0,5	0,75	79	119	0,002801	0,666667	0,663866
0,0000875	1/24	0,5	0,75	79	119	0,002801	0,666667	0,663866

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. СССР № 1216519, МПК F16 H37/16. Механизм для преобразования вращательного движения в одновременные вращательное и возвратно-поступательное / А.И. Шкарупило, С.А. Межевитинов, В.И. Подмогильный; заявл. 04.12.1984; опубл. 07.03.1986. Бюл. № 9.
2. А.с. СССР № 1397657, МПК F16 H25/20. Дифференциальный винтовой механизм / Н.Н. Гончаренко; заявл. 19.02.1986; опубл. 23.05.1988 Бюл. № 19.

Гусев Владимир Григорьевич

доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир
E-mail: prof_gusev@mail.ru

Марышев Алексей Анатольевич

аспирант 2-го года обучения кафедры «Технология машиностроения» Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир
E-mail: alex_mrshv@mail.ru

V.G. GUSEV, A.A. MARYSHEV

PRECISION APPLIANCE MECHANICAL POSITIONING

The device providing of the cutting tool exact moving in metal-cutting machines at control for a given size is considered. The device action principle is based on vector addition of the moved body speeds.

Keywords: exact moving, positioning, device of mechanical moving.

BIBLIOGRAPHY

1. A.s. SSSR № 1216519, МПК F16 H37/16. Mehanizm dlja preobrazovaniya vrashhatel'nogo dvizheniya v odnovremennye vrashhatel'noe i vozvratno-postupatel'noe / A.I. Shkarupilo, S.A. Mezhevitinov, V.I. Podmogil'nyj; zajavl. 04.12.1984; opubl. 07.03.1986. Bjul. № 9.
2. A.s. SSSR № 1397657, МПК F16 H25/20. Differencial'nyj vintovoj mehanizm / N.N. Goncharenko; zajavl. 19.02.1986; opubl. 23.05.1988 Bjul. № 19.

Gusev Vladimir Grigoryevich

Engineering Doctor, professor of the «Machinebuilding Technology» department Vladimir state university named of A.G. and N.G. Stoletovykh, Vladimir
E-mail: prof_gusev@mail.ru

Maryshev Alexey Anatolyevich

Internal graduate student of the training 2nd year Vladimir state university named of A.G. and N.G. Stoletovykh, Vladimir
E-mail: alex_mrshv@mail.ru

В.В. МИХРЮТИН, М.А. ШЕРСТОБИТОВ

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ СТАНКОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ТОНКОСТЕННЫХ ЛИСТОВЫХ ОБШИВОК ПЛАНЕРА САМОЛЕТА

Рассматриваются методы обработки крупногабаритных тонкостенных листовых заготовок обшивки. Производится анализ точности существующего оборудования, оснащенного вакуумными захватами, а также оборудования, использующего подвижный упор. Для повышения точности обработки предлагается новая компоновка станка.

Ключевые слова: механическая обработка; тонкостенные листовые обшивки; фрезерование нежестких заготовок; точность обработки.

Обводообразующие детали самолётов в настоящее время изготавливаются на специальных многокоординатных обрабатывающих комплексах, использующих различные принципы закрепления тонкостенных листовых заготовок обшивки планера [1].

Наиболее распространенными являются пятикоординатные порталные станки с горизонтальным закреплением заготовки обшивки, в которых базирование и закрепление производится по ее нижней необрабатываемой поверхности с использованием вакуумных захватов.

Обрабатывающий центр порталной конструкции (рисунок 1) состоит из симметрично расположенных на основании станин 1 с направляющими оси X, по которым передвигается портал, состоящий из колонн 2, соединенных траверсой 3. На траверсе 3 выполнены направляющие оси Y, в которых установлены салазки 4 с направляющими оси Z ползуна 5. На ползуне 5 в круговых направляющих оси C установлен вилочный корпус 6. В круговых направляющих B корпуса 6 установлен корпус 7 шпиндельной головки 8.

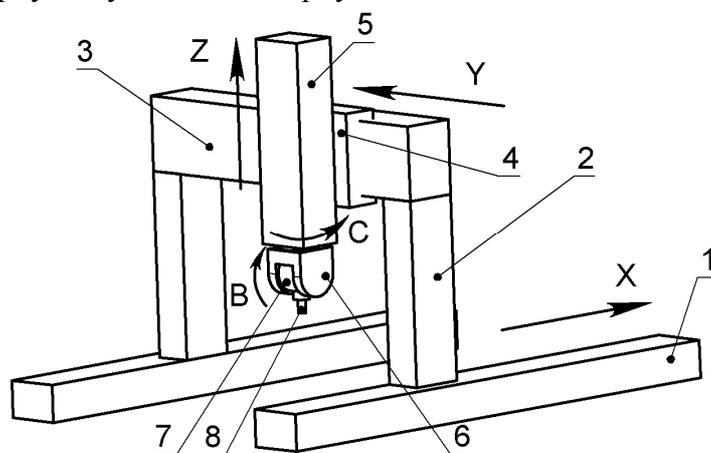


Рисунок 1 – Схема станка порталной конструкции

Данный тип оборудования позволяет производить обработку широкой номенклатуры тонкостенных листовых деталей с относительно небольшими затратами на их оснащение специализированной оснасткой.

Основным недостатком такого оборудования является невозможность реализации двусторонней обработки заготовок за одну установку. Также следует отметить влияние на точность обработки целого ряда факторов. Во-первых, закрепление заготовки производится в отдельных точках, в промежутках между которыми оболочка не поддерживается захватами, поэтому имеет меньшую жесткость. При обработке на участках пониженной жесткости наблюдается прогиб заготовки, что приводит к снижению глубины обработки и возникновению погрешности по толщине заготовки. Во-вторых, при обработке на неподкреплённых участках с меньшей жесткостью возникают вибрации. Третьим фактором является сравнительно низкая точность позиционирования актуатора, которая составляет порядка 0,3 мм.

Наиболее эффективным оборудованием для обработки листовых обшивок является

обрабатывающий комплекс с подвижным упором, перемещаемым синхронно с инструментом [2]. Упор располагают с противоположной стороны от обрабатываемой поверхности детали. Упор предотвращает упругие деформации обшивки под действием сил резания.

Станок данной конструкции (рисунок 2) состоит из основания 1 с рамой для закрепления панели, обеспечивающей одновременный доступ к ее обрабатываемой и поддерживаемой поверхностям, станин 2 и 3 с установленными на них направляющими осями X_0 и X_A , по которым перемещаются колонны 4 и 5, имеющие также опору на дополнительные направляющие 6 и 7, с установленными на них направляющими осями Y_0 и Y_A , по которым перемещаются каретки с ползунами 8 и 9 осями Z_0 и Z_A с установленными на них двуповоротными шпиндельными головками.

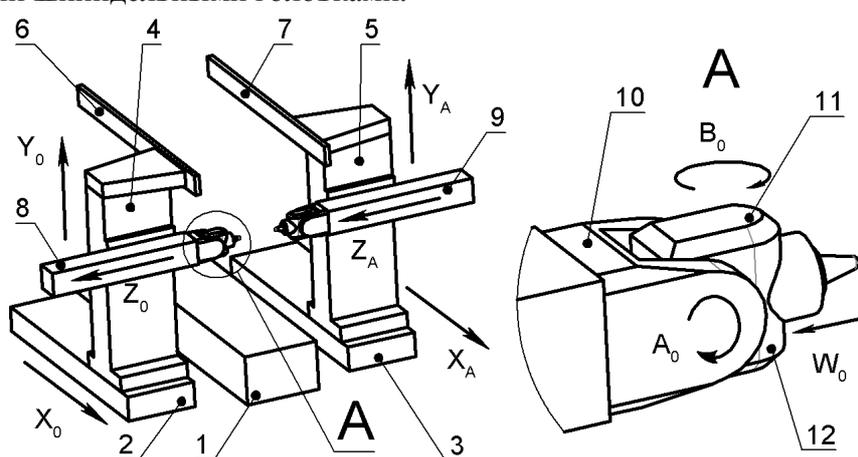


Рисунок 2 – Схема станка для «зеркального фрезерования»

Каждое устройство осуществления подачи обеспечивает шесть управляемых движений, причем из них четыре поступательных: X_0 , Y_0 , Z_0 , W_0 и X_A , Y_A , Z_A , W_A параллельных осям правой ортогональной стандартной системы координат станка, и два вращательных A_0 , B_0 и A_a , B_a , оси вращения которых параллельны соответственно направлениям движений Y_0 , Y_a , и плоскостям X_0Z_0 , X_AZ_A .

Данное устройство считается одной из наиболее перспективных конструкций в данной области. Однако, у него существует также ряд недостатков, наиболее существенными из которых являются следующие.

Дополнительные направляющие устройства изготавливаются в виде железобетонной конструкции мостовой или коробчатой формы, что значительно усложняет и удорожает его изготовление и монтаж. Одновременно существует возможность возникновения значительной погрешности взаимного расположения режущего инструмента относительно опорного элемента при неточном изготовлении или короблении железобетонной конструкции и, соответственно, рост погрешности обработки изготавливаемой панели.

На основе разработки и анализа возможных технических решений авторами была предложена альтернативная компоновка обрабатывающего центра (рисунок 3). На данное устройство была подана заявка на выдачу патента на полезную модель [3], получено положительное решение.

Предложенное устройство содержит основание 1, на котором установлены станины 2, 3 и 4. Обрабатываемая заготовка листовая панель обшивки планера самолета 5 закреплена в палете 6, установленной на станине 4. Палета 6 выполнена в форме рамы, обеспечивающей одновременный доступ к обрабатываемой поверхности 7 и поддерживаемой поверхности 8 обрабатываемой заготовки листовой панели обшивки планера самолета 5. Движения рабочих органов устройства задаются в правой прямоугольной стандартной системе координат xyz . В станинах 2 и 3 выполнены направляющие 9 и 10 оси X , в которых, соответственно, установлены колонны 11 и 12. Колонны 11 и 12 имеют линейные направляющие 13 и 14 осей Z и Z_1 , в которых установлены каретки 15, 16. Каретки 15, 16 имеют линейные направляющие

17, 18 осей Y и Y_1 , с ползунами 19, и 20. Колонны 11 и 12 жестко соединены между собой траверсой 21.

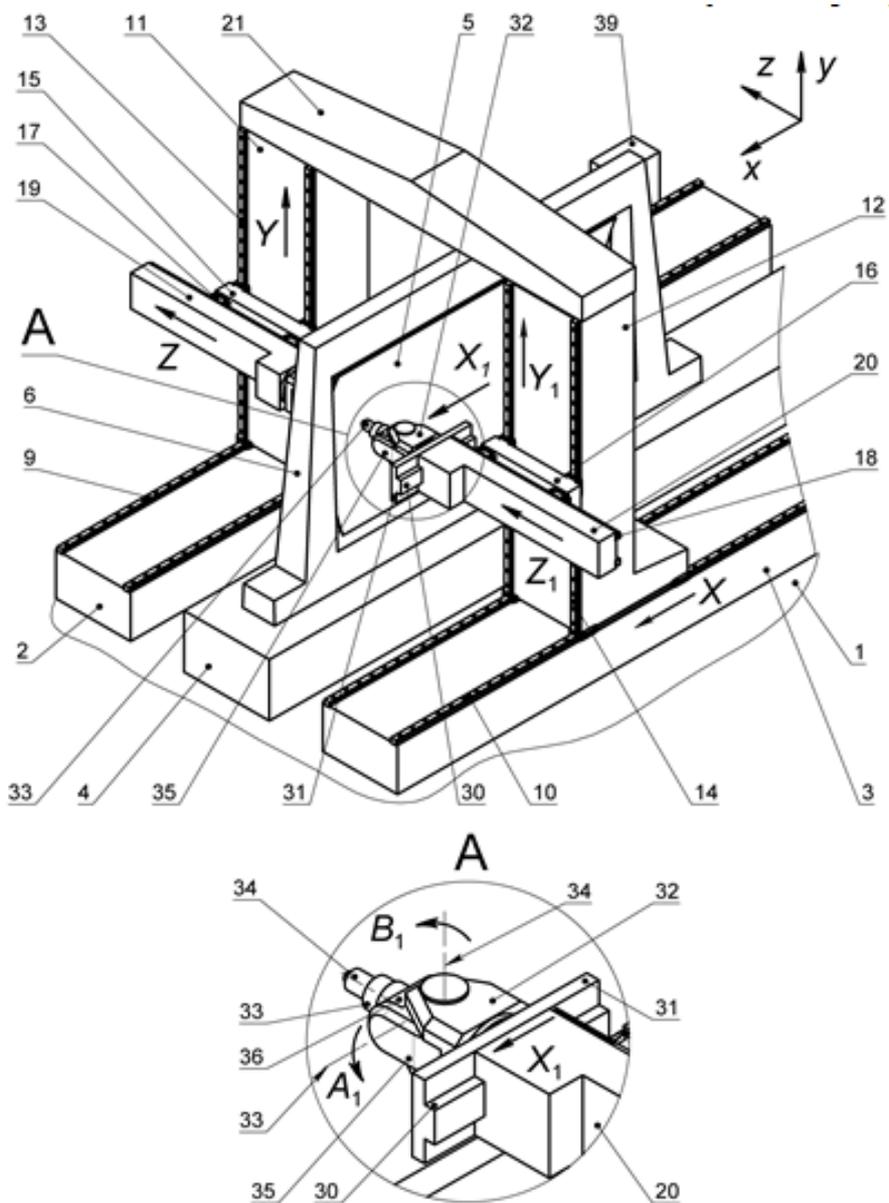


Рисунок 3 – Схема станка предложенной компоновки

С правого торца ползуна 19 установлен корпус двухповоротной шпиндельной головки 22, обеспечивающей вращательные движения A и B вокруг осей вращения 23 и 24, параллельных осям X , Y . В корпусе двухповоротной шпиндельной головки 22 с обеспечением вращательного движения B вокруг оси 24 размещен промежуточный корпус 25. В промежуточном корпусе 25 с обеспечением вращательного движения A вокруг оси 23, параллельной оси Y , установлен корпус 26, имеющий выдвижную пиноль 27 со шпинделем 28 для закрепления режущего инструмента – фрезы 29.

Отличием предлагаемого устройства [3] от аналога является жесткое соединение колонн 11 и 12 жестким порталом 21. При этом для обеспечения некоторого взаимного перемещения инструмента 29 и упора 38 вдоль оси X_1 , одна из двухповоротных головок установлена в линейных направляющих.

С левого торца ползуна 20 в направляющих 30 прямолинейного движения X_1 , параллельного оси X , расположена каретка 31, с установленным на ней корпусом двухповоротной шпиндельной головки 32, обеспечивающей вращательные движения A и B вокруг осей вращения 33 и 34, параллельных осям X , Y . В корпусе двухповоротной

шпиндельной головки 32 с обеспечением вращательного движения A вокруг оси 34 размещен промежуточный корпус 35. В промежуточном корпусе 35 обеспечением вращательного движения B вокруг оси 33, параллельной оси Y , установлен корпус 36, имеющий пиноль 37 с опорным элементом 38, контактирующим с поверхностью 8 обрабатываемой заготовки 5. Схема обработки заготовки 5 показана на рисунке 4.

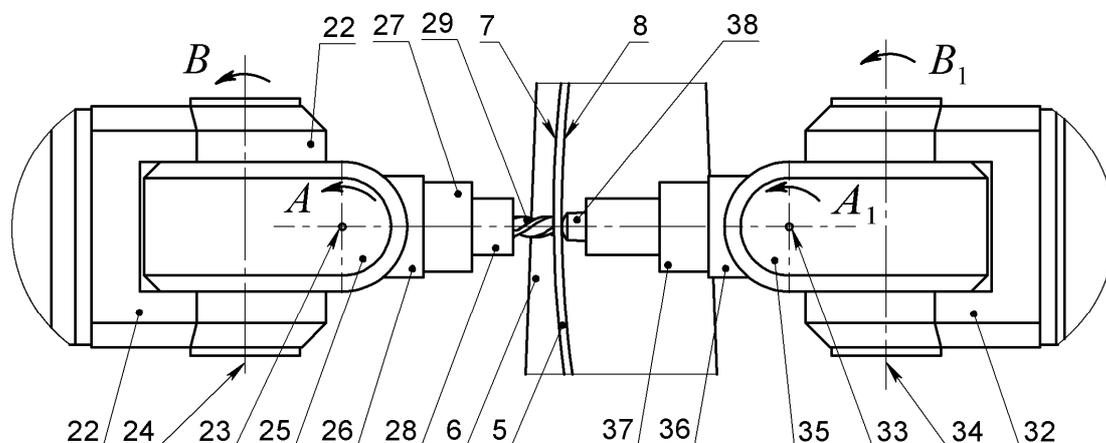


Рисунок 4 – Схема расположения двухповоротных головок

Управление приводами подачи устройства осуществляется от системы числового программного управления (ЧПУ) 39.

Режущий инструмент 29 расположен со стороны обрабатываемой поверхности 7 заготовки 5, а опорный элемент 38 – со стороны поддерживаемой поверхности 8.

При работе устройства палета 6 с обрабатываемой заготовкой 5 закрепляется на станине 4. ЧПУ по заданной программе производит управление перемещением колонн 11 и 12, а так же кареток 15, 16, ползунов 19, 20, каретки 31, промежуточных корпусов 25, 35, корпусов 26, 36 и выдвижных пинолей 28, 37. При этом режущий инструмент 29 производит обработку заготовки листовой панели обшивки планера самолета 5, а подвижный опорный элемент 34 предотвращает ее прогиб под действием силы резания.

Основание 1 обеспечивает жесткое взаимное положение станины 4 и станин 2, 3 с направляющими 4 и 5.

Необходимая точность перемещений обеспечивается направляющими 9, 10, 13, 14, 17, 18 и 30 и соответствующими приводами подачи.

Погрешность изготовления панели по толщине обусловлена погрешностями изготовления и монтажа.

При наличии погрешностей изготовления и монтажа дополнительных направляющих движения X и X' прототипа в направлении движения Y , появляются отклонения Δz и Δz_1 . Номинальные положения основных и дополнительных направляющих на схемах обозначены 40 и 41 соответственно. Положения основных и дополнительных направляющих при наличии погрешностей изготовления соответственно обозначены 42, 43.

Номинальные положения направляющих X и X' предлагаемого устройства обозначены 44. Их положения при наличии погрешностей обозначены 45.

В первом приближении погрешность изготовления панели по толщине может быть рассчитана как сумма погрешностей положения инструмента 26 и опорного элемента 34 с заготовкой 17.

$$\Delta = \Delta z + \Delta z_1, \quad (1)$$

где Δz – погрешность положения инструмента;

Δz_1 – погрешность положения опорного элемента.

Для составляющих данной формулы получим следующие выражения, связывающие погрешности положения инструмента 26, опорного элемента 34 и заготовки 17 с погрешностью направляющих 4, 5 базового станка [2] (рисунок 5, а):

$$\Delta z = \Delta z_n + \frac{Y}{H}(\Delta z_b - \Delta z_n) \quad (2)$$

$$\Delta z_1 = \Delta z_{1n} + \frac{Y}{H}(\Delta z_{1b} - \Delta z_{1n})$$

где $\Delta z_n, \Delta z_{1n}$ – погрешности положения нижней и верхней точек направляющих левой колонны станка-аналога;

Y – текущая вертикальная координата положения инструмента;

H – максимальная величина перемещения по координате Y ;

$\Delta z, \Delta z_1$ – погрешности положения нижней и верхней точек направляющих правой колонны станка-аналога.

Жесткая связь колонн 6 и 7 между собой траверсой 16 приводит к уменьшению их взаимных перемещений в направлении оси y , возникающих от неточностей их изготовления. При этом исключается влияние дополнительной направляющей, имеющей большую величину погрешности, чем у основной. Величина погрешности предлагаемого устройства может быть определена по формуле (1) с учетом зависимостей для расчета положений инструмента 26 и опорного элемента 34:

$$\Delta z = \Delta z + \frac{Y_1}{H}$$

$$\Delta z_1 = \Delta z_1 + \frac{Y_1}{H} \quad (3)$$

где $\Delta z, \Delta z_1$ – погрешности положения направляющих предложенного станка.

Сравнение уравнений (2) и (3) показывает, что погрешность взаимного положения инструмента 29 и опорного элемента 38 при наличии перемещений некоторой величины Z и Z_1 для случая использования предлагаемого устройства снижается.

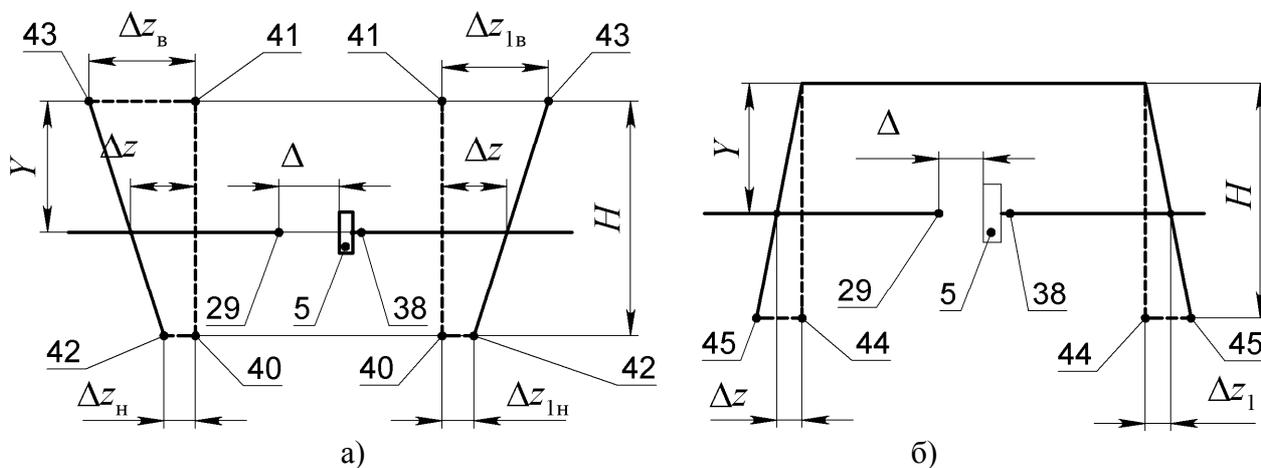


Рисунок 5 – Схема расчета погрешности:

а) – базовый станок; б) – станок, альтернативной компоновки

Погрешность взаимного положения инструмента 29, опоры 38 вдоль координаты X в предлагаемом устройстве будет зависеть в основном от одного привода X_1 , обеспечивающего относительное перемещение фрезы и опорного элемента. Для прототипа данная погрешность будет определяться суммой погрешностей положений по осям X и X_1 .

Следовательно, предлагаемое устройство будет обеспечивать большую точность обработки.

Погрешность взаимного положения инструмента и опоры вдоль координаты x в предлагаемом устройстве будет зависеть в основном от одного привода X' , обеспечивающего относительное перемещение фрезы и опорного элемента. Для базового станка данная погрешность будет определяться суммой погрешностей положений по осям X и X' .

Следовательно, предлагаемое устройство будет обеспечивать большую точность обработки. Применение предлагаемого устройства позволит также упростить его конструкцию за счет исключения дополнительных направляющих, размещенных на дополнительных несущих элементах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михрютин, В.В. Методы механической обработки листовых обшивок планера самолетов / В.В. Михрютин, М.А. Шерстобитов // Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева. – 2012. – № 2(23). – С. 279–284.
2. Process and device for the machining of panels: Pat. 7682112 US, 2007274797, заявл. 29.11.2007, опубл. 23.03.2007.
3. Пат. № 139404 Российская Федерация, МПК B23C, B23Q. Устройство для обработки листовых панелей обшивок планера самолетов / Михрютин В.В., Шерстобитов М.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО РГАТУ имени П.А. Соловьева. – заявл. 12.09.2013; опубл. 20.04.14. – 3 с.

Михрютин Вадим Владимирович

К.т.н. доцент РГАТУ имени П.А. Соловьева
Кафедра "Резание материалов, станки и инструменты" имени С.С. Силина
E-mail: rmsi@rsatu.ru

Шерстобитов Михаил Александрович

аспирант РГАТУ имени П.А. Соловьева
Кафедра "Резание материалов, станки и инструменты" имени С.С. Силина
E-mail: rmsi@rsatu.ru

V.V. MIHRYUTIN, M.A. SHERSTOBITOV

TECHNIQUES OF ACCURACY IMPROVEMENT FOR MACHINING OF AIRCRAFT SKINS

Approaches for machining of large thin skin parts are considered. Overview of existing solutions is made, including systems with vacuum actuators for clamping the work piece, and systems with moving support. Accuracy of machine tools are considered. New design of machine tool is suggested.

Keywords: machining, thin sheet skins, milling of nonrigid sheet parts, machining accuracy.

BIBLIOGRAPHY

1. Mihryutin, V.V. Metody mehanicheskoy obrabotki listovykh obshivok planera samoletov / V.V. Mihryutin, M.A. Sherstobitov // Vestnik RGATU imeni P.A. Solov'eva. – 2012. – № 2(23). – S. 279–284.
2. Process and device for the machining of panels: Pat. 7682112 US, 2007274797, zajavl. 29.11.2007, opubl. 23.03.2007.
3. Pat. № 139404 Rossijskaja Federacija, MPK B23C, B23Q. Ustrojstvo dlja obrabotki listovykh panelej obshivok planera samoletov / Mihryutin V.V., Sherstobitov M.A.; zajavitel' i patentoobladatel' FGBOU VPO RGATU imeni P.A. Solov'eva. – zajavl. 12.09.2013; opubl. 20.04.14. – 3 s.

Mihryutin Vadim Vladimirovich

Ph.D. Associate Professor RGATU behalf P.A. Solovyov
Department "Cutting of materials, Desktops and Instruments" name S.S. Silin
E-mail: rmsi@rsatu.ru

Sherstobitov Mikhail Aleksandrovich

Postgraduate RGATU behalf P.A. Solovyov
Department "Cutting of materials, Desktops and Instruments" name S.S. Silin
E-mail: rmsi@rsatu.ru

В.И. КОМОВА

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ 5,7-ДИБРОМОКСИХИНОЛИНА В АНАЛИТИЧЕСКОЙ ХИМИИ ВАНАДИЯ

Впервые показано, что хелат ванадия (V) с 5,7-дибромоксихинолином может быть использован в качестве электродноактивного вещества. Установлено, что извлечение ванадия (V) хлороформным раствором 5,7-дибромоксихинолина значительно возрастает в присутствии небольших добавок гексилового спирта. Изучено влияние pH раствора и влияние посторонних ионов на ванадиевую функцию мембран.

Ключевые слова: экстракция, коэффициент распределения, константа распределения, комплексное соединение, ионометрия, электродная функция, электрод сравнения, стеклянный электрод, ионоселективный электрод.

Одним из первых реагентов, предложенных для определения ванадия, был 8-оксихинолин. При переходе к другим его производным, наибольшее значение имеют замещенные в положении 2 и 5,7-дигалогензамещенные. Новые реагенты становятся более специфичными, избирательность их улучшается, так как они приобретают способность взаимодействовать в более кислых средах и с меньшим числом ионов [1]. Наиболее интересными реагентами с аналитической точки зрения являются 5,7-дибромоксихинолин и 2-метилоксихинолин. Остановимся на характеристике 5,7-дибромоксихинолина, так как предпочтение с практической точки зрения было отдано ему в нашей работе.

Введение двух атомов брома в структуру оксихинолина приводит к образованию нового реагента – 5,7-дибромоксихинолина (ДБО) (рисунок 1).

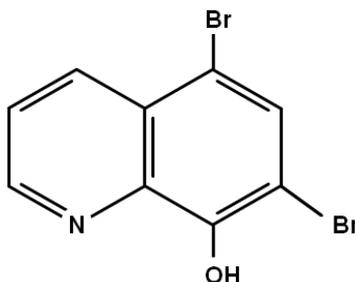


Рисунок 1 – Структура 5,7-дибромоксихинолина

Данный реагент образует более прочные комплексы с металлами по сравнению с 8-оксихинолином. Для брома характерны – J и + M – эффекты. Преобладание мезомерного смещения электронной плотности над индуктивным эффектом приводит к скоплению на атоме кислорода OH-группы в молекуле ДБО относительно большого отрицательного заряда, что делает связь O–Me более прочной.

5,7-дибромоксихинолин как реагент обладает рядом ценных для аналитического определения элементов свойств. Дибромоксинаты некоторых металлов имеет характерную окраску [2], благодаря чему эти реакции приобретают большую чувствительность и могут быть использованы для определения малых содержаний элементов. Кроме того, они хорошо растворимы в органических соединениях, что дает возможность экстракционного разделения и концентрирования элементов и последующего фотометрического определения. Реагент легко доступен в практике аналитических лабораторий.

В литературе имеется несколько работ, описывающих взаимодействие 5,7-дибромоксихинолина с ванадием. Например, в работе [3] разделение ванадия (V) и ванадия (IV) основано на том свойстве, что 5,7-дибромоксихинолят ванадия (V) экстрагируется из более кислой среды, чем соответствующий комплекс ванадия (IV). Разделение проводят путем экстракции ванадия (V) из 1 М HCl.

Известен вариант экстракционно-фотометрического определения ванадия (V) в виде 5,7-дибромоксихинолината. ДБО растворяли в бутиловом спирте и четыреххлористом углероде [4]. В этой работе было изучено влияние кислотности водной фазы, концентрации реагента и природы органического растворителя на полноту извлечения. Результаты опытов показали, что образующийся комплекс ванадия количественно экстрагируется бутанолом в более широких границах pH 1 – 9, чем четыреххлористый углерод, для которого интервал pH 2,6 – 4,0.

В работе [5] 5,7-дибромоксихинолин использовали для спектрофотометрического определения ванадия (V) в рудах. Экстракцию проводили при pH = 2,0 раствором ДБО в хлороформе. Реакция достаточно чувствительна. Предел обнаружения 0,7 мкг/мл.

5,7-дибромоксихинолин, например, использовался как реагент для разделения смеси Fe (III), V(V), Co. В этом случае ванадий осаждается либо с Co, если вести осаждение при pH = 6, либо с Fe (III), если создать pH = 2,0. Однако целесообразно применить 5,7-дибромоксихинолин с последующей экстракцией n-бутиловым, изобутиловым, изоамиловым спиртами или хлороформом. В этом случае pH экстракции для железа составляет 2 – 5, для ванадия – 1, для кобальта – 6 [6].

Для весового определения ванадия (IV) было предложено использовать 5,7-дибромоксихинолин в работе [7]. Полученный осаждением ацетоновым раствором дибромоксихинолина при pH = 5,0, осадок $VO(C_9H_4NOBr_2)_2$ желтого цвета растворим в концентрированных кислотах и нерастворим в основаниях. Соединение не меняет своего вида и не теряет в весе при высушивании до температуры 200°C.

На основе высокой чувствительности реакции 5,7-дибромоксихинолина с ванадием в условиях, предложенных в работе [7], было проведено гетерометрическое изучение этой реакции Бобтельским и сотрудниками.

Несмотря на то, что 5,7-дибромоксихинолин нашел широкое применение в аналитической химии редких элементов, механизм процессов экстракции этих соединений исследован недостаточно. Ранее изучался состав экстрагируемого соединения ванадия (V) с 5,7-дибромоксихинолином в хлороформе, однако коэффициенты распределения в этом случае невелики. Данные относительно его поведения в смеси растворителей представлены в работах [8, 9].

Изучая экстракционное равновесие в системе ванадий (V) – ДБО – гексанол – хлороформ, было установлено, что извлечение ванадия (V) хлороформным раствором ДБО значительно возрастает в присутствии небольших добавок гексилового спирта. При этом наблюдается рост коэффициентов распределения ванадия (V) между двумя несмешивающимися фазами. Наблюдаемый эффект можно объяснить образованием смешанного комплекса. Рассматривая ДБО в качестве хелатирующего реагента для ионов ванадия (V), гексанол следует представить как второй активный компонент, который способен вытеснять оставшиеся координированные молекулы воды из внутренней координационной сферы формально нейтрального комплекса, и, таким образом, делать его менее гидрофильным. Результаты по определению состава изучаемого комплекса приведены в таблице 1 и на рисунках 2 и 3.

Полученные данные позволили заключить о наличии одного комплексного соединения состава $[VO(OH) \cdot A_2 \cdot (C_6H_{13}OH)_n \cdot H_2O_{x-1}]$ и отвечающего соотношению компонентов Me:R (1:2).

Таблица 1 – Определение состава комплекса ванадия (V) с изучаемым реагентом по методу сдвига равновесия.

[R]	lg[R]	ΔA	$lg \frac{\Delta A}{\Delta A_{np.} - \Delta A}$
$1,5 \cdot 10^{-3} M$	-2,82	0,240	-0,439
$2,0 \cdot 10^{-3} M$	-2,70	0,360	-0,176
$2,5 \cdot 10^{-3} M$	-2,60	0,450	0,000
$3,0 \cdot 10^{-3} M$	-2,52	0,550	0,196
$3,5 \cdot 10^{-3} M$	-2,46	0,640	0,391

R – ДБО; $C_{V(V)} = 5 \cdot 10^{-4} \text{M}$; $\Delta A_{\text{пр.}} = 0,90$

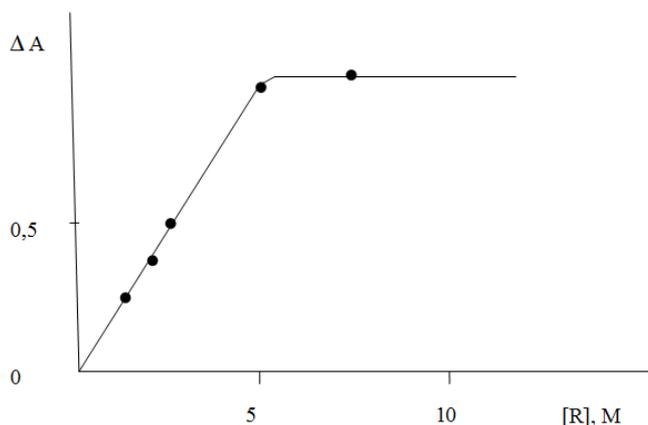


Рисунок 2 – Кривая насыщения для процесса комплексообразования ванадия (V) с ДБО в органическом растворителе (гексанол – хлороформ 1:2):

$C_{V(V)} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ моль/л}$; pH = 2,0; $\lambda = 410 \text{ нм}$

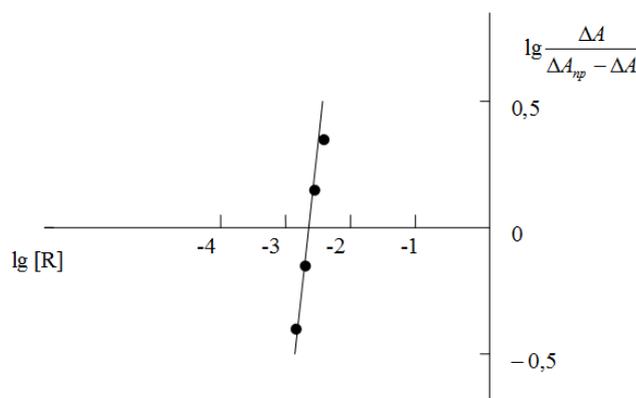


Рисунок 3 – Определение состава комплекса ванадия (V) с 5,7-дибромосихинолином:

$C_{V(V)} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ моль/л}$; pH = 2,0; $\lambda = 410 \text{ нм}$; $\text{tg } \alpha = 2$

Была проведена экстракция ванадия (V) в системах ДБО – ТБФ – гексанол; ДБО – ТГФ – хлороформ; ДБО – МИБК – хлороформ. В выборе этой группы растворителей учитывалось несколько моментов. Исследуемые растворители относятся к группе нейтральных реагентов. Реагенты этого типа обладают высокой сольватирующей способностью по отношению к неорганическим веществам, но имеют относительно небольшие дипольные моменты.

Соотношение растворителей было определено предварительными опытами. Наблюдаемый рост коэффициентов распределения ванадия (V) можно объяснить действием смеси растворителей. Из экспериментальных данных оценено значение константы экстракции $\lg K_{\text{экс.}} = 5,6$.

Сравнивая экстрагирующую способность изученных нами экстракционных систем, следует заключить, что наибольший интерес в экстракционном варианте представляют системы:

ДБО – н – гексиловый спирт – хлороформ (1:2)

ДБО – ТБФ – н – гексиловый спирт (1:6).

Образуемое соединение достаточно устойчиво. Развитие максимальной окраски комплексного соединения наступает быстро и окраска устойчива в течение длительного времени (месяца). Применение смеси растворителей приводит к повышению стабильности комплекса, быстро устанавливается экстракционное равновесие при pH = 2,0.

В аналитической химии, синергетические системы представляют большой интерес, особенно с практической точки зрения. Наличие синергетического эффекта способствует росту степени извлечения экстрагируемого вещества в органическую фазу. При этом происходит увеличение коэффициентов распределения, а, следовательно, и констант экстракции, улучшается кинетика экстракции, что отмечается и в данном случае. Это в свою очередь,

может привести к повышению чувствительности экстракционно–фотометрического определения ванадия (V).

На основании изучения взаимодействия ионов ванадия (V) с ДБО в смеси растворителей, предложен экстракционно–фотометрический метод определения ванадия (V) в растворах. На рисунке 4 представлены градуировочные графики.

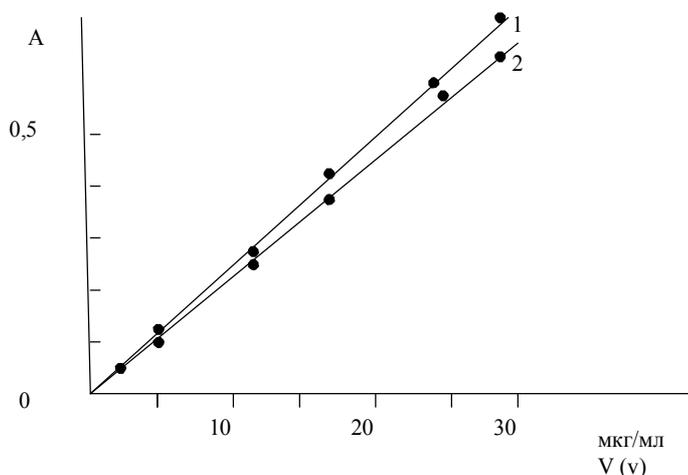


Рисунок 4 – Градуировочные графики для определения ионов ванадия (V) с ДБО в органической среде:
 1 – гексанол–хлороформ (1:2); 2 – трибутилфосфат–гексанол (1:6) pH = 2,0; $\lambda = 410$ нм; $l = 5$ см

Метод применим для довольно широкого диапазона определяемых содержаний: от 0,20 мкг/мл до 30 мкг/мл и был использован для определения ионов ванадия (V) в сточных водах титано–магниевого производства [10].

Впервые было показано, что хелат ванадия (V) с ДБО может быть использован в качестве электродноактивного вещества, а его раствор в смеси растворителей: гексанол–хлороформ (1:2), три–н–бутилфосфат–гексанол (1:6), $2\text{--}5 \cdot 10^{-3}$ М раствор гексанола в нитробензоле был применен в качестве жидкой мембраны ИСЭ на ванадий (V) [11].

Впервые был создан пластифицированный ионоселективный электрод, чувствительный к ионам ванадия (V) на основе электродноактивного соединения хелата ванадия (V) с ДБО. В качестве пластификаторов использовали о–нитрофенилоктиловый эфир (ОНФОЭ) и диоктиловый эфир фталевой кислоты (ДОФ). Диапазон pH выполнения ванадиевой функции 2,0 – 4,0 [12].

Результаты измерения, представленные на рисунке 5 показывают, что мембраны, пластифицированные ОНФОЭ и ДОФ проявляют устойчивую электродную функцию с угловым коэффициентом $\alpha = 86$ мВ в элементе без переноса и $\alpha = 28$ мВ в элементе с переносом, близким к теоретическому для двухзарядного иона. Измерения ЭДС в элементе без переноса еще раз подтверждает о проявлении исследуемыми мембранами катионной функции. Этот строгий в термодинамическом аспекте элемент дает четкую информацию о заряде иона, к которому обратим электрод, а именно – двухзарядному $\text{VO}(\text{OH})^{2+}$. Область выполнения электродной функции наблюдается в интервале концентраций ванадия (V) $1 \cdot 10^{-1}$ – $1 \cdot 10^{-3}$ М. Устойчивые значения потенциалов достигаются за 1–2 минуты. Измерения проводили как в свежеприготовленных растворах, а также в растворах спустя неделю. Стандартные растворы ванадия (V) были подвержены кипячению. Результаты измерений свидетельствуют о том, что гидролиза в области pH 2,0 – 4,0 в растворах ванадия не происходит. Ванадиевая функция мембран воспроизводится в течение месяца, при этом угловой коэффициент α и значение потенциалов изменяются незначительно (в пределах 2 – 3 мВ).

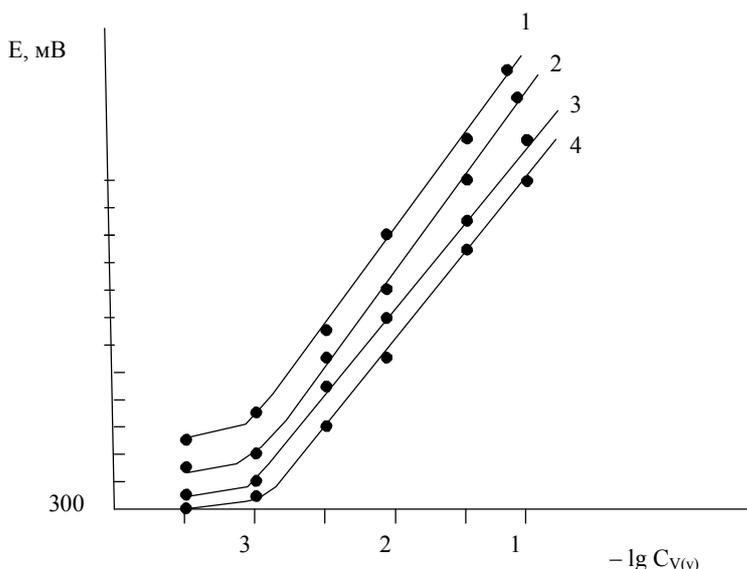


Рисунок 5 – Зависимость ЭДС элемента (II) от $-\lg C_{V(V)}$ для мембран пластифицированных:
 1 – о-нитрофенилоктиловым эфиром,
 2 – диоктиловым эфиром фталевой кислоты, только что изготовленных; 3,4 – спустя месяц работы

На основе созданного нами пленочного ванадийселективного электрода, разработаны и испытаны экспрессные ионометрические методики по определению содержания ионов ванадия (V) от 0,1 до 26 г/л в маточных растворах, промышленных водах в процессе получения пятиокси ванадия из технического окситрихлорида ванадия [13].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дзиомко, В.М. К вопросу о влиянии заместителей в молекуле 8-оксихинолина на экстрагируемость соответствующих комплексных соединений / В.М. Дзиомко // Сб. ст. Всесоюз. политехн. ин-та. – 1953. – Вып. 4. – С. 44–50.
2. Нгуен Ши, Зунг Изучение растворимости 5,7-дибромоксихинолина и его соединений с некоторыми металлами в органических растворителях / Нгуен Ши Зунг, Ф.Г. Жаровский // Укр. хим. ж. – 1970. – Т. 36. – Вып. 9. – С. 947.
3. Церковницкая, И.А. Использование органических реагентов для определения различных степеней ванадия / И.А. Церковницкая, М.Ф. Григорьева, Н.А. Кустова // Химия редких элементов. – Л., 1964. – С. 153–159.
4. Нгуен Ши, Зунг. Экстракционно-фотометрическое определение ванадия в сталях с помощью 5,7-дибром-8-оксихинолина / Нгуен Ши Зунг, В.А. Рыженко, Ф.Г. Жаровский // Укр. хим. ж. – 1969. – Т. 35. – Вып. 2. – С. 206–210.
5. Григорьева, М.Ф. Определение меди и ванадия в продуктах никелевого производства с использованием производных 8-оксихинолина / М.Ф. Григорьева, Э. Теран, И.А. Церковницкая // Проблемы современной аналитической химии. – Л. – 1983. – Вып. 4. – С. 70–87.
6. Нгуен Ши, Зунг. Взаимодействие 5,7-дибромоксихинолина с различными катионами / Нгуен Ши Зунг, Ф.Г. Жаровский // Укр. хим. ж. – 1970. – Т. 36. – Вып. 10. – С. 1071–1072.
7. Алимарин, И.П. Осаждение четырехвалентного ванадия 5,7-дибром- и 5,7-диод-8-оксихинолином / И.П. Алимарин, В.Г. Крюков, Ю.А. Золотов // Ж. аналит. химии. – 1955. – Т. 10. – Вып. 1. – С. 56–60.
8. Комова, В.И. Исследование механизма экстракции ванадия (V) в системе 5,7-дибромоксихинолин в смеси растворителей в целях разработки методов контроля и диагностики сточных вод титано-магниевого производства на содержание ионов ванадия (V) / В.И. Комова // Известия ОрелГТУ. – Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – № 4/276(575). – 2009. – С. 101–104.
9. Об экстракции ионов ванадия (V) в системе 5,7-дибромоксихинолин – гексанол – хлороформ / Л.Т. Дубровина, В.И. Комова, В.А. Лугинин, И.А. Церковницкая // ЛГУ им. А.А. Жданова. – Л.: ЛГУ, 1987. – Деп. ВНИИТэхим 03.02.87, № 89–ХП–87.
10. Лугинин, В.А. Пленочный ионоселективный электрод для определения ванадия (V) / В.А. Лугинин, В.И. Комова, А.Л. Грекович // Ж. прикладной химии. – 1987. – № 1. – С. 189–190.
11. Определение ионов ванадия (V) в растворе с помощью жидкостного ионоселективного электрода / В.А. Лугинин, В.И. Комова, А.Л. Грекович, Т.И. Пальникова // Вестник ЛГУ. – 1987. – Вып. 1. – С. 95–97.
12. Комова, В.И. Определение ванадия (V) в сточных водах титано-магниевого производства с помощью пленочного ионоселективного электрода / В.И. Комова // Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – № 4–3/268(535). – 2007. – С. 137–138.
13. Комова, В.И. Определение ванадия (V) в сточных водах титано-магниевого производства экстракционно-фотометрическим методом / В.И. Комова // Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – № 4–3/268(535). – 2007. – С. 141–143.

Комова Вера Ивановна

Кандидат химических наук, доцент кафедры «Химия и биотехнология»
 ФГБОУ ВПО «Госуниверситет–УНПК» г. Орел
 Тел. (4862)419892;
 E-mail: chemistry@ostu.ru

V.I. KOMOVA

**USE OF 5,7–DIBROMOHYDROXYQUINOLINE
 IN ANALYTICAL CHEMISTRY OF VANADIUM**

It was shown that chelate vanadium (V) with 5,7 – dibromohydroxyquinoline can be used as Ehlektrodnoaktivnyye substance. It was established that the recovery of vanadium (V) chloroform solution of 5,7– dibromohydroxyquinoline increases significantly in the presence of small amounts of hexyl alcohol. The influence of pH and the effect of foreign ions on the function of vanadium membranes.

Keywords: extraction, distribution coefficient, distribution constant, complex compound, ionometry, electrode function, reference electrode, glass electrode, ion–selective electrode.

BIBLIOGRAPHY

1. Dziomko, V.M. K voprosu o vlijanii zamestitelej v molekule 8–oksihinolina na jekstragiruemost' sootvetstvujushhijh kompleksnyh soedinenij / V.M. Dziomko // Sb. st. Vsesojuz. politehn. in–ta. – 1953. – Vyp. 4. – S. 44–50.
2. Nguen Shi, Zung Izuchenie rastvorimosti 5,7–dibromoksihinolina i ego soedinenij s nekotorymi metallami v organicheskijh rastvoriteljah / Nguen Shi Zung, F.G. Zharovskij // Ukr. him. zh. – 1970. – T. 36. – Vyp. 9. – S. 947.
3. Cerkovnickaja, I.A. Ispol'zovanie organicheskijh reagentov dlja opredelenija razlichnyh stepenej vanadija / I.A. Cerkovnickaja, M.F. Grigor'eva, N.A. Kustova // Himija redkijh jelementov. – L., 1964. – S. 153–159.
4. Nguen Shi, Zung. Jekstrakcionno–fotometricheskoe opredelenie vanadija v staljah s pomoshh'ju 5,7–dibrom–8–oksihinolina / Nguen Shi Zung, V.A. Ryzhenko, F.G. Zharovskij // Ukr. him. zh. – 1969. – T. 35. – Vyp. 2. – S. 206–210.
5. Grigor'eva, M.F. Opredelenie medi i vanadija v produktah nikeljevogo proizvodstva s ispol'zovaniem proizvodnyh 8–oksihinolina / M.F. Grigor'eva, Je. Teran, I.A. Cerkovnickaja // Problemy sovremennoj analiticheskijh himii. – L. – 1983. – Vyp. 4. – S. 70–87.
6. Nguen Shi, Zung. Vzaimodejstvie 5,7–dibromoksihinolina s razlichnymi kationami / Nguen Shi Zung, F.G. Zharovskij // Ukr. him. zh. – 1970. – T. 36. – Vyp. 10. – S. 1071–1072.
7. Alimarin, I.P. Osazhdenie chetyrehvalentnogo vanadija 5,7–dibrom– i 5,7–diiod–8–oksihinolinom / I.P. Alimarin, V.G. Krjukov, Ju.A. Zolotov // Zh. analit. himii. – 1955. – T. 10. – Vyp. 1. – S. 56–60.
8. Komova, V.I. Issledovanie mehanizma jekstrakcii vanadija (V) v sisteme 5,7–dibromoksihinolin v smesi rastvoritelej v celjah razrabotki metodov kontrolja i diagnostiki stochnyh vod titano–magnievogo proizvodstva na sodержanie ionov vanadija (V) / V.I. Komova // Izvestija OrelGTU.– Serija «Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii». – № 4/276(575). – 2009. – S. 101–104.
9. Ob jekstrakcii ionov vanadija (V) v sisteme 5,7–dibromoksihinolin – gekсанол – hloroform / L.T.Dubrovina, V.I. Komova, V.A. Luginin, I.A. Cerkovnickaja // LGU im. A.A. Zhdanova. – L.: LGU, 1987. – Dep. VNIITjehim 03.02.87, № 89–XII–87.
10. Luginin, V.A. Plenochnyj ionoselektivnyj jelektrod dlja opredelenija vanadija (V) / V.A. Luginin, V.I. Komova, A.L. Grekovich // Zh. prikladnoj himii. – 1987. – № 1. – S. 189–190.
11. Opredelenie ionov vanadija (V) v rastvore s pomoshh'ju zhidkostnogo ionoselektivnogo jelektroda / V.A. Luginin, V.I. Komova, A.L. Grekovich, T.I. Pal'nikova // Vestnik LGU. – 1987. – Vyp. 1. – S.95–97.
12. Komova, V.I. Opredelenie vanadija (V) v stochnyh vodah titano–magnievogo proizvodstva s pomoshh'ju plenochnogo ionoselektivnogo jelektroda / V.I. Komova // Izvestija OrelGTU. Serija «Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii». – № 4–3/268(535). – 2007. – S. 137–138.
13. Komova, V.I. Opredelenie vanadija (V) v stochnyh vodah titano–magnievogo proizvodstva jekstrakcionno–fotometricheskijh metodom / V.I. Komova // Izvestija OrelGTU. Serija «Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii». – № 4–3/268(535). – 2007. – S. 141–143.

Komova Vera Ivanovna

Candidate of chemical science, assistant professor at the department of «Chemistry»
 State University–Education–Science–Production Complex
 Phone (4862) 41 98 92
 E-mail: chemistry@ostu.ru

Л.А. САВИН, Ю.С. СТЕПАНОВ, А.В. КОРНАЕВ

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ГИБРИДНОЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СМАЗКИ НА ОСНОВЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ

В статье представлен обзор достижений в области исследований и производства фуллеренов и фуллереноподобных наноматериалов, перечислены и проанализированы перспективы их применения в разработке новых смазочных материалов, названных материалами гибридной гидродинамической смазки.

Ключевые слова: фуллерен, наночастица, наноматериал, вязкость, адгезия, адсорбция, гидродинамическая смазка, гибридное трение, реология, механика сплошных сред, молекулярная динамика.

Передача силовых потоков в машинах обеспечивается в основном посредством вращательного движения, и опоры при этом в полной мере можно назвать критическими элементами, во многом определяющими удельные показатели и работоспособность машин [1]. Рассуждая далее о трении в подшипниковых узлах, следует перечислить основные способы опоры роторов: 1) подшипники скольжения сухого и граничного трения [2]; 2) подшипники качения; 3) подшипники жидкостного трения; 4) электромагнитные подшипники. Первые два способа подразумевают контактное взаимодействие трущихся поверхностей. На сегодняшний день нанотехнологии успешно реализованы и продолжают реализовываться в таких узлах трения, что связано в большей мере с разработкой и внедрением различных антифрикционных добавок [3, 4]. Третий способ заключается в полном разделении трущихся поверхностей за счет гидродинамического эффекта смазки: движение трущихся поверхностей создает движение смазочного слоя, который, при определенных условиях, развивает несущую способность. Этот способ, по мнению авторов, является наиболее перспективным в плане повышения энергоэффективности за счет улучшения физических свойств новых смазочных материалов. На сегодняшний день ряд исследовательских лабораторий в России и за рубежом занимаются разработкой и исследованием свойств новых материалов, но обобщающих результатов улучшения свойств гидродинамических смазочных материалов пока не получено. Четвертый способ обеспечивает практически нулевое трение, однако назвать его энергоэффективным нельзя, потому что для поддержания ротора необходимы затраты значительного количества энергии. Это связано с природой электромагнитных сил, которые являются объемными, в противовес поверхностным силам, поддерживающим ротор в остальных способах.

В этой связи можно утверждать, что гидродинамическая теория смазки, становление которой началось более века назад, по-прежнему остается фундаментальной основой решения проблем минимизации негативного влияния трения и повышения надежности машин, а также можно предположить, что в ближайшее время эта теория способна перейти на новый уровень в связи с открытием и применением новых материалов. Для определения перспектив открытия и применения новых материалов следует вспомнить основные положения классической гидродинамической смазки [1].

Материал гидродинамической смазки – материал, обладающий свойством внутреннего трения, линейно или не линейно зависящего от скорости сдвиговой деформации (свойство вязкости), способный при определенных условиях за счет этого свойства внутреннего трения развивать достаточную для разделения трущихся поверхностей несущую силу.

Условиями развития несущей силы в гидродинамическом смазочном слое являются: значительный градиент скорости движения смазочного материала по направлению нормали к поверхности трения, который возникает благодаря взаимному движению трущихся поверхностей, «прилипанию» смазочного материала к трущимся поверхностям, свойству вязкости смазочного материала и малому зазору между поверхностями; изменение зазора между трущимися поверхностями во времени или по направлению движения смазочного материала.

Важную роль наноматериалов в повышении энергоэффективности смазки авторы отмечали в работе [5].

Данная статья посвящена обзору и обсуждению основных перспектив перехода теории гидродинамической смазки на новый уровень энергоэффективности за счет применения

в качестве смазочных материалов сред, частично или полностью состоящих из наноразмерных твердых частиц. Точнее говоря, обсуждаться будет то, какими свойствами теоретически должен обладать материал энергоэффективной гидродинамической смазки и то, чем эти свойства могут быть обеспечены.

Перспектива первая. Многообразие свойств существующих и теоретически возможных наноматериалов способно обеспечить любые требуемые физические свойства гидродинамической смазки.

Огромное поле деятельности в химии и физике появилось с открытием в 1985 году новой аллотропной формы углерода – фуллерена, за что Г. Крото, Р. Кёрлу и Р. Смолли в 1996 году была присуждена Нобелевская премия по химии.

На сегодняшний день известны многие перспективные электрические, оптические, химические и биологические свойства соединений фуллеренов, используемые в разработке новых сверхпроводящих материалов, органических солнечных батарей, лекарственных препаратов, и другой продукции [6, 7].

Рассмотрим далее многообразие существующих и теоретических материалов на основе фуллеренов с позиции возможных новых механических свойств.

Во-первых, известно, что фуллерены с количеством атомов в молекуле более 60 имеют тысячи изомеров, но выделить и охарактеризовать возможность их существования и стабильности удалось лишь для тех, которые удовлетворяют определенному правилу [8]. Общее количество фуллеренов, структура которых удовлетворяет этому правилу, начиная от C_{60} и C_{70} до C_{84} составляет 51 вид, а в интервале от C_{60} до C_{94} их количество достигает 300 видов. Из них получены не более 30 видов, а производятся в коммерческих масштабах только C_{60} и C_{70} . Многообразие существующих и теоретических видов фуллеренов в зависимости от количества атомов углерода в молекуле подробно исследовано в работе [8].

Во-вторых, фуллерены высших порядков могут заключать внутри себя фуллерены низших порядков, образуя «луковичные» структуры (buckyonions) – так называемые экзоэдральные комплексы. В работе [9] доказана возможность существования «луковичных» структур фуллерена с десятками слоев, расположенных на расстоянии около 3 ангстрем, что соответствует примерно расстоянию между атомными слоями графита.

В третьих, уникальным свойством фуллеренов является образование металлфуллеренов – так называемых эндоэдральных комплексов, в которых атом металла находится внутри углеродного каркаса. Внутри каркаса некоторых высших фуллеренов могут находиться два и три атома металла. Так были выделены $Sc_2 @ C_{84}$, $Sc_3 @ C_{82}$, $La_2 @ C_{80}$ [6 5]. Очевидно, что поверхностные, прочностные и другие механические свойства таких соединений могут существенно отличаться от свойств исходных фуллеренов.

В четвертых, способность фуллеренов вступать в химические реакции присоединения и замещения открывает, по-видимому, самое большое поле деятельности в разработке новых материалов. Известны реакции синтеза гидридов фуллеренов $C_{70}H_n$, к сожалению неустойчивых на воздухе и при хранении [6]. Фуллерен, как известно, является гидрофобным материалом, что затрудняет его использование в качестве добавки к маслам. Гидратированный фуллерен обладает свойством гидрофильности и представляет собой молекулярный комплекс, состоящий из молекулы фуллерена C_{60} , заключенной в гидратную оболочку, которая содержит 24 молекулы воды: $C_{60}@(H_2O)_{24}$ [9]. Такой водный раствор фуллерена является устойчивым во времени. Фуллерен C_{60} легко реагирует с хлором в свободно-радикальных условиях, образуя $C_{60}Cl_{40}$. Это соединение может быть использовано в качестве интермедиата для дальнейшей функционализации – получения полифуллерола и полифторфуллерена. Известны соединения фтора, обладающие низким коэффициентом трения [10 9], поэтому фторирование фуллеренов представляет значительный интерес с точки зрения механики, хотя и имеет некоторые ограничения с точки зрения вреда экологии. Фторфуллерен C_{60} может содержать до 48 атомов фтора на одну молекулу: $MF_n \cdot C_{60}$ [6, 11, 12]. Большую практическую значимость имеют реакции полимеризации с участием фуллеренов. Существует мнение, что именно обилие новых полимерных форм углерода заставило ввести новые термины: наночастицы, нанотехнологии и другие [13]. В работе [6] приведено подробное описание ре-

акций циклоприсоединения с образованием полимеров, в том числе линейного строения, в которых фрагмента C_{60} соединены бутановыми кольцами [6]. Образование длинных цепочек полимеров с участием фуллеренов, в частности, оказало положительный эффект на свойства каучуков [14]. Перспективной для новых смазочных материалов является полимерная структура формы «звезда» (star-shaped polymer), названная так по сходству с морской звездой [15]. Похожим является образование супрамолекулярных структур с участием большого количества молекул фуллеренов и цепочек полимеров [15], такая структура визуально похожа на клубок ниток. Отдельно выделяют структуру ветвистого строения – дендример (dendrimer) [15]. Фуллерены в такой структуре визуально напоминают листья дерева, а цепочки полимеров – его ветви, при этом возможно образование глобулярной формы молекулы. Правомерно ожидать проявления особых механических свойств полимеров, например, пониженной прочности и поверхностной энергии, повышенной вязкости и сопротивления качению. Следует отметить, что объединение фуллеренов в группы возможно не только посредством химических связей, как это реализовано в полимерах, но и посредством физических сил межмолекулярного взаимодействия [16].

Долгое время ученым не удавалось получить аналоги фуллеренов для других элементов, в то время как нанотрубки довольно быстро научились синтезировать для многих элементов и окислов [13]. В 2000-е годы, во многом благодаря работам профессора Р.Тенне, в израильской компании «ApNano materials» [15, 17] были получены неорганические фуллереноподобные наночастицы дисульфида вольфрама WS_2 , получившие практическое применение в качестве добавки ADDNANO к жидким смазочным материалам. Каждая частица такой добавки представляет собой многослойное (более 30 слоев) образование «луковичного» типа размером 10–100 нм [17].

В работе [6] представлен подробный обзор еще одного перспективного класса наноматериалов на основе наноалмазных порошков и суспензий. Примечательны однородность фракции наноалмазов – около 4 нм, и реологические свойства суспензии, а именно аномально высокая вязкость. Однако из-за большой поверхностной энергии наноалмазный порошок, как и многие другие вещества в ультрадисперсном состоянии, состоит не из отдельных наночастиц, а из их конгломератов размерами порядка 1 мкм. Причем, агрегаты 100 нм очень сложно разбить на исходные 4 нм. Наноалмазы применяют при создании износостойких композиционных гальванических покрытий, а также при создании композитных материалов с улучшенными механическими свойствами, таких как углерод–углеродные композиты, композиты на основе карбида кремния, полимер–наноалмазные композиты [6]. Последние применяются в качестве модификаторов поверхности трения в двигателях внутреннего сгорания.

В работе [18] исследована возможность применения процессов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза для получения наноразмерных порошков тугоплавких соединений, в частности карбида вольфрама WC фракцией около 300 нм с кристаллической структурой.

Выводы по разделу. Эра нанотехнологий началась с открытия фуллерена в 1985 году. Одновременно той же группой ученых были открыты эндоэдральные производные фуллерена, то есть молекулы фуллерена с атомами другого элемента внутри. В 1991 году произошло открытие углеродных нанотрубок, затем углеродных луковиц, которые являются полимерными углеродными образованиями. Сравнительно недавно, в 2000-е годы удалось создать фуллереноподобные наночастицы из другого, кроме углерода материала, что является, безусловно, серьезным прорывом. Многообразие форм и содержания открытых практически или обоснованных теоретически наноматериалов исчисляется миллионами. Поэтому вполне оправдано предположить, что современная химия способна создать новые материалы с требуемыми свойствами, а современный уровень моделирования «течений» смазочных материалов способен выдвинуть требования к идеальной, или близкой к идеальной гидродинамической смазке. О некоторых таких требованиях и о достижениях в области моделирования пойдет речь в следующих разделах статьи.

Перспектива вторая. Взаимодействие наноматериалов с поверхностями трения способно обеспечить выполнение условия «прилипания» гидродинамической смазки.

Явление «прилипания» движущейся среды к шероховатой поверхности наблюдается повсеместно. Например, скорость воздуха на поверхности движущегося автомобиля равна скорости автомобиля, поэтому тонкий слой пыли на поверхности автомобиля не сдувается в процессе движения. Другим похожим примером является пыль на лопастях вентилятора, которая также не сдувается стремительным потоком движущегося воздуха. Условие «прилипа-

ния» смазочного слоя к трущимся поверхностям является одним из обязательных условий возникновения эффекта жидкостного трения (см. введение). При этом смазочная среда образует неподвижный относительно поверхности трения слой, а трение поверхности с движущейся смазочной средой становится по сути внутренним, то есть определяется свойствами материалов смазки, а не материалов пары трения.

К жидким гидродинамическим смазочным материалам предъявляется требование к способности смачивания поверхности трения или к способности возникновения капиллярного эффекта. К новым наноматериалам гидродинамической смазки должно быть предъявлено подобное требование – они должны образовывать на поверхности трения неподвижный слой толщиной в одну или несколько молекул.

Геометрическим аспектом условия «прилипания» твердой ультрадисперсной смазки является необходимость заполнения впадин микронеровностей шероховатой поверхности. Как известно [1], шероховатость поверхностей трения в подшипнике жидкостного трения составляет около 1 мкм, что на 3 порядка больше размера фуллерена C_{60} . Можно предположить, что частицы размером порядка 100 нм (в сто раз больше фуллерена C_{60}) также способны с геометрической точки зрения заполнить микронеровности трущихся поверхностей подшипника жидкостного трения. Более важным является аспект межмолекулярного взаимодействия материалов смазки и смазываемой поверхности. Природа адсорбции может быть как физической, так и химической [2, 19]. Как правило, малый размер частиц способствует «прилипанию» за счет их высокой поверхностной энергии. Объяснить это на примере сферической частицы можно следующим образом: при уменьшении радиуса сферы ее объем уменьшается быстрее, чем площадь поверхности, поэтому энергия внутренних межатомных сил частицы убывает быстрее энергии внешних некомпенсированных межатомных сил. Поэтому также начиная с некоторого критического размера, частица приобретает новые свойства и переходит в новое качество – она становится наночастицей. Примером проявления высокой поверхностной энергии наночастиц является образование конгломератов частиц наноалмазного порошка, которые очень сложно разбить на исходные частицы [13]. Другим примером, но уже химической адсорбции являются кристаллы фуллерита – кристаллической структуры молекул фуллерена C_{60} [16], получаемые выпариванием из раствора.

Существенную роль в обосновании данной перспективы имеют успехи нанотрибологии, исследующей экспериментально и теоретически тонкие антифрикционные пленки на поверхностях трения. Ряд достижений связан с использованием в узлах граничного и жидкостного трения различных полимеров, образующих на поверхности трения защитное покрытие минимальной толщиной порядка нескольких нанометров [20]. Полимеры используются в синтетических смазках технологических [2] и биологических узлов трения. Следует отметить, что одной из первых идей применения фуллеренов было создание микроскопических подшипников качения [19], однако, видимо, сложность создания поверхностей качения такого подшипника не позволила до сих пор реализовать эту идею в действительность. Тем не менее, фрагментарное расположение атомов фуллеренов на поверхности трения уменьшает площадь контакта трущихся поверхностей, снижая тем самым коэффициент трения и износ [3]. Как утверждает компания–производитель добавки фуллереноподобного дисульфида вольфрама WS_2 , механизм смазки наночастицами WS_2 аналогичен механизму действия шариков в подшипнике, а также определяется их слоистой объемной структурой, в которой отдельные слои, деформируясь, скользят друг относительно друга под нагрузкой, уменьшая трение и износ. Помимо этого, под нагрузкой происходит разворачивание шарообразных структур ряда фуллереноподобных частиц в ленточные, которые обволакивают трущиеся поверхности тонкой пленкой, которая работает как смазочная среда в течение долгого времени [16]. Кроме того, экспериментально установлено, что более крупные частицы продуктов износа покрываются адгезионным слоем наночастиц [21], что также благоприятно влияет на процесс трения. Широкое коммерческое распространение получили добавки к моторным маслам на основе полимер–наноалмазных композиций [13]. Частицы наноалмазов покрыты полимерами, которые в результате действия высокой температуры и давления обеспечивают прочную адгезию наноалмазов на поверхности трения. Таким образом обеспечивается восстановление и модификация поверхности трения. Открытым остается вопрос долговечности восстанавливающего покрытия.

Еще одним успехом нанотрибологии является создание методик и аппаратных средств измерения физических свойств наноматериалов [22, 23], что крайне необходимо для построения математических моделей, так как ряд необходимых для моделирования параметров механических свойств материалов может быть определен только экспериментально.

Выводы по разделу. Обеспечение условия «прилипания» смазочного материала к поверхности трения в результате физической или химической адсорбции зависит от топологических, физических и химических свойств смазочных и смазываемых материалов. Тем не менее, перспектива применения в качестве смазочного материала твердых наночастиц с точки зрения выполнения условия «прилипания» является вполне реальной. Малый размер наноматериалов обеспечивает заполнение микронеровностей поверхности, а преимущественно высокая поверхностная энергия обеспечивает адсорбцию. Кроме того, слой полимеров может выступать как промежуточный связующий элемент между поверхностью трения и наносмазкой. Фактически достигнутый в нанотрибологии результат снижения граничного трения за счет различных наноматериалов заключается в создании на трущейся поверхности сплошного или фрагментарного покрытия, защищающего поверхность трения, снижающего площадь контакта и коэффициент трения скольжения. Однако на сегодняшний день нет четких обоснованных сведений о положительном влиянии наноматериалов на режим жидкостного трения. Основная сложность гидродинамической смазки твердыми наночастицами скорее не в создании и удержании монослоя на поверхности трения, а в создании условий слоистого течения такого смазочного материала между трущимися поверхностями.

Перспектива третья. Комбинация различных механизмов внутреннего трения способна обеспечить эффект синергии и повысить энергоэффективность гидродинамической смазки.

Итак, принимая как данность две предыдущие перспективы, а именно, что наноразмерные материалы могут обладать заданными физическими свойствами, легко заполнять микронеровности шероховатых поверхностей трения и создавать на них адгезионный слой, рассмотрим некоторые теоретические вопросы «течения» наноконтактной смазки. Вопросы сводятся к двум следующим: является ли принципиально возможным применение твердых наноразмерных материалов в качестве смазочных вместо жидкостей, и могут ли новые гидродинамические смазочные материалы быть энергоэффективными, то есть обладать низким коэффициентом отношения силы трения к гидродинамической подъемной силе? Если на первый вопрос положительный ответ можно дать сразу, так как условием «течения» является наличие вязких свойств, то ответ на второй вопрос следует искать посредством математического моделирования процессов «течения».

Вплоть до конца 80-х годов прошлого столетия исследования в области реодинамической теории смазки [24] не показали наличия положительного опыта повышения энергоэффективности гидродинамической смазки за счет уругопластических и (или) вязкоупругих свойств смазочного материала, а наоборот свидетельствовали об увеличении коэффициента отношения силы трения к подъемной силе. Однако эти исследования выполнялись для существующих на тот момент видов материалов и известных математических моделей неньютоновских сред, не учитывалось возможность сочетания в смазочном материале текучих и сыпучих свойств – так называемого гибридного трения [25]. В конце 90-х годов прошлого столетия, во многом благодаря развитию вычислительной техники, возобновился интерес к исследованию новых свойств смазочных материалов, широкое распространение получили методы молекулярной динамики, позволяющие моделировать движение частиц смазки не как сплошной среды, а как большого количества жестких или деформируемых частиц [26–29], или молекул с, как правило, потенциальным взаимодействием [30, 31].

Рассмотрим далее два взаимодополняющих подхода к моделированию движения: континуальный подход, основанный на методах механики сплошных сред и дискретный подход, основанный на методах молекулярной динамики.

Континуальный подход является основным в классической гидродинамике, он позволяет выполнять постановку задачи в виде сравнительно небольшого количества уравнений, которые можно проанализировать методами теории подобия и анализа размерностей, иногда решить их аналитически [1]. Основная проблема применения континуального подхода к моделированию смазочных сред частично или полностью состоящих из наноразмерных твердых частиц заключается в сложности описания реологических свойств таких сред. Так реологические свойства изотермического течения многих жидкостей, называемых ньютонов-

скими (вода, минеральные масла и др.) определяются одним числом – коэффициентом динамической вязкости [1]. Течение сред, называемых неньютоновскими (некоторые консистентные и пластичные смазочные материалы, горячий деформируемый металл и др.) определяются коэффициентом динамической вязкости, который уже является функцией скорости сдвиговой деформации [1, 32]. Течение сыпучих или гранулированных сред описывается коэффициентом динамической вязкости как функцией скоростей сдвиговой деформации и гидростатического давления, на которую дополнительно может накладываться ряд условий и ограничений [33, 34], в некоторых случаях реологические свойства таких течений описываются не одним коэффициентом, а тензором второго и более порядка [35].

В работе [36] сравнением простейшего течения ньютоновского, неньютоновского и гибридного смазочного материала между параллельными пластинами, показана принципиальная возможность возникновения дополнительной несущей силы в результате течения смазочного материала с гибридным внутренним трением. По аналогии с классическим понятием материала гидродинамической смазки (см. введение) авторами [36] предлагается понятие материала гибридной гидродинамической смазки – материала, обладающего свойством гибридного внутреннего трения, одновременно линейно или не линейно зависящего от скорости сдвиговой деформации (свойство вязкости) и от давления (свойство сыпучести), способного при определенных условиях за счет этого свойства внутреннего трения развивать достаточную для разделения трущихся поверхностей несущую силу. Отличием гибридной гидродинамической смазки от классической гидродинамической смазки, в том числе и смазки неньютоновскими жидкостями является проявление одновременно свойств жидкости и твердых тел на макроскопическом уровне. На микроскопическом уровне такая гибридизация свойств может быть проявлена, например, за счет сочетания в твердом гранулированном смазочном материале движения с проскальзыванием и качения сферических частиц. Определение конкретной функциональной зависимости коэффициента динамической вязкости, обеспечивающей эффект повышения энергоэффективности гидродинамической смазки является важной нерешенной задачей.

Дискретный подход моделирования «течения» наноконпонентной гидродинамической смазки гипотетически позволяет определить оптимальные параметры смазочного материала на уровне свойств отдельных его частиц или атомов, таких как размер (разброс размеров), деформационные и адгезионные свойства, силы межатомного и межмолекулярного взаимодействия и другие. Большой интерес представляет совмещение механизмов скольжения и качения фуллереноподобных частиц и влияние этих механизмов движения на силу трения и несущую способность гидродинамического смазочного слоя. В работе [37] упомянутых ранее израильских ученых представлены результаты экспериментального исследования механизма скольжения/качения фуллереноподобных частиц в составе сухого и жидкого смазочного материала в процессе контактного трения между гладкой и пористой поверхностями. Наночастицы изначально сконцентрированы в порах, образуя достаточно гладкую поверхность трения, а в процессе трения они переходят в смазочный слой. Показано для сухой смазки, что благодаря режиму скольжения/качения наночастиц, коэффициент трения сохраняет стабильно низкое значение (около 0,05) независимо от усилия прижатия поверхностей трения вплоть до некоторого критического усилия, при котором происходит расслоение наночастиц и резкий рост коэффициента трения. Для жидкой смазки коэффициент трения оказался на порядок меньше (около 0,006) к тому же сохранил свое стабильно малое значение даже при больших скоростях и нагрузках, что свидетельствует о сохранении наночастицами их целостной сферической формы. К сожалению, речь ведется о совокупном механизме трения качения и скольжения без уточнения и количественного разделения. В более поздней работе тех же авторов [38 37] рассмотрена молекулярная математическая модель трения качения монослоя фуллеренов, движущихся между плоскими поверхностями трения. Поверхности трения покрыты неподвижным слоем фуллеренов, имитируя тем самым условие «прилипания». Взаимодействие молекул фуллерена описывается потенциалом Леннарда–Джонса [30, 38 29, 37], сопротивление качению частиц возникает при взаимном перемещении атомов соседних молекул фуллеренов. В работе показано, что существует некая оптимальная концентрация молекул фуллеренов, выше которой происходит «заклинивание молекул подобное заклинивания шестеренок, поворачивающихся в одну сторону» [38]. Тем самым авторы фактически опровергают идею механизма энергоэффективного трения качения в фуллереновой

гидродинамической смазки. Однако существуют следующие пути снижения эффекта заклинивания молекул [38]: снижение концентрации наночастиц, путем, например, введения промежуточной среды; увеличение температуры смазки, что приведет к снижению сил межмолекулярного взаимодействия; ослабление сил притяжения молекул посредством создания отталкивающей силы, например, электростатического характера. В работе [39] рассмотрена похожая модель движения монослоя экзоздральных молекул, именуемых «нано-луковицами» (nano-onions) между двумя алмазными подложками. Авторы привели некоторые количественные характеристики перехода трения из режима качения в режим скольжения под действием увеличивающейся силы прижатия пластин и, как следствия увеличения в результате деформации нано-луковиц сил поверхностного сцепления с подложками. Обнаружено резкое повышение коэффициента трения с 0,024 до 0,151 при переходе от трения качения к трению скольжения.

Авторы данной статьи исследовали по аналогии с работой [38] двухмерную модель микроскопического подшипника на основе фуллереноподобных молекул, с межатомным силовым взаимодействием внутри молекул и между атомами соседних молекул, рассчитанным с использованием потенциала Леннарда–Джонса. В результате серии численных экспериментов получено, что величина силы трения на поверхности шипа микроскопического подшипника в большей мере зависит от теплопроводности стенок подшипника и в меньшей мере от характера движения молекул фуллеренов (качения и/или скольжения). Однако, полученные результаты для микроскопического подшипника не могут быть распространены на подшипники реальных размеров, а расчетная модель подшипника реальных размеров требует значительных вычислительных мощностей и специального программного обеспечения [40].

Выводы по разделу. Обеспечение повышения энергоэффективности гидродинамической смазки возможно за счет применения материалов смазки с гибридным внутренним трением, то есть материалов, совмещающих свойства жидкостей и твердых сред на макроскопическом уровне. На микроскопическом уровне такая гибридизация может быть обеспечена совмещением механизмов трения качения и скольжения движения наночастиц смазочного материала. Однако вопрос конкретных значений комплекса физических свойств такого материала на макроскопическом и микроскопическом уровне остается открытым.

Развитие нанотехнологий инициирует открытие новых материалов и новых свойств известных материалов, что находит применение практически во всех отраслях человеческой деятельности. Исследования в области гидродинамической теории смазки вплотную подошли к вопросам перспектив создания новых видов энергоэффективных гидродинамических смазочных материалов на основе нанотехнологий. Авторы данной статьи предполагают, что новые гидродинамические смазочные материалы должны обладать гибридными свойствами внутреннего трения, что на макроскопическом уровне означает совмещение в новом материале свойств жидкостей и твердых сред. В качестве основы материалов новых видов смазок возможно использование фуллеренов или фуллереноподобных частиц с заданным комплексом механических и других свойств, обеспечивающих на микроскопическом уровне эффект синергии с выходом на новый уровень энергоэффективности.

Работа подготовлена в рамках выполнения проекта №363 базовой части государственного задания ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК» «Фундаментальные принципы и теоретические основы наносмазки» (2014–2016 гг.).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Савин, Л.А. Моделирование роторных систем с опорами жидкостного трения / Л.А. Савин, О.Н. Соломин. – М.: Машиностроение–1, 2006. – 444 с.
2. Мышкин, Н.К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – М.: Физматлит, 2007. – 368 с.
3. Thermal and Tribological Properties of Fullerene–Containing Composite Systems. P. 2. Formation of Tribo-Polymer Films during Boundary Sliding Friction in the Presence of Fullerene C60 / B.M. Ginzburg, O.F. Kireenko, A.A. Shepelevskii, L.A. Shibaev, D.G. Tochilnikov, A.M. Leksovskii // J. Macromol. Sci., B, Physics. – 2005. – № 44(1). – pp. 93–115.
4. Куликов, Л.М. Фуллереноподобные наночастицы и нанотрубки дихалькогенидов d–переходных металлов: нанотехнологии, проблемы и перспективы / Л.М. Куликов // Наноструктурированное материаловедение. – № 2. – 2009. – С. 54–68.
5. Корнаев, А.В. Роль нанотехнологий в развитии гидродинамической теории смазки / А.В. Корнаев, Л.А. Савин, Ю.С. Степанов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 6. – С. 69–74.

6. Караулова, Е.Н. Фуллерены: методы функциолизации и перспективы применения производных / Е.Н. Караулова, Е.И. Багрий // *Успехи химии*. – 1999. – № 68(11). – С. 979–999.
7. Трошин, П.А. Органическая химия фуллеренов: основные реакции, типы соединений фуллеренов и перспективы их практического использования / П.А. Трошин, Р.Н. Любовская // *Успехи химии*. – 2008. – № 77(4). – С. 324–371.
8. Коваленко, В.И. Закономерности молекулярного строения стабильных фуллеренов / В.И. Коваленко, В.С. Хаматгалимов // *Успехи химии*. – 2006. – № 75(11). – С. 1094–1103.
9. Fulleranes: the hydrogenated fullerenes. Volume editors F. Cataldo, S. Iglesias–Groth. Springer Science+Business Media: London, New York, 2010. – 293 p.
10. ООО «Фторполимерные технологии», г. Санкт–Петербург. Официальный сайт. URL: <http://www.tomflon.ru/about>. – Дата обращения: 01.11.2013.
11. Методы синтеза, строение и реакционная способность полигалоген [60] фуллеренов / А.А. Горюнков, Н.С. Овчинникова, И.В. Трушков, М.А. Юровская // *Успехи химии*. – 2007. – № 76(4). – С. 323–347.
12. Болталиа, О.В. Прямое фторирование фуллеренов / О.В. Болталиа, Н.А. Галева // *Успехи химии*. – 2000. – № 69(7). – С. 661–674.
13. Вуль, А.Я. Исследования нанокремнезема в России: от фуллеренов к нанотрубкам и нанодiamondам / А.Я. Вуль, В.И. Соколов // *Российские нанотехнологии*. – 2007. – Том 2. – № 3–4. – С. 17–36.
14. Chichvarin, A.V. Modification of butyl rubbers and its galoid analogues by carbon fullerenes / A.V. Chichvarin, T.I. Igumenova, L.N Kraht // *European journal of natural hystory*. 2013. – № 2. – pp. 23–25.
15. Fullerene polymers. Synthesis, properties and applications. Edited by N. Martin, F. Ciacalone. Weinheim: WILEY–VCH Verlag GmbH&Co. KGaA, 2009. – 331 p.
16. Fullerene–Based materials. Structure and properties. Volume editor K. Prassides. Springer–Verlag Berlin Heidelberg, 2004. – 280 p.
17. «ApNano materials» Inc., Yavne, Israel. Официальный сайт. URL: www.apnano.com (дата обращения 01.11.2013).
18. Технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза наноразмерных порошков тугоплавких соединений / И.П. Боровинская, Т.И. Игнатьева, В.И. Вершинников, О.М. Емельянова, В.Н. Семенова // *Российские нанотехнологии*. – 2007. – Том 2. – № 3–4. – С. 114–119.
19. Hsu, S.M. Nano–lubrication: concept and design / S.M. Hsu // *Tribology International*. – 2004. – № 37. – pp. 537–545.
20. Georges, J–M. Nanorheology of poly isoprene solutions confined between two solid surfaces. *Tribology for energy conservation* / J–M. Georges [et. al]. D.Dowson et.al. (Editors). Elsevier Science B.V. – 1998. – pp. 51–62.
21. Куликов, Л.М. Фуллереноподобные наночастицы и нанотрубки дихалькогенидов d–переходных металлов: нанотехнологии, проблемы и перспективы // *Наноструктурное материаловедение*. – 2009. – № 2. – С. 54–68.
22. Nanotribology and nanomechanics. An introduction. Volume editor B. Bhushan. 2nd edition. Springer–Verlag Berlin Heidelberg, 2008. – 1530 p.
23. Дедков, Г.В. Нанотрибология: экспериментальные факты и теоретические модели / Г.В. Дедков // *Успехи физических наук*. – 2000. – Т. 170. – № 6. – С. 585–618.
24. Усков, М.К., Максимов В.А. Гидродинамическая теория смазки: этапы развития, современное состояние, перспективы / М.К. Усков, В.А. Максимов. – М.: Наука, 1985. – 316 с.
25. Coussot, P. Rheometry of pastes, suspensions, and granular materials : applications in industry and environment / P. Coussot. Springer Verlag, 2010. – 345 p.
26. Гулд, Х. Компьютерное моделирование в физике / Х. Гулд, Я. Тобочник. – Ч. 2. М.: Мир, 1990. – 400 с.
27. Muller, D. Techniques informatiques efficaces pour la simulation de milieu granulaires par des methods d’elenents distinct / D. Muller. – Lausanne: EPFL, 1996. – 204 p.
28. P.D. Hede Hydrodynamic modeling and granular dynamics. The free e–books and textbooks [Электронный ресурс]. URL: <http://bookboon.com/en/textbooks/chemistry–chemical–engineering/hydrodynamic–modelling> (Дата обращения 01.11.2013).
29. Challenges in Granular physics. Edited by T. Halsey, A. Mehta. Copyright by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2002. – 257 p.
30. Campbell, E. Fullerene collision reactions / E.Campbell. Kluwer academic publishers, 2004. – 217 p.
31. Braun, O.M. Nanotribology: microscopic mechanism of friction / O.M. Braun, A.G. Naumovets // *Surface Science Reports*. – 2006. – № 60. – pp. 79–158.
32. Слезкин, Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости / Н.А. Слезкин. – М.: Государственное издательство технико–теоретической литературы, 1955. – 521 с.
33. Ревуженко, А.Ф. Механика упруго–пластических сред и нестандартный анализ / А.Ф. Ревуженко. – Новосибирск: Изд–во Новосибирского университета, 2000. – 428 с.
34. Садовская, О.В. Математическое моделирование в задачах механики сыпучих сред / О.В. Садовская, В.М. Садовский. – М.: Физматлит, 2008. – 368 с.
35. Локтионова, О.Г. Численное моделирование динамики вибрационного процесса разделения сыпучих смесей / О.Г. Локтионова // *Известия ТулГУ. Серия. Технологическая системотехника*. – 2006. – Вып. 8. – С. 190–195.
36. Корнаев, А.В. Фундаментальные вопросы проектирования свойств гидродинамической гибридной смазки / А.В. Корнаев, Л.А. Савин, С.А. Герасимов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2011. – №1(285). – С. 46–51.
37. Rapoport, L. Mechanism of friction of fullerenes // *Industrial lubrication and tribology* / L. Rapoport, V. Leshchinsky [et al]. – Volume 54 (№ 4). – 2002. – pp. 171–176.

38. Persson, B.N.G. Sliding friction. Surf. Sci. Rep. 33, 83 / B.N.G. Persson. Springer-Verlag, Berlin, 1998. – 105 p.
39. Bucholz, E.W. Molecular dynamics investigation of the lubrication mechanism of carbon nano-onions / E.W. Bucholz, S.R. Phillpot, S.B. Sinnott // Computational materials science. – 2012. – № 54. – pp. 91–96.
40. Kornaeв, A. The application of molecular dynamics in fullerene-based journal bearing simulation / A. Kornaeв, L. Savin, M. Nozdriчkin // Lubricants. 2014. 2 (1). doi:10.3390/lubricants2010001 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mdpi.com/2075-4442/2/1/1>. – Дата обращения: 01.11.2014.

Савин Леонид Алексеевич
«Госуниверситет – УНПК»
Д-р техн. наук, профессор,
зав. кафедрой «Мехатроника и
международный инжиниринг»
302020, г. Орел, Нагорское шоссе, 29
Тел. (4862) 41–98–85
E-mail: savin@ostu.ru

Степанов Юрий Сергеевич
«Госуниверситет – УНПК»
Д-р техн. наук, профессор,
директор НОЦ ОрелНано
302020, г. Орел, Нагорское шоссе, 29
Тел. 8(4862) 47–50–71
E-mail: yury057@yandex.ru

Корнаев Алексей Валерьевич
«Госуниверситет – УНПК»
Кандидат технических наук,
доцент кафедры «Мехатроника и
международный инжиниринг»
302020, г. Орел, Нагорское шоссе, 29
Тел. +7–953–478–15–91
E-mail: rusakor@inbox.ru

L.A. SAVIN, Yu.S. STEPANOV, A.V. KORNAEV

CHALLENGES OF ENGINEERING OF HYBRID HYDRODYNAMIC LUBRICANTS WITH NANOMATERIALS

This paper includes review of advances in science and engineering of fullerenes and fullerene-like materials production and research. The challenges of engineering of low friction hybrid hydrodynamic lubricants with nanomaterials are discussed.

Keywords: fullerene, nanoparticle, nanomaterial, viscosity, adhesion, adsorption, hydrodynamic theory of lubrication, hybrid friction, rheology, mechanics of continua, molecular dynamics.

BIBLIOGRAPHY

1. Savin, L.A. Modelirovaniye rotornykh sistem s oporami zhidkostnogo treniya / L.A. Savin, O.N. Solomin. – M.: Mashinostroyeniye–1, 2006. – 444 s.
2. Myshkin, N.K. Treniye, smazka, iznos. Fizicheskiye osnovy i tekhnicheskiye prilozheniya tribologii / N.K. Myshkin, M.I. Petrokovets. – M.: Fizmatlit, 2007. – 368 s.
3. Thermal and Tribological Properties of Fullerene-Containing Composite Systems. P. 2. Formation of Tribo-Polymer Films during Boundary Sliding Friction in the Presence of Fullerene C60 / B.M. Ginzburg, O.F. Kireenko, A.A. Shepelevskii, L.A. Shibaev, D.G. Tochilnikov, A.M. Leksovskii // J. Macromol. Sci., B, Physics. – 2005. – № 44(1). – pp. 93–115.
4. Kulikov, L.M. Fullerenopodobnyye nanochastitsy i nanotrubki dikhal'kogenidov d–perekhodnykh metallov: nanotekhnologii, problemy i perspektivy / L.M. Kulikov // Nanostrukturirovannoye materialovedeniye. – № 2. – 2009. – S. 54–68.
5. Kornayev, A.V. Rol' nanotekhnologiy v razvitiy gidrodinamicheskoy teorii smazki / A.V. Kornayev, L.A. Savin, Yu.S. Stepanov // Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2013. – № 6. – S. 69–74.
6. Karaulova, Ye.N. Fullereny: metody funktsionalizatsii i perspektivy primeneniya proizvodnykh / Ye.N. Karaulova, Ye.I. Bagriy // Uspekhi khimii. – 1999. – № 68(11). – S. 979–999.
7. Troshin, P.A. Organicheskaya khimiya fullerenov: osnovnyye reaksii, tipy soyedineniy fullerenov i perspektivy ikh prakticheskogo ispol'zovaniya / P.A. Troshin, R.N. Lyubovskaya // Uspekhi khimii. – 2008. – № 77(4). – S. 324–371.
8. Kovalenko, V.I. Zakonomernosti molekulyarnogo stroeniya stabil'nykh fullerenov / V.I. Kovalenko, V.S. Khamatgalimov // Uspekhi khimii. – 2006. – № 75(11). – S. 1094–1103.
9. Fullerenes: the hydrogenated fullerenes. Volume editors F. Cataldo, S. Iglesias-Groth. Springer Science+Business Media: London, New York, 2010. – 293 p.
10. ООО «Ftorpolimernyye tekhnologii», г. Санкт-Петербург. Ofitsial'nyy sayt. URL: <http://www.tomflon.ru/about>. – Data obrashcheniya: 01.11.2013.
11. Metody sinteza, stroeniye i reaktivnaya sposobnost' poligalogen [60] fullerenov / A.A. Goryunkov, N.S. Ovchinnikova, I.V. Trushkov, M.A. Yurovskaya // Uspekhi khimii. – 2007. – № 76(4). – S. 323–347.
12. Boltalina, O.V. Pryamoye ftorirovaniye fullerenov / O.V. Boltalina, N.A. Galeva // Uspekhi khimii. – 2000. – № 69(7). – S. 661–674.
13. Vul', A.Ya. Issledovaniya nanougleroda v Rossii: ot fullerenov k nanotrubkam i nanoalmazam / A.Ya. Vul', V.I. Sokolov // Rossiyskiye nanotekhnologii. – 2007. – Tom 2. – № 3–4. – S. 17–36.
14. Chichvarin, A.V. Modification of butyl rubbers and its galoid analogues by carbon fullerenes / A.V. Chichvarin, T.I. Igumenova, L.N. Kraht // European journal of natural history. 2013. – № 2. – pp. 23–25.
15. Fullerene polymers. Synthesis, properties and applications. Edited by N. Martin, F. Ciacalone. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA, 2009. – 331 p.
16. Fullerene-Based materials. Structure and properties. Volume editor K. Prassides. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. – 280 p.

17. «ApNano materials» Inc., Yavne, Israel. Ofitsial'nyy sayt. URL: www.apnano.com (data obrashcheniya 01.11.2013).
18. Tekhnologiya samorasprostranyayushchegosya vysokotemperaturnogo sinteza nanorazmernykh poroshkov tugoplavkikh soyedineniy / I.P. Borovinskaya, T.I. Ignat'yeva, V.I. Vershinnikov, O.M. Yemel'yanova, V.N. Semenova // Rossiyskiye nanotekhnologii. – 2007. – Tom 2. – № 3–4. – S. 114–119.
19. Hsu, S.M. Nano-lubrication: concept and design / S.M. Hsu // Tribology International. – 2004. – № 37. – pp. 537–545.
20. Georges, J–M. Nanorheology of poly isoprene solutions confined between two solid surfaces. Tribology for energy conservation / J–M. Georges [et. al]. D.Dowson et.al. (Editors). Elsevier Science B.V. – 1998. – pp. 51–62.
21. Kulikov, L.M. Fullerenopodobnyye nanochastitsy i nanotrubki dikhal'kogenidov d–perekhodnykh metallov: nanotekhnologii, problemy i perspektivy // Nanostrukturnoye materialovedeniye. – 2009. – № 2. – S. 54–68.
22. Nanotribology and nanomechanics. An introduction. Volume editor B. Bhushan. 2nd edition. Springer–Verlag Berlin Heidelberg, 2008. – 1530 p.
23. Dedkov, G.V. Nanotribologiya: eksperimental'nyye fakty i teoreticheskiye modeli / G.V. Dedkov // Uspekhi fizicheskikh nauk. – 2000. – T. 170. – № 6. – S. 585–618.
24. Uskov, M.K., Maksimov V.A. Gidrodinamicheskaya teoriya smazki: etapy razvitiya, sovremennoye sostoyaniye, perspektivy / M.K. Uskov, V.A. Maksimov. – M.: Nauka, 1985. – 316 s.
25. Coussot, P. Rheometry of pastes, suspensions, and granular materials : applications in industry and environment / P. Coussot. Springer Verlag, 2010. – 345 p.
26. Guld, KH. Komp'yuternoye modelirovaniye v fizike/KH. Guld, YA. Tobochnik. – CH. 2. M.: Mir, 1990. – 400 s.
27. Muller, D. Techniques informatiques efficaces pour la simulation de milieu granulaires par des methods d'elenents distinct / D. Muller. – Lausanne: EPFL, 1996. – 204 p.
28. P.D. Hede Hydrodynamic modeling and granular dynamics. The free e–books and textbooks [Elektronnyy resurs]. URL: <http://bookboon.com/en/textbooks/chemistry–chemical–engineering/hydrodynamic–modelling> (Data obrashcheniya 01.11.2013).
29. Challenges in Granular physics. Edited by T. Halsey, A. Mehta. Copyright by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2002. – 257 p.
30. Campbell, E. Fullerene collision reactions / E.Campbell. Kluwer academic publishers, 2004. – 217 p.
31. Braun, O.M. Nanotribology: microscopic mechanism of friction / O.M. Braun, A.G. Naumovets // Surface Science Reports. – 2006. – № 60. – pp. 79–158.
32. Slezkin, N.A. Dinamika vyzkoy neszhimayemoy zhidkosti / N.A. Slezkin. – M.: Gosudarstvennoye izdatel'stvo tekhniko–teoreticheskoy literatury, 1955. – 521 s.
33. Revuzhenko, A.F. Mekhanika uprugo–plasticheskikh sred i nestandartnyy analiz / A.F. Revuzhenko. – Novosibirsk: Izd–vo Novosibirskogo universiteta, 2000. – 428 s.
34. Sadovskaya, O.V. Matematicheskoye modelirovaniye v zadachakh mekhaniki sypuchikh sred / O.V. Sadovskaya, V.M. Sadovskiy. – M.: Fizmatlit, 2008. – 368 s.
35. Loktionova, O.G. Chislennoye modelirovaniye dinamiki vibratsionnogo protsessa razdeleniya sypuchikh smesey / O.G. Loktionova // Izvestiya TulGU. Seriya. Tekhnologicheskaya sistemotekhnika. – 2006. – Vyp. 8. – S. 190–195.
36. Kornayev, A.V. Fundamental'nyye voprosy proyektirovaniya svoystv gidrodinamicheskoy gibridnoy smazki / A.V. Kornayev, L.A. Savin, S.A. Gerasimov // Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2011. – №1(285). – S. 46–51.
37. Rapoport, L. Mechanism of friction of fullerenes // Industrial lubrication and tribology / L. Rapoport, V. Leshchinsky [et al]. – Volume 54 (№ 4). – 2002. – pr. 171–176.
38. Persson, B.N.G. Sliding friction. Surf. Sci. Rep. 33, 83 / B.N.G. Persson. Springer–Verlag, Berlin, 1998. – 105 p.
39. Bucholz, E.W. Molecular dynamics investigation of the lubrication mechanism of carbon nano–onions / E.W. Bucholz, S.R. Phillpot, S.B. Sinnott // Computational materials science. – 2012. – № 54. – pp. 91–96.
40. Kornayev, A. The application of molecular dynamics in fullerene–based journal bearing simulation / A. Kornayev, L. Savin, M. Nozdrihkin // Lubricants. 2014. 2 (1). doi:10.3390/lubricants2010001 [Elektronnyy resurs]. URL: <http://www.mdpi.com/2075–4442/2/1/1>. – Data obrashcheniya: 01.11.2014.

Savin Leonid Alekseevich
State University – ESPC
Doctor of science, professor, head of department Mechatronics and international engineering
302020, Oryol, Naugorskoye shosse, 29
Phone 8(4862) 41–98–85
E–mail: savin@ostu

Stepanov Yuri Sergeevich
State University – ESPC
Doctor of science, professor
Director of the scientific and educational center OrelNano
302020, Oryol, Naugorskoye shosse, 29
Phone 8(4862) 47–50–71
E–mail: stepanov@ostu

Kornaev Alexey Valerievich
State University – ESPC
Candidate of science, docent in department of Mechatronics and international engineering department
302020, Oryol, Naugorskoye shosse, 29
Phone +7–953–478–15–91
E–mail: rusakor@inbox.ru

РАЦИОНАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ МУФТЫ С ВИНТОВЫМ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ МЕХАНИЗМОМ, ДЕМПФИРУЮЩЕЙ ВНЕЗАПНО ПРИЛОЖЕННЫЕ НАГРУЗКИ

Проведено исследование динамики работы гидромеханической муфты с винтовым исполнительным механизмом в режиме демпфирования внезапно приложенной нагрузки. Установлено влияние параметров дросселя на коэффициент динамичности муфты. Показано, что динамические нагрузки, действующие на привод при внезапно приложенной нагрузке значительно снижаются, если использовать предлагаемую муфту с подобранными рациональными параметрами.

Ключевые слова: гидромеханическая муфта, винтовой исполнительный механизм, динамические нагрузки, защита привода.

В некоторых тяжело нагруженных машинах горного и вспомогательного металлургического производства, таких как окомкователи, дробилки, печи обжига извести и прочие, часто встречаются внезапно приложенные нагрузки ударного характера, что негативно сказывается на работе приводов таких машин. Такие нагрузки возникают вследствие того, что большие вращающиеся массы иногда «обгоняют» приводной вал и двигатель на небольшом участке работает фактически вхолостую, а потом на привод резко начинает действовать нагрузка со стороны технологической машины.

Привод тяжело нагруженного механизма предложено защищать гидромеханической муфтой с передачей момента зацеплением, имеющей ряд преимуществ [1]. В исследуемой гидромеханической муфте с винтовым исполнительным механизмом (рисунок 1) от привода на ведущую полумуфту 2 передаётся движущий момент M_d . Ведомая полумуфта 1 воспринимает приведённый момент сопротивления M_n со стороны рабочего механизма. При возрастании (снижении) момента M_n , полумуфты 1 и 2, а вместе с ними корпус 4 и шток 3 гидроцилиндра относительно проворачиваются. При этом корпус 4 гидроцилиндра перемещается по несамотормозящейся резьбе 12 и шлицам 5 влево (рисунок 1), и часть рабочей жидкости перетекает в гидродемпфер 7 до тех пор, пока не установится равновесное состояние. При этом происходит упругое демпфирование колебаний.

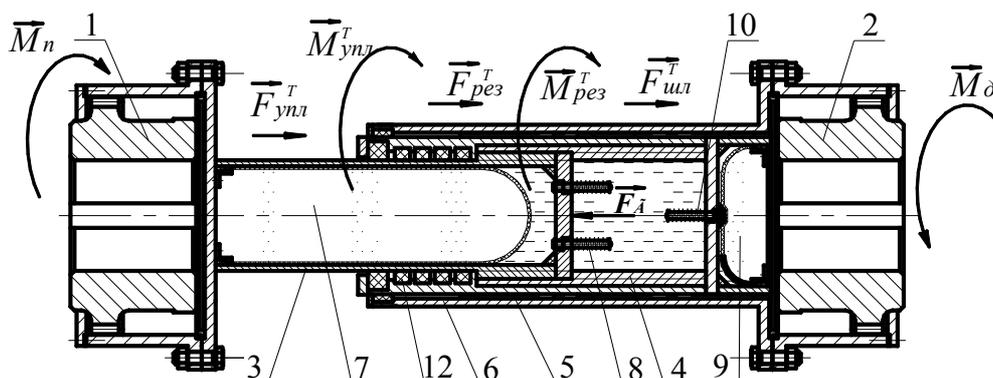


Рисунок 1 – Расчётная схема муфты

Если момент на муфте превышает допустимый, то корпус гидроцилиндра 4 смещается в левое (рисунок 1) положение и перемещает золотники 8 и 10. При этом гидродемпфер 7 отсекается от полости гидроцилиндра, а гидроаккумулятор 9 (рабочее давление в котором в этот момент значительно ниже, чем в гидродемпфере) соединяется с полостью гидроцилиндра, и остатки рабочей жидкости перетекают туда.

Шлицы 5 на корпусе гидроцилиндра выходят из зацепления со шлицами на втулке 6, что обеспечивает размыкание полумуфт.

После отключения привода, корпус гидроцилиндра 4 смещается вправо под действием давления жидкости в гидроаккумуляторе 9, золотники 8 и 10 занимают исходное положение, жидкость из гидродемпфера перетекает в полость гидроцилиндра, шлицы винта на полумуфте 1 входят в зацепление со шлицами на втулке полумуфты 2, и муфта самовосстанавливается.

Для повышения эффективности защиты привода от внезапно приложенной нагрузки предлагаемой муфтой необходимо провести исследование динамики работы муфты при внезапно приложенной нагрузке и определить рациональные начальные параметры работы гидросистемы.

Движение элементов муфты описывается с использованием вариационных принципов на основе уравнений Лагранжа второго рода [3]:

$$\begin{cases} (J_2 + J_3) \cdot \ddot{\varphi}_3 + J_2 \cdot \ddot{\varphi}_{отн} = M_D - M_n \\ J_2 \cdot \ddot{\varphi}_3 + J_2 \cdot \ddot{\varphi}_{отн} = M_D - \frac{(F_\Gamma \pm F_{ул}^T \pm F_{рез}^T \pm F_{жс}^C) \cdot r_{рез}}{tg\alpha} \mp M_{упл}^T \end{cases} \quad (1)$$

где J_2 и J_3 – моменты инерции гайки и винта;

$\varphi_{отн}$ – относительное вращение винта в гайке;

φ_3 – вращение ведомой полумуфты с гайкой;

M_D – движущий момент;

M_n – момент сопротивления со стороны технологической машины (изменяется, моделируя нагрузку рабочей машины);

$M_{упл}^T, F_{рез}^T, F_{ул}^T$ – моменты и силы трения;

$F_\Gamma = F_{\Gamma 0} + c_m(\varphi_{отн}) \cdot \varphi_{отн} \cdot \frac{r_{рез}}{tg\alpha}$ – сила, действующая на шток гидроцилиндра [3];

$F_{\Gamma 0}$ – сила, начального давления в гидропневмомодемпфере;

$c_m(\varphi_{отн})$ – жесткость муфты;

$F_{жс}^C$ – сила сопротивления жидкости;

α – угол подъема винтовой линии резьбы;

$r_{рез}$ – средний радиус резьбы в паре винт–гайка.

Если сила, действующая на поршень в гидроцилиндре меньше $F_{\Gamma 0}$, то жесткость муфты определяется жесткостью кинематической цепи без учета упругости пневмогидроаккумулятора – c_{max} , а если больше, то жесткость муфты изменяется в зависимости от угла относительного закручивания:

$$c_{min}(\varphi_{отн}) = \frac{F_{\Gamma 0}}{\frac{V_0 \cdot tg\alpha}{r_{рез} \cdot S_\Gamma} - \varphi_{отн}} \quad (2)$$

где, V_0 – начальный объём газа в газовой камере гидропневмомодемпфера;

S_Γ – площадь поршня гидроцилиндра.

Момент инерции механизма приводим к ведомой полумуфте, момент инерции привода и шлицевой втулки приводим к ведущей полумуфте.

Момент от двигателя $M_{эд}$ определяется с помощью уравнений динамики работы электродвигателя [4]. Динамика работы привода описывается уравнением:

$$J_1 \ddot{\varphi}_1 = M_{эд} - c(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (3)$$

где J_1 – приведённый момент инерции элементов привода;

φ_1 – вращение вала двигателя;

φ_2 – вращение вала ведущей полумуфты с винтом;

$c(\varphi_1 - \varphi_2) = M_D$ – движущий момент со стороны привода на первую полумуфту.

Преобразуем систему уравнений (1), оставив второе уравнение в таком же виде, а первое представим в виде разности двух уравнений. С учётом уравнения (3) получили систему уравнений, описывающую работу упругой муфты с переменной жёсткостью:

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\varphi}_1 = M_{эд} - c(\varphi_1 - \varphi_2) \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 = c(\varphi_1 - \varphi_2) - (c_m(\varphi_2 - \varphi_3) + \mu(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) + \nu(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3)^2) \cdot \frac{r_{рез}}{tg\alpha} \mp M_{упл}^T \mp \frac{(F_{рез}^T + F_{ул}^T) \cdot r_{рез}}{tg\alpha} \\ J_3 \ddot{\varphi}_3 = -M_n + (c_m(\varphi_2 - \varphi_3) + \mu(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) + \nu(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3)^2) \cdot \frac{r_{рез}}{tg\alpha} \pm M_{упл}^T \pm \frac{(F_{рез}^T + F_{ул}^T) \cdot r_{рез}}{tg\alpha} \end{cases} \quad (4)$$

Схема муфты, описываемая полученной системой уравнений (4), может быть представлена в виде трёхмассовой системы с демпфером и амортизатором.

Подставив в уравнения системы (4) силы и моменты трения, упругости и сопротивления жидкости и преобразовав эти уравнения, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\varphi}_1 = i_{ред}^2 \cdot k_{эд} \cdot \left(\frac{\omega_0}{i_{ред}} - \dot{\varphi}_1 \right) - c(\varphi_1 - \varphi_2) \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 = c(\varphi_1 - \varphi_2) + (M_{Г0} + c_{min}(\varphi_2 - \varphi_3 - \alpha_0) + M_{жид}^T) \times (-1 - f_{\Sigma}^T \times \text{sign}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3)), \\ J_3 \ddot{\varphi}_3 = -M_n + (M_{Г0} + c_{min}(\varphi_2 - \varphi_3 - \alpha_0) + M_{жид}^T) \times (1 + f_{\Sigma}^T \times \text{sign}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3)) \end{cases} \quad (5)$$

где $c_{min}(\varphi_m) = \frac{M_{Г0} \cdot S_{Г}}{V_0 - S_{Г}} \cdot \frac{r_{pez}}{tg\gamma}$ – жесткость муфты на втором этапе;

$f_{\Sigma}^T = f_{pez}^T \cdot tg\gamma + f_{ynl}^T + \left(1 \pm \left(\frac{f_{pez}^T}{\sin \gamma} + f_{ynl}^T \right) \right) \frac{r_{pez}}{r_{шл} tg \gamma} \cdot f_{шл}^T$ – суммарный коэффициент трения.

Исходя из предложенной конструкции, муфта с рациональными параметрами [5] должна быть предварительно напряженной, момент предварительного напряжения $M_{Г}$ должен быть равен моменту нагрузки M_n , параметры демпфера необходимо определить при исследовании переходного процесса на основании решения уравнений движения.

Так как муфта является предварительно напряженной, то при моменте упругости в муфте $M_y = c_m(\varphi_2 - \varphi_3) \leq M_{Г0}$ система (5) имеет вид:

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\varphi}_1 = i_{ред}^2 \cdot k_{эд} \cdot \left(\frac{\omega_0}{i_{ред}} - \dot{\varphi}_1 \right) - c(\varphi_1 - \varphi_2), \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 = c(\varphi_1 - \varphi_2) - c_{max}(\varphi_2 - \varphi_3), \\ J_3 \ddot{\varphi}_3 = -M_n + c_{max}(\varphi_2 - \varphi_3). \end{cases} \quad (6)$$

При моменте упругости в муфте $M_y = c_m(\varphi_2 - \varphi_3) > M_{Г0}$ система (5) имеет вид:

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\varphi}_1 = i_{ред}^2 \cdot k_{эд} \cdot \left(\frac{\omega_0}{i_{ред}} - \dot{\varphi}_1 \right) - c(\varphi_1 - \varphi_2) \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 = c(\varphi_1 - \varphi_2) + (M_{Г0} + c_{min}(\varphi_2 - \varphi_3 - \alpha_0) + M_{жид}^T) \times (-1 - f_{\Sigma}^T \times \text{sign}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3)) \\ J_3 \ddot{\varphi}_3 = -M_n + (M_{Г0} + c_{min}(\varphi_2 - \varphi_3 - \alpha_0) + M_{жид}^T) \times (1 + f_{\Sigma}^T \times \text{sign}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3)) \end{cases} \quad (7)$$

где $\alpha_0 = \frac{M_{Г0}}{c_{max}}$ – угол предварительного напряжения муфты;

$c_{min} = \frac{M_{Г0} \cdot S_{Г}}{V_0 - S_{Г}} \cdot \frac{r_{pez}}{tg\gamma}$ – жесткость муфты на втором этапе;

$f_{\Sigma}^T = f_{pez}^T \cdot tg\gamma + f_{ynl}^T + \left(1 \pm \left(\frac{f_{pez}^T}{\sin \gamma} + f_{ynl}^T \right) \right) \frac{r_{pez}}{r_{шл} tg \gamma} \cdot f_{шл}^T$ – суммарный коэффициент трения

в элементах муфты;

$k_{эд} = \frac{M_{nom}}{0,05\omega_{nom}}$ – коэффициент жесткости электродвигателя;

$M_{жид}^T = \mu(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) + \nu(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3)^2 \text{sign}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3)$ – момент жидкостного трения.

Уравнения движения (6,7) решаем при помощи метода Рунге–Кутты второго порядка с применением пакета Mathcad.

Начальные условия: $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = 0$, $\dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_2 = \dot{\varphi}_3 = 1$.

Рациональные параметры демпфера находим методом сканирования, увеличивая значения ламинарного демпфирования от 0 до 1×10^5 Нмс, и турбулентного 0 ... 1×10^5 Нмс².

В результате моделирования установлено, что наименьший коэффициент динамичности в приводе машины достигается при использовании турбулентного дросселя и демпфировании $\nu = 5 \times 10^4 \text{ Нмс}^2$ (рисунок 2, а), а момент переключения должен быть равен номинальному моменту (рисунок 2, б).

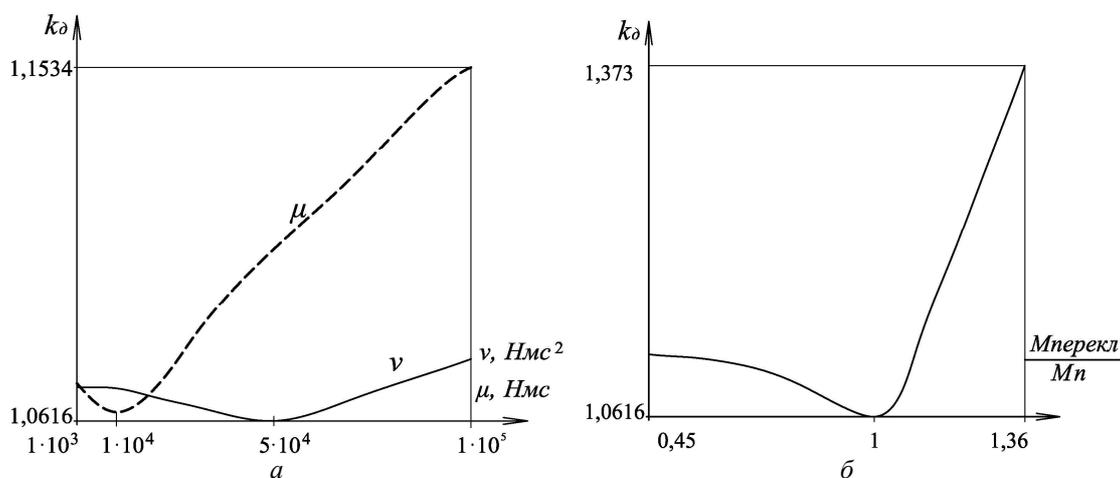


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента динамичности k_d муфты при внезапном приложении нагрузки от:
 а) сопротивления ламинарного (μ) и турбулентного (ν) дросселя;
 б) отношения момента переключения к моменту нагрузки ($M_{\text{перекл}}/M_n$)

На рисунке 3, а показаны графики изменения момента, передаваемого предложенной гидромеханической муфтой (сплошная линия); обычной упругой муфтой (пунктирная линия). На рисунке 3, б показаны графики изменения момента (M_M), при внезапном колебательном нагружении, соответствующим реальной нагрузке на привод печи (сплошная толстая линия) передаваемого предложенной муфтой; передаваемого обычной упругой муфтой (пунктирная линия). А также график изменения момента (M_M) при внезапном колебательном нагружении, соответствующим реальной нагрузке на привод вращающейся печи (сплошная тонкая линия):

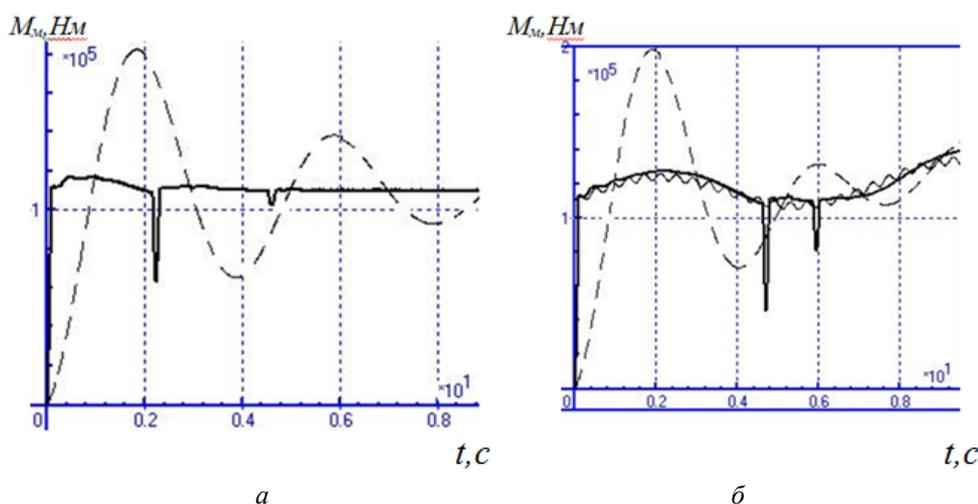


Рисунок 3 – График переходного процесса в муфте вращающейся печи:
 а – при внезапном приложении момента нагрузки, M_n ;
 б – при внезапном приложении момента нагрузки и колебательном нагружении

Из графиков рисунка 3 видно, что динамичность привода с предлагаемой муфтой с подобранными рациональными параметрами значительно меньше, чем динамичность привода с мягкой упругой муфтой (коэффициент динамичности снижается с 1,8 до 1,2). Следовательно, предлагаемая муфта с рассчитанными рациональными параметрами намного эффективней защищает привод в данном случае, чем обычная упругая муфта.

Научно-исследовательская работа проведена в рамках реализации программы «УМНИК» при поддержке Фонда развития малых предприятий в научно-технической сфере на 2013–2014 годы (Госконтракт № 5 от 31.03.2013 г.)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бородина, М.Б. Комплексные исследования динамики предохранительной муфты с гидромеханическим исполнительным механизмом / М.Б. Бородина, Л.А. Савин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2010. – № 4. – С. 20–27.
2. Пат. 2310778 Российская Федерация, МПК F16D25/06, F16D25/12, F16D31/00. Гидростатическая муфта / Бородина М.Б., Булавин К.А., Крахт В.Б., Сопилкин А.Г., Шевченко Б.А.; заявитель и патентообладатель ООО «СОПИН–Сервис». – № 2005131100/11; заявл. 10.10.2005; опубл. 20.11.2007. Бюл. № 32. – 9 с.
3. Бородина, М.Б. Динамика работы гидромеханической муфты с управляемым параметром / М.Б. Бородина, К.А. Булавин, Л.А. Савин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2013. – № 3–2. – С. 44–49.
4. Ковчин, С.А. Теория Электропривода: Учебник для вузов / С.А. Ковчин, Ю.А. Сабинин. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт–Петербургское отделение, 1994. – 496 с.
5. Понтрягин, Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. М, 1976. – 392 с.

Бородина Марина Борисовна
Кандидат технических наук, доцент
Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) ФГОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
Тел: +7 910–369–71–21
E-mail: borodina_marina@mail.ru

Булавин Константин Алексеевич
Кандидат технических наук, главный инженер
ЗАО «СУМ–БСК»
Тел: +7 915–569–94–04
E-mail: bulavin_k_a@mail.ru

Мироненко Станислав Викторович
Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»
Должность: аспирант
Телефон: +7 952–422–08–98
E-mail: mironenko.stanislaw@yandex.ru

M.B. BORODINA, K.A. BULAVIN, S.V. MIRONENKO

RATIONAL PARAMETERS OF THE HYDROMECHANICAL COUPLING WITH THE SCREW EXECUTIVE MECHANISM DAMPING SUDDENLY ENCLOSED LOADINGS

Research of dynamics of operation of the hydromechanical coupling with the screw executive mechanism in a mode of damping of suddenly enclosed loading is conducted. Influence of parameters of a throttle on coefficient of dynamism of the coupling is established. It is shown that the dynamic loadings operating on the drive at suddenly enclosed loading considerably decrease if to use this coupling with rational parameters.

Keywords: *hydromechanical coupling, screw executive mechanism, dynamic loadings, protection of the drive.*

BIBLIOGRAPHY

1. Borodina, M.B., Kompleksnyye issledovaniya dinamiki predokhranitel'noy mufty s gidromekhanicheskim ispolnitel'nyim mekhanizmom / M.B. Borodina, L.A. Savin // *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii*. – 2010. – №4. – S. 20–27
2. Pat. 2310778 Rossiyskaya Federatsiya, MPK F16D25/06, F16D25/12, F16D31/00. Gidrostaticheskaya mufta / Borodina M.B., Bulavin K.A., Krakht V.B., Sopilkin A.G., Shevchenko B.A.; zavavitel' i patentoobladatel' ООО "SOPIN–Servis". – № 2005131100/11; zavavl. 10.10.2005; opubl. 20.11.2007. Bvul. № 32. – 9 s.
3. Borodina, M.B. Dinamika raboty gidromekhanicheskoy mufty s upravlyavemym parametrom / M.B. Borodina, K.A. Bulavin, L.A. Savin // *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii*. – 2013. – № 3–2. – S. 44–49.
4. Kovchin, S.A. Teoriva Elektroprivoda: Uchebnik dlya vuzov / S.A. Kovchin, Yu.A. Sabinin. – SPb.: Energoatomizdat. Sankt–Peterburgskoye otdeleniye, 1994. – 496 s.
5. Pontrvagin, L.S. Matematicheskaya teoriva optimal'nykh protsessov / L.S. Pontryagin, V.G. Boltyanskiy, R.V. Gamkrelidze, Ye.F. Mishchenko. M., 1976. – 392 s.

Borodina Marina Borisovna
Starooskolsky institute of technology of A.A.Ugarov, branch of National research university "MISIS"
Post: Associate Professor
Tel: +7 910–369–71–21
E-mail: borodina_marina@mail.ru

Bulavin Konstantin Alekseevich
chief engineer,
Closed Joint Stock Company «SUM–BSK»
Tel: +7 915–569–94–04
E-mail: bulavin_k_a@mail.ru

Mironenko Stanislav Viktorovich
Starooskolsky institute of technology of A.A.Ugarov, branch of National research university "MISIS"
Post: graduate student
Tel: +7 952–422–08–98
E-mail: mironenko.stanislaw@yandex.ru

В.И. КОНОПЛЕВ, В.И. АНУФРИЕВ

БУНКЕР ДЛЯ КУСКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

В статье рассматривается конструкция бункера, позволяющая производить выгрузку кускового материала, склонного к заклиниванию в замкнутом объеме при нарушении условий гравитационного истечения при непрерывном потоке.

Ключевые слова: гравитация; бункер; привод; ступень; плита; желоб; синусоида; ролик-опора; диафрагма.

На предприятиях по производству щебня широко используются гравитационные устройства, в которых кусковые грузы движутся вниз по наклону под действием силы тяжести. Если груз массой m скользит с коэффициентом трения f по наклонной плоскости под углом β на длине l , разность уровней в начальной и конечной точках $h = l \sin \beta$ и скорость в этих точках v_n и v_k , то работа силы тяжести груза, затрачиваемая на работу трения и приращение кинетической энергии [1], равна:

$$mgh = mgfl \cos \beta + m(v_k^2 - v_n^2) / 2.$$

Если заданы скорости в начальной v_n и конечной v_k точках и разность уровней между ними h , то угол β , под которым должна быть расположена наклонная плоскость, находится из равенства:

$$\operatorname{tg} \beta = 2ghf / (2gh + v_n^2 - v_k^2).$$

Если известна начальная скорость и задан угол наклона β , то конечная скорость равна:

$$v_R = \sqrt{2gh(1 - f \operatorname{ctg} \beta) + v_n^2}.$$

При $v_k = v_n$, т.е. при движении с постоянной скоростью, $\operatorname{tg} \beta_0 = f$. Для ускоренного движения ($v_k > v_n$) $\beta > \beta_0$, для замедленного движения ($v_k < v_n$) $\beta < \beta_0$.

Если груз движется по бункеру прямоугольной формы, то под коэффициентом трения скольжения понимается приведенный коэффициент, который учитывает сопротивление трения как по дну, так и по боковым стенкам бункера.

Однако условия гравитационного истечения материала при работе могут изменяться ввиду налипания мелких влажных частиц на дно бункера. Это приводит к увеличению значения коэффициента трения, нарушению условий естественного истечения материала и заклиниванию его в замкнутом объеме при непрерывном потоке. С целью восстановления условий гравитационного истечения материала предлагается устройство для разгрузки кусковых материалов из бункеров [2].

В устройстве используется схема выгрузки кускового материала из бункера, содержащая рабочий орган, расположенный под углом 60° к горизонтали, и привод рабочего органа, прикрепленного к бункеру. Рабочий орган выполнен в виде ступеней из плит и диафрагм и подвижных трехсекционных желобов, средние секции которых изготовлены в виде волнообразной поверхности синусоидального профиля, а крайние секции желобов – в виде плит и расположены в щелях противоположных стенок над днищем бункера и оперты по нижней поверхности средней секции со стороны днища и торцевой поверхности крайних секций со стороны выходного отверстия на ролик-опоры. Торцевая часть подвижных трехсекционных желобов со стороны входного отверстия бункера перекрыта консолями ступеней, при этом подвижные трехсекционные желоба связаны с приводом.

Предлагаемое устройство позволяет решить основную задачу, связанную с восстановлением условий гравитационного истечения кускового материала за счет его ворошения на полном объеме при перемещении непрерывным потоком по наклонной плоскости.

Устройство относится к средствам для выгрузки кускового материала, склонного к заклиниванию в замкнутом объеме, и может быть применено в горнорудной, химической, угольной, строительной и других отраслях народного хозяйства.

На рисунке 1 представлена схема общего вида устройства для выгрузки кускового материала из бункера; на рисунке 2 – схема привода рабочего органа бункера, на рисунке 3 – схема расположения приводов и подвижных трехсекционных желобов бункера; на рисунке 4 – схема винтового устройства для линейного перемещения желоба бункера; на рисунке 5 – схема расположения направляющих винтового устройства трехсекционного желоба бункера.

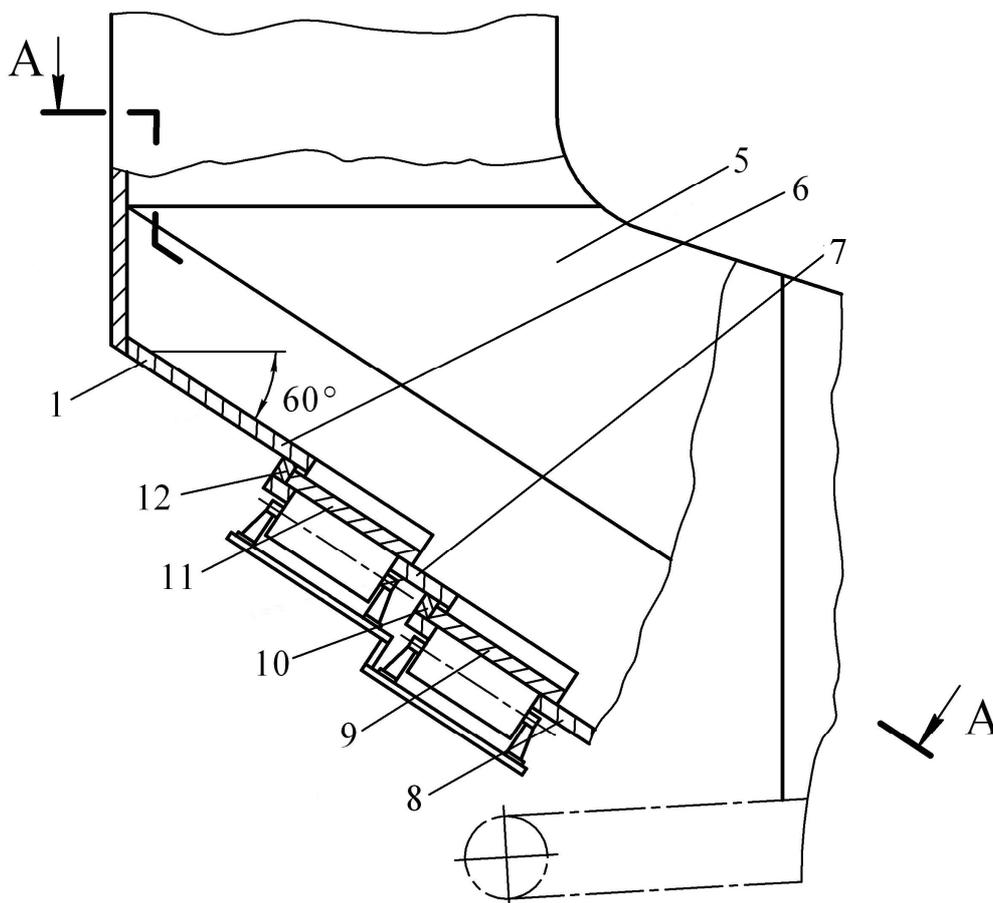


Рисунок 1 – Схема устройства для выгрузки кускового материала из бункера (общий вид)

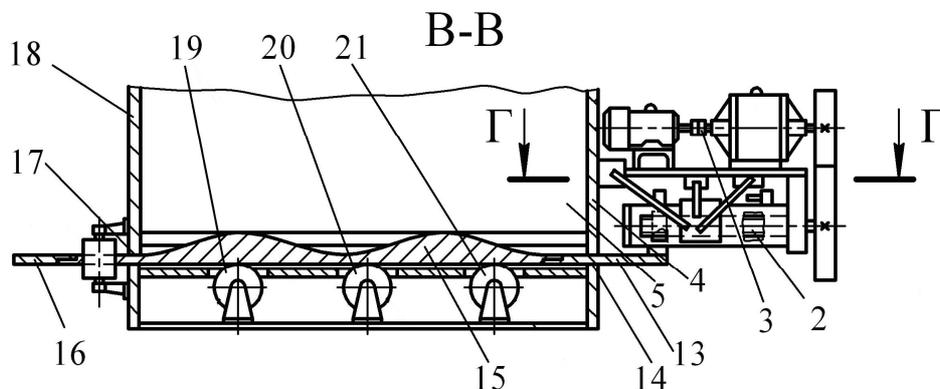


Рисунок 2 – Схема привода рабочего органа бункера

Устройство для выгрузки кускового материала из бункера содержит рабочий орган 1, расположенный под углом 60° к горизонтали, винт 2 и привод 3, который прикреплен к

стенке 4 бункера 5. Рабочий орган 1 выполнен в виде ступеней 6, 7, 8 из плит и диафрагм 10, 12 и подвижных трехсекционных желобов 9, 11.

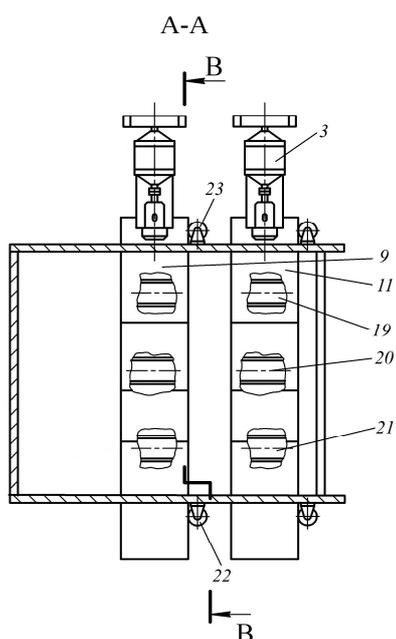


Рисунок 3 – Схема расположения приводов и подвижных трехсекционных желобов бункера

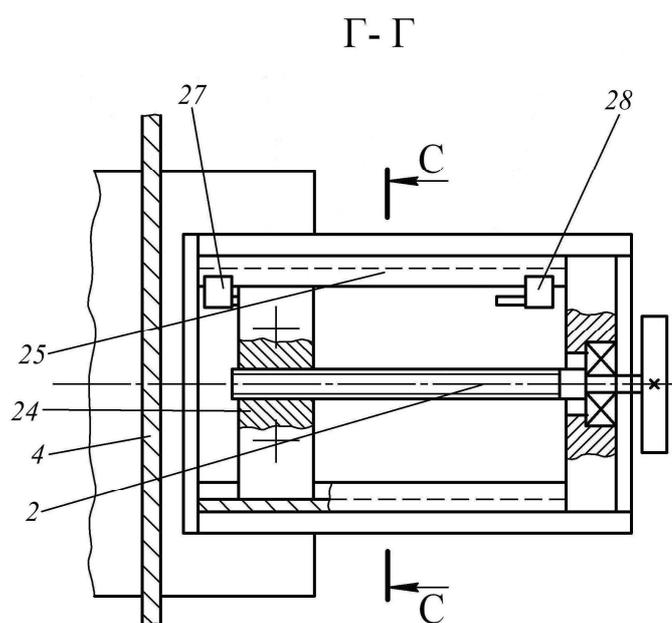


Рисунок 4 – Схема винтового устройства для линейного перемещения желоба бункера

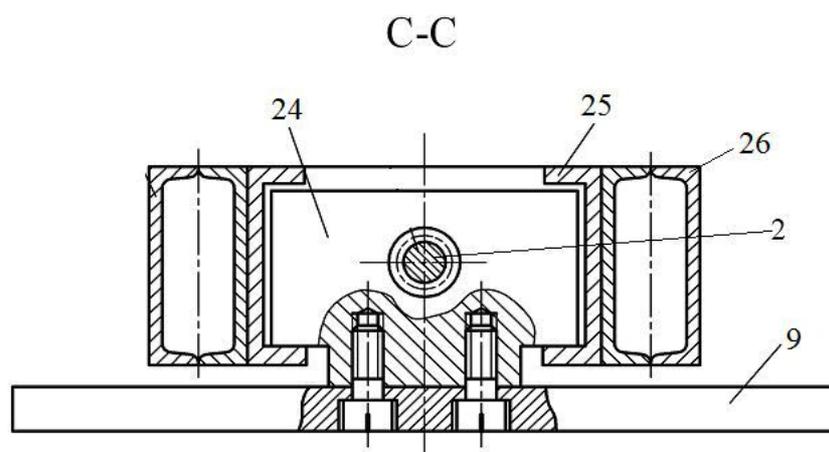


Рисунок 5 – Схема расположения направляющих винтового устройства трехсекционного желоба бункера

Средняя секция 15 желоба 9 изготовлена в виде волнообразной поверхности синусоидального профиля, а крайние секции 13, 16 изготовлены из плит и расположены в щелях 14, 17 вертикальных стенок 4, 18 бункера 5. Подвижной трехсекционный желоб 9 поддерживается по нижней плоскости со стороны днища бункера 5 и по торцу со стороны выпускного отверстия бункера соответственно роликоопорами 19, 20, 21 и 22, 23. Ступени 6, 7, 8 закреплены к вертикальным стенкам 4, 18 с внутренней стороны бункера 5. Нижние части концов ступеней 6, 7 расположены консольно по отношению к диафрагмам 10, 12 и в плане перекрывают торцевую часть подвижного трехсекционного желоба 9 со стороны входного отверстия бункера. Подвижной трехсекционный желоб 9 связан с гайкой 24, которая расположена в направляющих 25 корпуса 26. Ход подвижного трехсекционного желоба 9 ограничивается конечными выключателями 27 и 28.

Устройство для выгрузки кускового материала из бункера работает следующим образом. При включении привода 3 крутящий момент передается на винт 2. Вращение винта 2 преобразуется гайкой 24 в поступательное перемещение подвижного трехсекционного жело-

ба 9 по направляющим 25 и щелям 14, 7. Привод 3 перемещает подвижной желоб 9 по роликоопорам 19, 20, 21 и 22, 23 поперек днища бункера 5 и за счет волнообразной поверхности средней секции 15 трехсекционного желоба 9 осуществляет одновременно перемещение отдельных слоев материала относительно друг друга по вертикали и вращение отдельных кусков. Таким образом, при движении трехсекционного желоба 9 происходит ворошение материала в бункере. Реверсирование движения трехсекционного желоба 9 осуществляется конечными выключателями 27 и 28. После осуществления ворошения материала привод (приводы) выключается. Устройство (устройства) включают периодически при заклинивании материала в бункере с целью восстановления условий гравитационного истечения при его непрерывном потоке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Спиваковский, А.О. Транспортирующие машины / А.О. Спиваковский. М.: Машиностроение, 1983. – 488 с.
2. Пат. 2363647 Российская Федерация, МПК В65G65/23. Устройство для выгрузки кускового материала из бункера / Коноплев В.И., Ануфриев В.И., Ануфриев С.В.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ТулГУ». – № 2008118030/11; заявл. 05.05.2008; опубл. 10.08.2009, Бюл. № 22. – 3 с.

Коноплев Василий Иванович

Кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВПО «Тульский государственный
университет»
300012, г. Тула, пр. Ленина, 92
Тел:(4872) 33–22–88,
E–mail: ptm@tsu.tula.ru

Ануфриев Валерий Иванович

Кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВПО «Тульский государственный
университет»
300012, г. Тула, пр. Ленина, 92
Тел:(4872) 33–22–88,
E–mail: ptm@tsu.tula.ru

V.I. KONOPLEV, V.I. ANUFRIEV

BUNKER FOR BULK MATERIALS

The article considers the design of the bunker, which allows unloading of bulk material prone to jamming in a confined space for any breach of the expiry of gravity in a continuous stream.

Keywords: gravity, bunker, gear, level, plate, chute, sinusoid, roller–bearing, diaphragm.

BIBLIOGRAPHY

1. Spivakovskiy, A.O. Transportiruyushchiye mashiny / A.O. Spivakovskiy. M.: Mashinostroyeniye, 1983. – 488 s.
2. Pat. 2363647 Rossiyskaya Federatsiya, MPK V65G65/23. Ustroystvo dlya vygruzki kuskovogo materiala iz bunkera / Konoplev V.I., Anufriyev V.I., Anufriyev S.V.; zayavitel' i patentoobladatel' GOU VPO «TulGU». – № 2008118030/11; zayavl. 05.05.2008; opubl. 10.08.2009, Byul. № 22. – 3 s.

Konoplev Vasily Ivanovich

Ph. D, docent
Tula state University
300012, Tula, pr. Lenina, 92
Phone:(4872) 33–22–88
E–mail: ptm@tsu.tula.ru

Anufriev Valery Ivanovich

Ph. D, docent
Tula state University
300012, Tula, pr. Lenina, 92
Phone:(4872) 33–22–88
E–mail: ptm@tsu.tula.ru

П.Г. МОРЕВ, И.М. ГРЯДУНОВ, О.В. ДОРОФЕЕВ, Г.А. САЛИЩЕВ

РАСЧЁТ ОСТАТОЧНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ МНОГОЦИКЛОВОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКЕ ВНУТРЕННЕЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Настоящая статья посвящена вычислению остаточного сжимающего напряжения в упрочнённом слое при многоцикловой обработке бронзы. Получен график зависимости гидростатической компоненты тензора остаточных напряжений по глубине материала.

Ключевые слова: обработка металлов давлением, математическая модель, упрочнение, интенсивная пластическая деформация, выглаживание, тензор напряжения.

Поверхность влияет на важные характеристики металлических деталей: устойчивость к пластической деформации (определяется твёрдостью поверхности), устойчивость к коррозии, растрескивание, усталость и износ, поскольку в большинстве случаев повреждение материала происходит из приповерхностного слоя детали [1]. Если поверхность испытывает механическую контактную нагрузку, роль этих характеристик существенно возрастает.

Интенсивная пластическая деформация поверхности оказалась эффективным способом улучшить её поведение, и тремя наиболее популярными способами являются: дробеструйная обработка (shot peening), выглаживание (burnishing) и глубокая прокатка (deep rolling). Все они производят схожие эффекты: измельчение зерна, упрочнение и сжимающее остаточное напряжение. Роль последнего заключается в препятствовании зарождению микротрещин и их распространению вглубь детали. В Орловском Госуниверситете – УНПК разработан новый способ поверхностного упрочнения [2, 3], сочетающий принципы глубокой прокатки и выглаживания и позволяющий повысить основные параметры упрочнённого слоя – его глубину и микротвёрдость. Идея нового способа упрочнения показана на рисунке 1, а, а идея его практической реализации – на рисунке 1, б, где изображены 3 обрабатывающих ролика конической формы: 1 деформирующий с узким выступом и 2 заглаживающих. Показаны их оси вращения O_1 , O_2 , O_3 , а также ось обрабатываемой детали O . Деталь имеет форму кольца, которое помещается в контейнер для нейтрализации явления раскатки.

Настоящая работа посвящена вычислению остаточного сжимающего напряжения в упрочнённом слое, которое мы отождествляем с гидростатической компонентой тензора напряжений. Чтобы найти остаточные напряжения в процессе холодной обработки поверхности, многие исследователи обращаются к численному моделированию. Применяются как 2D, так и 3D модели. Главный недостаток 2D модели – неспособность рассчитать касательную к окружности ролика (т.е., в плоскости, перпендикулярной его оси) в зоне контакта компоненту остаточного напряжения. В то же время, эта компонента составляет около 1/3 осевой (т.е., измеряемой по направлению вдоль оси ролика) компоненты, если сравнивать максимальные величины [4, 5], а компонента в направлении по глубине и вовсе пренебрежимо мала, поэтому цель настоящей работы – удовлетворительно оценить прежде всего осевую компоненту. Результаты по моделированию процесса выглаживания роликом [6] показывают, что разница между вычисленным и измеренным значениями составляет 40% для 2D модели и 7% для 3D модели. Согласно [6], предположение о плоской деформации для случая 2D запрещает течение материала в касательном направлении, и, таким образом, пластическая деформация занижается, что влияет на наведённое остаточное напряжение. Что же касается рассматриваемого случая, результаты [6] должны быть скорректированы. В самом деле, контактная зона для деформирующего ролика (рисунок 2) здесь имеет овальную форму, и пластическое течение в касательном направлении существенно ниже, чем в осевом. Следовательно, ошибка 2D вычисления осевого остаточного напряжения должна быть не столь велика, как 40%. Кроме того, исследуемая технология допускает большое число проходов, поэтому 3D вычисления слишком длительны. Вследствие всего вышесказанного, 2D модель представляется более предпочтительной. Но сравнение с 3D моделью необходимо в дальнейших исследованиях (по крайней мере, для небольшого числа проходов).

При решении соответствующей контактной задачи использовался подход [7, 8], реализованный в пакете компьютерных программ ШТАМП. Неравномерная конечноэлементная сетка состоит из 1922 треугольных линейных элементов. По аналогии с [6], где моделировался процесс выглаживания роликом, была выбрана изотропная модель материала, которая вполне при-

годна для приблизительной оценки. Константы материала (бронза БРОЦС): модуль сдвига – 4.4×10^{10} н/м², коэффициент Пуассона – 0,3, кривая упрочнения показана на рисунке 3.

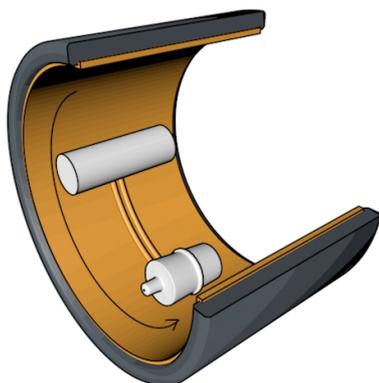


Рисунок 1 - Схема способа упрочнения с выглаживанием

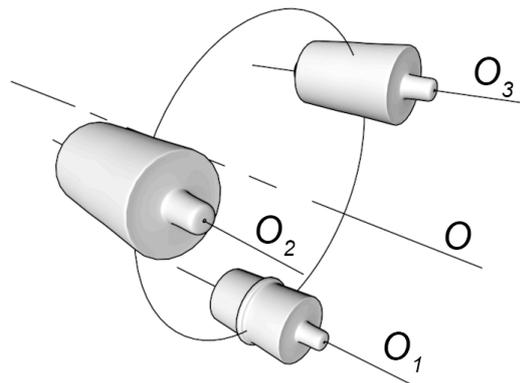


Рисунок 2 - Расположение и вид роликов, использующихся при упрочнении

Деталь представляет собой кольцо внешнего диаметра 70 мм, внутреннего диаметра 50 мм и длины 50 мм. Её поверхность подвергалась 12 проходам упрочняющей обработки с шагом винтовой траектории деформирующего ролика 0,5 мм и глубиной его внедрения 0,2 мм. Результаты расчёта представлены на рисунке 4, где изображена гидростатическая компонента тензора остаточных напряжений. Видно, что эта компонента – сжимающая и постепенно спадает до нуля на глубине около 5 мм, а наибольшую роль остаточное сжимающее напряжение играет в тонком приповерхностном слое толщиной около 0,5 мм.

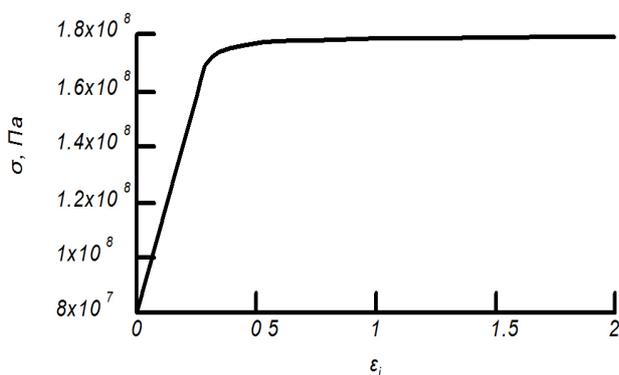


Рисунок 3 - Кривая упрочнения бронзы БРОЦС

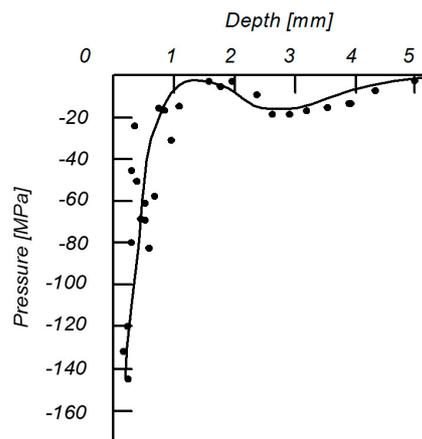


Рисунок 4 - Гидростатическая компонента тензора остаточных напряжений при выглаживании

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. Bagherifard, R. Ghelichi, and M. Guagliano A Numerical Model of Severe Shot Peening (SSP) to predict the Generation of a Nanostructured Surface Layer of Material// Surf. Coat. Technol. – 2010. – pp. 4081-4090.
2. Пат. 2462327 РФ, МПК В 21Н1/22. Способ получения металлических втулок с градиентно-упрочнённой структурой / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, И.М. Грядунов (РФ) – № 2010153917/02; Заявлено 27.12.2010; Опубл. 27.09.2012, Бюл. №27. – 4 с.
3. Радченко, С.Ю. Новая технология упрочнения вкладышей подшипников скольжения / С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов, И.М. Грядунов // Актуальные вопросы развития транспортного комплекса. Материалы 3-ей Международной научно-практической конференции, под общей редакцией д.т.н. проф. А.Н. Новикова. – Орёл: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», 2013. – 320 с.
4. G.H. Majzoobi, S.T. Motlagh, and A. Amiri Numerical Simulation of Residual Stress Induced by Roll-Peening // Trans. I IM. – 2010. – 63 (2-3). – pp. 499-504.
5. G.H. Majzoobi, K. Azadikhah, and J. Nematı The Effects of Deep Rolling and Shot Peening on Fretting Fatigue Resistance of Aluminum–7075–T6// Mater. Sci. Eng. A. – 2009. – pp. 235-247.
6. M. Sayahi, S. Sghaier, and H. Belhadjsalah, Finite Element Analysis of Ball Burnishing Process: Comparisons Between Numerical Results and Experiments, Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2013. – pp. 1665-1673.
7. Морев, П.Г. Вариант метода конечных элементов для контактных задач с трением / П.Г. Морев // Изв. РАН, сер. МТТ. – 2007. – № 4. – С. 168-182.
8. P.G. Morev A Variational Statement of Quasistatic «Rigid-Deformable» Contact Problems at Large Strain Involving Generalized Forces and Friction, Acta Mech. – 2011. – pp. 115-130.

Морев Павел Геннадьевич

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», г. Орел
кандидат физико-математических наук, науч. сотр.
лаб. новых материалов
г. Орел, Наугорское шоссе, 29
E-mail: paulorel@mail.ru

Грядунцов Игорь Михайлович

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», г. Орел
кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Техническая механика и инженерная графика»
г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 419841
E-mail: fry14@yandex.ru

Дорофеев Олег Васильевич

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», г. Орел
кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильный транспорт»
г. Орел, Наугорское шоссе, 29
E-mail: da_shy@inbox.ru

Салищев Геннадий Алексеевич

НИУ БелГУ, г. Белгород,
доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение и нанотехнологии», руководитель лаборатории «Объемные наноматериалы»
308034, г. Белгород, ул. Королева, 2 а, корпус 4
E-mail: salishchev@bsu.edu.ru

P.G. MOREV, I.M. GRYADUNOV, O.V. DOROFEEV, G.A. SALISHCHEV

CALCULATION OF RESIDUAL STRESSES IN MULTI-CYCLE HARDENING PROCESSING OF THE INNER CYLINDRICAL SURFACE

This article is devoted to the computation of the residual compressive stress in the strengthened layer of at-cycle processing of bronze. Received a plot of hydrostatic tensor components of residual stress in the depth of the material.

Keywords: metal forming, mathematical model, hardening, intensive plastic deformation, smoothing, tensor tension.

BIBLIOGRAPHY

1. S. Bagherifard, R. Ghelichi, and M. Guagliano, A Numerical Model of Severe Shot Peening (SSP) to predict the Generation of a Nanostructured Surface Layer of Material // Surf. Coat. Technol. – 2010. – pp. 4081-4090.
2. Pat. 2462327 RF, MPK V 21H1/22. Sposob polucheniya metallicheskih vtulok s gradiventno-uprochnonnoy strukturou / V.A. Golenkov, S.Yu. Radchenko, I.M. Gryadunov (RF) – № 2010153917/02; Zayavleno 27.12.2010; Opubl. 27.09.2012, Byul. №27. – 4 s.
3. Radchenko, S.Yu. Novaya tekhnologiya uprochneniya vkladyshev podshipnikov skol'zheniya / S.YU. Radchenko, D.O. Dorokhov, I.M. Gryadunov // Aktual'nyye voprosy razvitiya transportnogo kompleksa. Materialy 3-vev Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, pod obshchey redaktsiyey d.t.n. prof. A.N. Novikova. – Орел: ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», 2013. – 320 s.
4. G.H. Maizoobi, S.T. Motlagh, and A. Amiri Numerical Simulation of Residual Stress Induced by Roll-Peening // Trans. I IM. – 2010. – 63 (2-3). – pp. 499-504.
5. G.H. Maizoobi, K. Azadikhah, and J. Nemati The Effects of Deep Rolling and Shot Peening on Fretting Fatigue Resistance of Aluminum-7075-T6 // Mater. Sci. Eng. A. – 2009. – pp. 235-247.
6. M. Savahi, S. Sghaier, and H. Belhadisalah. Finite Element Analysis of Ball Burnishing Process: Comparisons Between Numerical Results and Experiments, Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2013. – pp. 1665-1673.
7. Morev, P.G. Variant metoda konechnykh elementov dlya kontaknykh zadach s treniyem / P.G. Morev // Izv. RAN, ser. MTT. – 2007. – № 4. – S. 168-182.
8. P.G. Morev A Variational Statement of Quasistatic «Rigid-Deformable» Contact Problems at Large Strain Involving Generalized Forces and Friction, Acta Mech. – 2011. – pp. 115-130.

Morev Pavel Gennadievich

"State University - ESPC," Орел
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, to learn
of the Laboratory of New Materials
Орел, Наугорское шоссе, 29
E-mail: paulorel@mail.ru

Gryadunov Igor Mikhailovich

"State University - ESPC," Орел
Ph.D., senior lecturer in "Technical mechanics and engineering graphics"
Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 419841
E-mail: fry14@yandex.ru

Dorofeev Oleg Vasilevich

"State University - ESPC," Орел
Ph.D., Associate Professor of "Avtoplast"
Орел, Наугорское шоссе, 29
E-mail: da_shy@inbox.ru

Salishchev Gennadiy Alekseevich

NIU BSU, Belgorod,
Ph.D., Professor of the Department "Materials and nanotechnology," the head of the laboratory "Bulk nanomaterials"
308034, Belgorod, st. Koroleva, and 2, the housing 4
E-mail: salishchev@bsu.edu.ru

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ **И ИНСТРУМЕНТЫ**

УДК 621.941.277

Ю.С. КОЧАНОВ

АЛМАЗНО–РАСТОЧНЫЕ СТАНКИ. ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ТОНКОМ РАСТАЧИВАНИИ

В статье приведён анализ возникновения погрешностей формы и расположения растачиваемых отверстий. Рассмотрено влияние динамических характеристик на погрешность формы отверстия. Приведены выводы по результатам исследования влияния амплитуды колебания борштанги одношпиндельного алмазно–расточного станка на погрешность формы обработанной поверхности.

Ключевые слова: алмазно–расточные станки, форма обработанной поверхности, амплитуда колебаний станка, точность обработки на алмазно–расточных станках, расточные станки, отверстия большого диаметра.

Современные производства в последние годы активно развивают производство нанометрических микросхем, устройств, а также контрольно–измерительных машин, позволяющие науке технологии машиностроения подняться на новый уровень своего развития. В таких реалиях современное машиностроение всё больше нуждается в повышении точности механической обработки заготовок при сокращении $T_{шт.}$. Повышение производительности при сохранении технических требований к готовому изделию имеет большое экономическое и техническое значение для производства и решающим образом влияют на качество и надёжность производимых механизмов и машин, а также на их общий срок эксплуатации. В этом плане весьма актуальна задача повышения эффективности тонкого растачивания при обработке точных отверстий, особенно больших диаметров ($D \geq 150\text{мм}$). Режимы резания, обеспечивающие снятие наибольших стружек в единицу времени, при сохранении высокой стойкости инструмента не всегда являются определяющими, при тонком растачивании. Необходимо назначать режимы резания, обеспечивающие заданную точность, требуемое качество поверхности, а также достаточно высокую производительность обработки.

Большое разнообразие алмазно–расточных станков, выпускаемых станкостроительными компаниями по всему миру, можно систематизировать и разделить на несколько групп.

По характеру перемещений основных узлов алмазно–расточные станки делятся на станки с подвижными шпиндельными головками и станки с подвижным столом. Если в первых шпиндель может занимать любое положение в пространстве, то во вторых он неподвижен. Вращаться может инструмент или обрабатываемая заготовка. Инструмент обычно консольный и очень редко применяются двух– или многоопорные борштанги. Наибольшее распространение получили горизонтально–расточные станки с подвижным столом и консольными вращающимися борштангами. Станки изготавливают как специальные, предназначенные для обработки конкретных заготовок в определённых пределах диаметральных размеров.

Анализ конструкций специальных алмазно–расточных станков показывает, что подавляющее большинство станков является многошпиндельными и многолезцовыми. Подробный анализ и классификация заготовок, обрабатываемых на алмазно–расточных станках, в том числе по типам растачиваемых отверстий, приведены в работах [1, 7].

Анализ технологических схем обработки отверстий на алмазно–расточных станках определяются конструктивными особенностями обрабатываемой заготовки и непосредственно растачиваемого отверстия, а также требованиями к точности и производительности станка. Все схемы, в силу их принципиальных различий при прочих равных условиях не обеспечивают одинаковую точность и качество поверхности отверстий, расточенных в одинаковых заготовках.

Оценивая влияние динамических процессов в замкнутой динамической системе станка на точность обработки, в ряде работ [4–6] выделяют статическую и динамическую состав-

ляющие погрешности обработки. Если говорить о тонком растачивании, то под статическими составляющими погрешности формы поперечного сечения расточенного отверстия понимаются отклонения от идеальной окружности, периодичность которых ниже периодичности отклонений, вызванных колебаниями на собственных частотах упругой системы. Динамические составляющие погрешности обуславливаются самовозбуждающимися колебаниями в замкнутой динамической системе станка, возникающими от внешних воздействий на упругую систему. Анализ круглограмм отверстий, обработанных на алмазно-расточных станках, показал, что колебания могут быть основным фактором, определяющим погрешности формы поперечного сечения. Наряду с этим колебания упругой системы шпиндель-консольная борштанга приводят к образованию дефектов на обработанной поверхности и оказывают заметное влияние на шероховатость поверхности.

Жёсткие короткие борштанги с отношением длины к диаметру $l/d \leq 2$ обеспечивают большой запас устойчивости замкнутой динамической системы алмазно-расточных станков. Предельная толщина стружки, характеризуемая возрастанием амплитуды колебаний на первой собственной частоте системы, при работе борштангой соответствует глубине резания 2,5...5 мм, при работе борштангой – сотым долям миллиметра.

Отклонения от круглости, полученные при тонком растачивании короткими борштангами в жёстких заготовках, значительно ниже, чем при обработке в условиях повышенной подательности борштанги, заготовки и приспособления.

Для исследования влияния относительного движения между инструментом и деталью на точность формы отверстия в поперечном и продольном сечении были проведены эксперименты по тонкому растачиванию деталей из стали 2Х13. Детали испытания были выполнены в виде втулки с поясками для того, чтобы за один проход, не выдвигая резец на размер, допускалось снятие припуска от 0,1 до 0,5 мм (с интервалом 0,1 мм) и была возможность рассмотреть изменение высоты волны с изменением глубины резания. Изменяемыми параметрами являлись: 1) скорость резания 80–1000 м/мин; 2) подача от 0,02–0,06 мм/об; глубина резания 0,1–0,5 мм; геометрические параметры режущей части инструмента. Эксперименты были проведены борштангой $\varnothing 40$ мм с вылетом 120 мм, при этом частота колебаний системы шпиндельный узел – борштанга во время эксперимента составила 405 Гц, а по расчёту – 395 Гц. Таким образом, частота колебаний технологической системы была известна, частота вращения инструмента определялась по формуле (1):

$$n = \frac{V \cdot 1000}{60 \cdot \pi \cdot D} \quad (\text{Гц}), \quad (1)$$

где V – скорость резания;
 D – диаметр борштанги.

Для скорости 100 м/мин частота вращения равна 13,26 Гц; для скорости 150 м/мин – частота вращения 18,89 Гц и т.д. для всех исследованных скоростей.

Применение в эксперименте одной борштанги даёт возможность проследить все изменения поперечной и продольной волнистости в связи с изменением отношения частоты относительного гармонического движения инструмента (f) к изменяющемуся числу оборотов инструмента (n) во время обработки. Это также позволяет уменьшить влияние постоянных факторов, которые будут выступать в виде постоянной погрешности. Расчётная длина волны, выраженная числом канавок подачи, определяется по формуле (2):

$$P = \frac{1}{\psi'}, \quad (2)$$

где ψ' – дробный остаток отношения f/n , причём $\psi' \leq 0.5$.

При работе со скоростью резания 100 м/мин и подачей 0,02 мм/об в поперечном сечении отверстия хорошо видны волны величиной от 3 до 4 мкм. Число волн 29–30. Такая же картина наблюдается при работе с подачами 0,04–0,06 мм/об. Особенно ясно видны волны при подаче 0,06 мм/об, что соответствует большему уровню колебаний в направлении составляющей силы резания. С увеличением скорости резания до 150 м/мин при подаче 0,02 мм/об волны в поперечном сечении отверстия стали более сглаженными в связи с уменьшением отношения $\frac{f}{n}$. Величина поперечной волны уменьшилась до 2,4–2,6 мкм. Изменение подачи до 0,04–0,06 мм/об незначительно снизило величину поперечной волны до 1,6–2 мкм. Дальнейшее увеличение скорости резания до 250 м/мин приводит к ещё более характерному образованию волн в поперечном сечении отверстия. Особенно это становится

заметно при подаче 0,04 мм/об, когда высота волн достигает 4 мкм, а число волн в поперечном сечении достигает 12. Увеличение подачи до 0,06 мм/об несколько уменьшает амплитуду волны.

Увеличение подачи до 0,04–0,05 мм/об увеличивает высоту волны до 2,3 мкм. Скорость резания 350 м/мин не даёт существенных отклонений по сравнению со скоростью 250 м/мин. Эта скорость не является приемлемой с точки зрения отношения частот, которое в данном случае выражено нечётным числом. Скорости 500–700 м/мин характеризуются волнистостью поверхности от 1 до 5 мкм и совпадением расчётных и измеренных длин волн. В то время как скорости 700–1000 м/мин, при которых отношение частот получалось более 3, но менее 4, дают большие ошибки круглости и линейных размеров, поэтому в данном диапазоне скоростей наблюдается несоответствие расчётной и измеренной длины волны. Так, при скорости резания 1000 м/мин измеренная длина волны в 2 раза меньше расчётной. Это обстоятельство, вероятно, объясняется тем, что при таких больших скоростях резания (700–1000 м/мин) и числе оборотов активнее проявляются вибрации технологической системы, в частности, корпусных деталей станка. Значительное изменение высоты волны наблюдается при изменении жёсткости у резца, которое достигалось путём перестановки резца в другое гнездо на той же борштанге.

Таким образом, проведённое исследование показало хорошее совпадение расчётных и измеренных величин. Несовпадение в некоторых случаях расчётных и измеренных значений можно объяснить тем, что фактором определяющим отклонение формы отверстия в продольном и поперечном сечении является отношение частот относительного движения и частоты оборотов борштанги. Если это число целое, то измеренные в продольном направлении волнистость и шероховатость поверхности не подвергаются влиянию. При дробных отношениях $\frac{f}{n}$ в диапазоне подач ниже 0,01 мм/об возникают неблагоприятные условия резания, в связи с тем, что при малых длинах волн резец периодически выходит из зоны резания, значительно увеличивая шероховатость.

Существенное влияние на погрешности обработки оказывает размерный износ резцов. В отличие от черновой обработки, при тонком растачивании износ резцов происходит по задней поверхности, что приводит к отдалению вершины резца от центра вращения заготовки на величину радиального износа и соответствующему уменьшению радиуса растачивания. Таким образом, в связи с износом возникает переменная систематическая погрешность обработки, приводящая к образованию конусности. Конусность наиболее заметна при растачивании отверстий большого диаметра и длины. В результате износа режущего лезвия также ухудшается шероховатость обработанной поверхности. Эти погрешности на порядок меньше при растачивании отверстий резцами, оснащёнными КНБ.

Следует отметить, что все рассмотренные выше исследования точности механической обработки вообще, и тонкого растачивания, в частности, выполнялись в условиях, когда в любой момент времени в контакте с обрабатываемой заготовкой находится только один инструмент, что препятствует непосредственному перенесению этих результатов на технологические схемы многорезцовой и многошпиндельной обработки отверстий.

В проведённых ранее исследованиях недостаточно исследованы особенности многорезцовой и многошпиндельной обработки отверстий на алмазно–расточных станках. Также следует отметить, что в литературе отсутствуют данные о точности обработки и шероховатости поверхности при различных технологических схемах тонкого растачивания отверстий. Сами технологические схемы не систематизированы, не выработаны критерии, определяющие обоснованный выбор той или иной схемы. Мало изучены вопросы взаимного динамического влияния резцов и шпинделей на точность и качество растачиваемых отверстий в условиях одновременной работы нескольких резцов и шпинделей.

Результаты проведённого анализа степени исследования вопросов повышения точности обработки на алмазно–расточных станках показали, что необходимо: 1) выработать расчётное определение статических и динамических составляющих погрешностей обработки при тонком растачивании; 2) разработать методику расчёта амплитуд вынужденных колебаний инструмента в условиях многорезцового тонкого растачивания; 3) исследовать технологические возможности различных схем многорезцовой и многошпиндельной обработки в сопоставлении с однорезцовым тонким растачиванием отверстий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бромберг, Б.М. Алмазно–расточные станки / Б.М. Бромберг, А.Б. Дашевский, Э.А. Ламдон, В.К. Ломакин. М.: Машиностроение, 1965. – 273 с.
2. Вейц, В.Л. Динамика технологических систем: Учебное пособие. - В 2-х частях. – Ч. 1. – Прикладная теория механических колебаний / В.Л. Вейц, Д.В. Васильков, Ю.М. Зубарев. – Санкт–Петербург: Изд–во ПИМАШ, 2001. – 223 с.
3. Вейц, В.Л. Динамика технологических систем: Учебное пособие. – В 2-х частях / В.Л. Вейц, Д.В. Васильков, Ю.М. Зубарев // Колебания в металлорежущих станках – СПб: Изд–во Института машиностроения, 2002. – Ч. 2. – 256 с.
4. Кедров, С.С. Колебания металлорежущих станков / С.С. Кедров. – М.: Машиностроение, 1978. – 173 с.
5. Колев, К.С. Точность обработки и режимы резания / К.С. Колев, Л.М. Горчаков. – М.: Машиностроение, 1976. – 159 с.
6. Кудинов, В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.
7. Рассохин, В.Я. Тонкое растачивание отверстий в корпусных деталях металлорежущих станков / В.Я. Рассохин, С.Ю. Пеплова // «Прогрессивные технологические процессы в машиностроении». – М.: Машиностроение, 1965. – С. 15–16.
8. Эльясберг, М.Е. Автоколебания металлорежущих станков. Теория и практика / М.Е. Эльясберг. – СПб.: ОКБС, 1993. – 182 с.

Кочанов Юрий Сергеевич

СПбГПУ, Институт машиностроения (ЛМЗ–ВТУЗ), г. Санкт-Петербург
аспирант кафедры "ТМиОАП"
E-mail: gkochanov@gmail.com

Yu.S. KOCHANOV

**DIAMOND BORING MACHINES.
SOURCES OF ERROR FOR FINE BORING**

There is analysis of mistakes a form and disposition of the drilling holes in the article. Considered influence of dynamical characteristics on mistake of the form the hole. There are conclusions about results of investigation of influence the amplitude of oscillation of the spindle of a single-spindle precision machine tool on mistake of the form finished surface in the article.

Keywords: *precision drilling machine tools, processed surface shape, amplitude of the oscillations of the machine tool, accuracy on drilling machine tools, drilling machine tools, large diameter holes.*

BIBLIOGRAPHY

1. Bromberg, B.M. Almazno–rastochnyye stanki / B.M. Bromberg, A.B. Dashevskiy, E.A. Lamdon, V.K. Lomakin. M.: Mashinostroyeniye, 1965. – 273 s.
2. Veyts, V.L. Dinamika tekhnologicheskikh sistem: Uchebnoye posobiye V 2–kh chastyakh. – Ch.1. – Prikladnaya teoriya mekhanicheskikh kolebaniy / V.L. Veyts, D.V. Vasil'kov, Yu.M. Zubarev. – Sankt–Peterburg: Izd–vo PIMASH, 2001. – 223 s.
3. Veyts, V.L. Dinamika tekhnologicheskikh sistem: Uchebnoye posobiye – V 2–kh chastyakh / V.L. Veyts, D.V. Vasil'kov, Yu.M. Zubarev // Kolebaniya v metallorezhushchikh stankakh – SPb: Izd–vo Instituta mashinostroyeniya, 2002. – CH.2. – 256 s.
4. Kedrov, S.S. Kolebaniya metallorezhushchikh stankov / S.S. Kedrov. – M.: Mashinostroyeniye, 1978. – 173 s.
5. Kolev, K.S. Tochnost' obrabotki i rezhimy rezaniya / K.S. Kolev, L.M. Gorchakov. – M.: Mashinostroyeniye, 1976. – 159 s.
6. Kudinov, V.A. Dinamika stankov / V.A. Kudinov. – M.: Mashinostroyeniye, 1967. – 359 s.
7. Rassokhin, V.Ya. Tonkoye rastachivaniye otverstiy v korpusnykh detalyakh metallorezhushchikh stankov / V.Ya. Rassokhin, S.Yu. Peplova // «Progressivnyye tekhnologicheskiye protsessy v mashinostroyenii». – M.: Mashinostroyeniye, 1965. – S. 15–16.
8. El'vasberg, M.Ye. Avtokolebaniya metallorezhushchikh stankov. Teoriya i praktika / M.Ye. El'vasberg. – SPb.: OKBS, 1993. – 182 s.

Kochanov Yuri Sergeevich

SPSPU, Institute of Machine Building (LMZ–VTUZ), St. Petersburg
graduate faculty "Technological machinery and equipment automated production"
E-mail: gkochanov@gmail.com

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИПУСКАМИ ПОД ЧИСТОВУЮ ОБРАБОТКУ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЕС С АРОЧНЫМИ ЗУБЬЯМИ

Рассмотрены проблемы процесса управления припусками и методы их решения, позволяющие определять параметры режущего инструмента при заданных параметрах арочного зубчатого колеса и припуске под чистовую обработку цилиндрических колес с арочными зубьями.

Ключевые слова: арочный зуб, цилиндрическая передача, режцовая головка, черновая обработка, припуски, управление припусками.

Применение в приводах современных машин цилиндрических колес с арочными зубьями (ЦКАЗ) позволит увеличить нагрузочную способность и ресурс, снизить массогабаритные и виброшумовые показатели.

При разработке технологического процесса лезвийной обработки цилиндрических колес с арочными зубьями важным этапом является расчет припусков. Назначение чрезмерно больших припусков приводит к непроизводительным потерям материала, превращаемого в стружку; увеличению трудоемкости механической обработки; повышенному расходу режущего инструмента и износу оборудования; снижается точность в связи с отжатыми в технологической системе. В свою очередь, недостаточно большие припуски не обеспечивают удаления дефектных слоев материала и необходимых точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей.

В случае с формообразованием арочных зубьев цилиндрических колес номинальная поверхность имеет сложную пространственную конфигурацию для формообразования которой используется черновая и чистовая (получистовая) обработки, сочетания различных движений подачи и специальный инструмент, что еще более усложняет задачу.

Совмещение двух способов формообразования: 1) черновое прорезание впадины зуба зуборезной режцовой головкой с радиальной подачей или обкатом, 2) получистовая и чистовая обработка раздельно выпуклой и вогнутой поверхностей зуба режцовыми головками с нулевым углом профиля режущего зуба. Это позволяет увеличить производительность, снизить себестоимость за счет применения при черновой обработке стандартизированного инструмента и универсального оборудования. В частности, для чернового формообразования могут использоваться зуборезные режцовые головки (ЗРГ) для нарезания круговых зубьев конических передач, и универсальные фрезерные станки. Режцовые головки с нулевым углом профиля представляют собой специальный инструмент, изготовленный непосредственно для обработки арочных зубьев. Для осуществления возможности применения таких головок необходимы станки с ЧПУ, обладающие не менее, чем 4-мя степенями свободы.

Обработка впадины арочного зуба термообработанного колеса осуществляется в четыре этапа: 1) прорезание ЗРГ, 2) черновое формообразование режцовыми головками с нулевым углом профиля, 3) термическая обработка и 4) чистовая обработка режцовыми головками аналогичного типа.

Исследования припусков на чистовую обработку (рисунок 1) при сочетании двух способов показали, что значения по высоте зуба неравномерны (рисунок 2).

Такой разброс в значениях припусков как по длине так и по высоте впадины зуба напрямую влияет на увеличение значений сил резания, что приведет к снижению показателей точности и шероховатости. Это обстоятельство является основной проблемой управления припусками под чистовую обработку. Его решение является актуальной задачей повышения эффективности данной технологии обработки арочных зубьев цилиндрических передач.

Одним из вариантов решения вышеизложенной проблемы является разработка методики управления припусками, которая сводится к поиску оптимальных значений параметров режущего инструмента и варьирование одного из них, для получения необходимого значения минимального припуска для обеих сторон впадины арочного зуба.

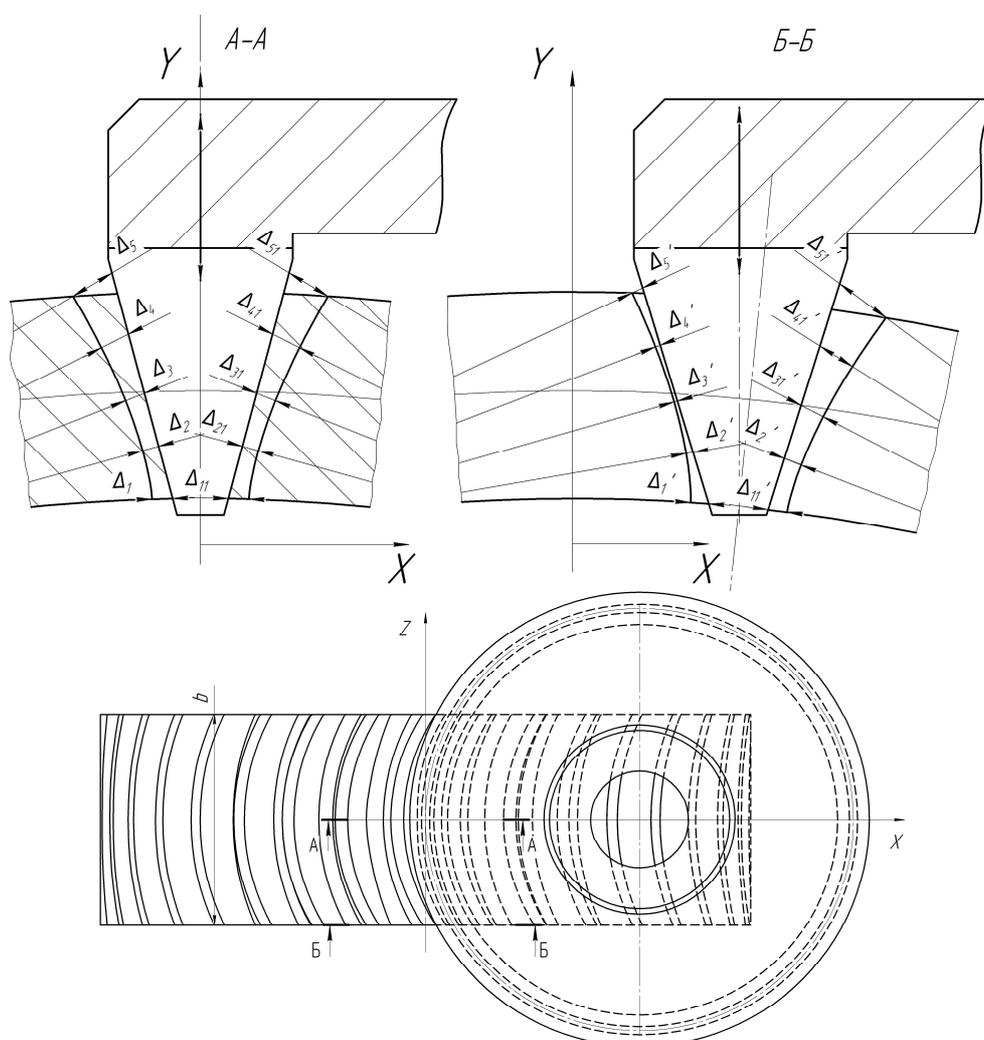


Рисунок 1 – Припуски на чистовую обработку в различных сечениях перпендикулярных оси колеса [5]

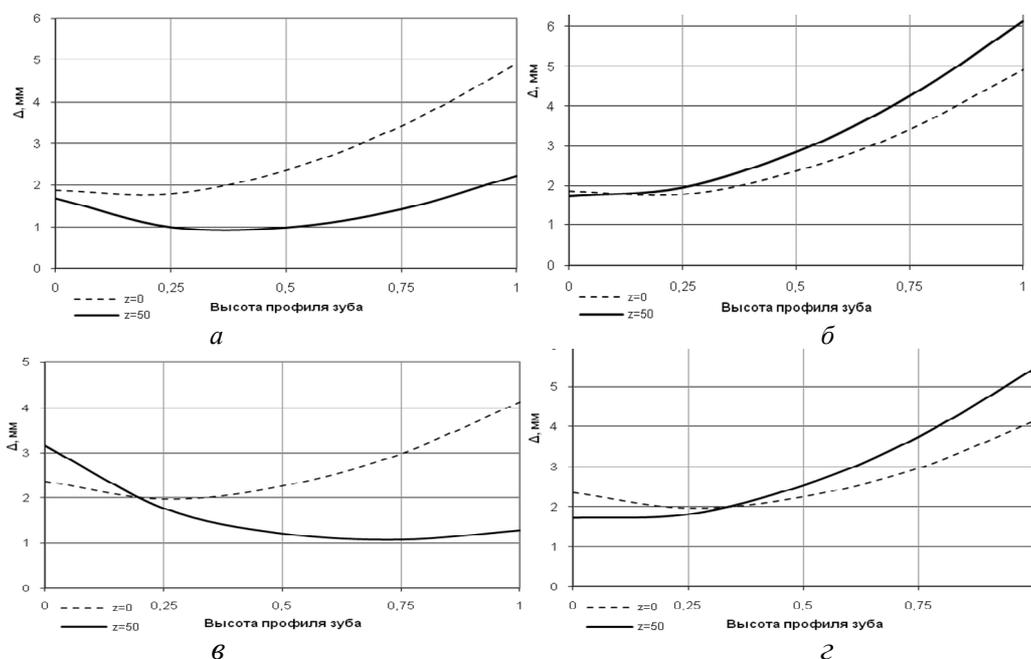


Рисунок 2 – Значения припусков для варианта 1 а – вогнутой (левой) и б – выпуклой (правой) сторон зуба в центральном $Z=0$ и торцевом $Z_{max}=b/2$ сечениях, перпендикулярных оси и варианта 2 соответственно – в и г [5]

На величину припусков наибольшим образом влияют несколько факторов. Среди них можно выделить конструктивные: модуль – m , число зубьев – z , ширина венца – B и па-

параметры режущего инструмента: угол наклона профиля режущей кромки – α_1 , радиус окружности резцовой головки в центральном сечении режущего зуба – r_0 и коэффициент ширины профиля режущего зуба по делительному диаметру – k . Однако, конструктивные факторы заданы и управлять припусками предпочтительно только при помощи параметров режущего инструмента.

Основным моментом в разработке методики управления припусками является решение задачи по минимизации двух основных параметров, комплексно характеризующих состояние припусков, – это объем припуска V_Δ и амплитуда колебаний его значений A_Δ как по высоте, так и по длине зуба. Но, поскольку, обработка резцовыми головками с нулевым углом профиля делится на 2 этапа (черновой и чистовой с ТО между ними), важно оставлять оптимальное распределение припуска между черновой и чистовой обработкой. Поэтому необходимо соблюдать условие выбора параметров режущего инструмента, чтобы минимальный припуск на обработку резцовыми головками с нулевым углом профиля был больше или равен припуску под чистовую обработку.

$$\Delta_{\min} \geq \Delta_{\text{чист}} \quad (1)$$

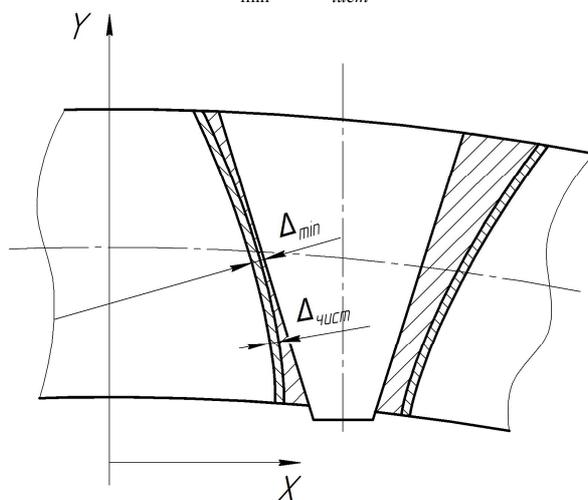


Рисунок 3 – Припуски под обработку РГ с нулевым углом профиля в торцевом сечении колеса.

Можно выделить два основных параметра, характеризующих величину объема припуска V_Δ под чистовую обработку и величину разброса значений припусков по высоте и длине зуба A_Δ – это сумма припусков по высоте зуба в двух сечениях $\sum \Delta = \sum_{i=1}^{51} \Delta_i + \sum_{i=1}^{51} \Delta_i'$ (центральном и торцевом) и сумма амплитудных значений припусков колебаний в этих сечениях $\sum A_\Delta$. Достижение их минимальных значений последовательно при сочетании значений параметров режущего инструмента также достигаются и минимальные значения V_Δ и A_Δ . Управление припусками осуществляется определением $\Delta_{\text{чист}}$ под окончательную чистовую обработку и назначением минимального припуска Δ_{\min} с соблюдением неравенства (1).

Для осуществления процесса управления припусками необходимо задать значения конструктивных параметров и диапазоны значений основных параметров, оказывающих наибольшее влияние на величину припуска, это: α_1 , r_0 и k . Данные представлены в таблицах 1 и 2.

Данные параметры подобраны эмпирическим путем. Выход за пределы установленных диапазонов в значительной степени увеличивает или уменьшает значения припусков и применение этих параметров становится нецелесообразным.

В соответствии с выбранной методикой вначале устанавливается значение α_1 . С этой целью определяются значения припусков Δ для всего диапазона $\alpha_1' 12 \dots 19^\circ$ с шагом 1° при установленных $r_0 = 100\text{мм}$ и $k = 6.5\text{мм}$. В результате получается массив значений припусков Δ для всех заданных значений α_1 левой (вогнутой) и правой (выпуклой) сторон впадины арочного зуба по всей высоте.

Таблица 1 – Параметры цилиндрического колеса с арочными зубьями.

Параметр	Наим.	Значение
Модуль, мм	m	8
Число зубьев	z	36
Угол зацепления, град	α	20
Ширина зубчатого венца, мм	b	100
Радиус кривизны зуба, мм	r_c	100

Таблица 2 – Диапазоны значений параметров режущих инструментов.

Наименование	$\alpha_1', \text{ }^\circ$	$r_0, \text{ мм}$	$k, \text{ мм}$
Диапазон	12..19	92..100	4..7
Шаг	1	1	0,1

Используя полученные значения можно определить суммы припусков $\sum \Delta$ и суммы амплитуд колебаний $\sum A_\Delta$ для каждой из сторон. В частности, для колеса с заданными выше параметрами в таблице 3 и на рисунке 5 представлены полученные значения.

Таблица 3 – Параметры сумм припусков и амплитуд колебаний припусков в зависимости от значений α_1 .

№	$\alpha_1, \text{ }^\circ$	$\sum \Delta$		$\sum A_\Delta$	
		лев.	прав	лев	прав
	2	3	4	5	6
1	12	20,66	29,78	6,72	2,67
2	13	20,70	29,81	6,63	2,67
3	14	20,76	29,84	6,54	2,66
4	15	20,82	29,89	6,45	2,66
5	16	20,89	29,94	6,35	2,70
6	17	20,97	30,00	6,30	2,78
7	18	21,05	30,06	6,29	2,85
8	19	21,14	30,14	6,29	2,85

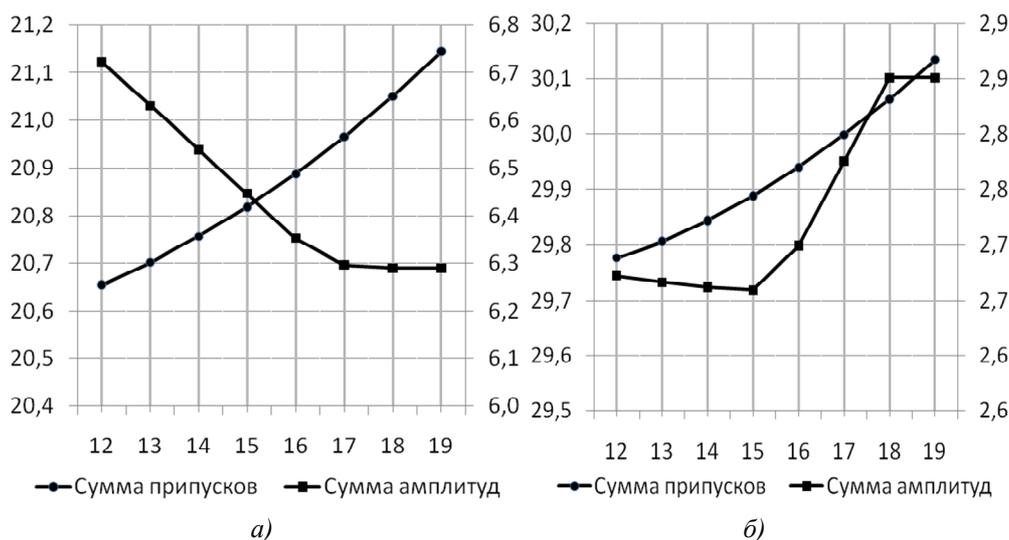


Рисунок 4 – Суммы припусков и суммы амплитуд припусков для а) правой (вогнутой) и б) левой (выпуклой) сторон впадины

Исходя из графиков на рисунке 4, устанавливаются значения параметра α_1 , при котором значения $\sum \Delta$ и $\sum A_\Delta$ минимальны (если показания прямо пропорциональны) или

вблизи точки пересечения графиков (если показания обратно пропорциональны). В частности, для левой стороны впадины оптимальным углом является $\alpha_1=15^\circ$, а для правой – $\alpha_1=12^\circ$.

Следующим шагом методики управления припусками является определение оптимальных значений r_o . Для этого необходимо определить припуски Δ для каждого из ряда значений радиуса резцовой головки r_o (92..100 мм, шаг 1 мм) с установленным ранее параметром α_1 . Поскольку радиус резцовой головки может быть только один для обеих сторон режущего зуба, то для основного расчета принимаем полученное ранее значение $\alpha_1=15^\circ$ для левой стороны зуба.

На основе значений припусков определяется их сумма и сумма амплитудных значений. Однако, радиус резцовой головки r_o в значительной степени влияет на сумму амплитуд $\sum A_\Delta$ и в минимальной – на $\sum \Delta$, поэтому в расчете значением $\sum \Delta$ можно пренебречь. Результаты приведены на рисунке 5.

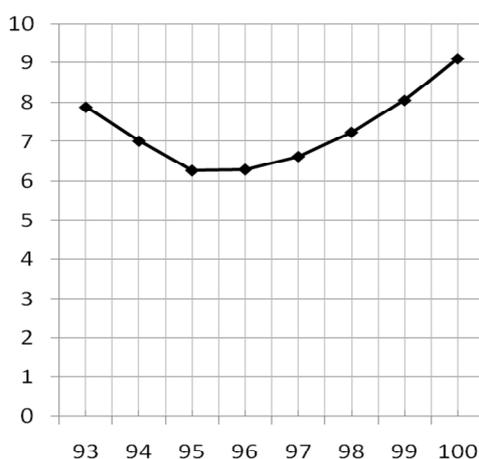


Рисунок 5 – Сумма амплитуд припусков $\sum A_\Delta$ для каждого значения r_o

По полученным данным, представленным на рисунке 5, необходимо определить значение r_o с минимальным значением $\sum A_\Delta$. В данном случае $r_o = 95$ мм.

В методике повторение цикла поиска параметра α_1 уже с найденным значением r_o . В результате повторного расчета искомые параметры отличаются от определенных на первом этапе. В частности, для левой стороны впадины $\alpha_1=12^\circ$, а для правой – $\alpha_1=17^\circ$.

По найденным значениям параметров α_1 и r_o определяется угол ψ при минимальном значении припуска по высоте зуба в центральном и торцевом сечениях. При полученных параметрах зубчатого колеса и РИ $\psi = 20,4^\circ$ – для левой стороны впадины зуба и $\psi=0^\circ$ – для правой.

В результате, выявлены практически все значения параметров, необходимые, для расчета значений припусков по методике, представленной в работе [5]. Неизвестные – это припуск Δ и коэффициент k ширины профиля режущего зуба по делительному.

Чистовая обработка в большинстве случаев производится после термообработки (объемной закалки или закалки ТВЧ) сверхтвердыми материалами или шлифованием припуск для которой выбирается по справочной литературе. В частности после закалки ТВЧ $\Delta = 0,5$ мм.

Для определения параметра k необходимо:

- 1) Задать ряд значений k и определить при установленных значениях ψ , α_1 , r_o , припуски Δ .
- 2) Определить, значение k , при котором рассчитанный припуск больше заданного и максимально приближен к нему.

Таким образом, применение разработанной методики позволит определять при исходных конструктивных данных колеса с арочными зубьями такие параметры режущего инструмента для черновой обработки, при которых минимизируются припуски под чистовую обработку и диапазон их колебаний по высоте и по длине зуба. В результате ее применения значительной мере решает проблему управления припусками под чистовую обработку и в дальнейшем позволит рассчитать силы резания, точность и шероховатость обрабатываемых эвольвентных поверхностей арочных зубьев цилиндрических передач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. Российская Федерация 2404030 МПК B23F9/00 Способ изготовления цилиндрических колес с арочными зубьями / Плахтин В.Д., Панков И.Г., Давыдов А.П., Марголит Р.Б., Паршин А.Н., Липатов С.И.; Заявитель и патентообладатель: ООО НПО «Зубчатые трансмиссии», ООО «Станкон» – № 2009114308/02; заявл. 16.04.2009; опубл. 20.11.2010. – Бюл. № 32.
2. Рубин, П.С. Разработка математического отображения схемы формообразования арочных зубьев цилиндрических колес резовыми головками с нулевым углом профиля режущей кромки / П.С. Рубин, А.В. Онищенко // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2012. – № 3–3 (293). – С. 15–19.
3. Рубин, П.С. Перспективы развития способов обработки цилиндрических колес с арочными зубьями / П.С. Рубин, Тарапанов А.С. // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2012. – № 6 (296). – С. 75 – 80.
4. Рубин, П.С. Выбор варианта черновой обработки цилиндрических колес с арочными зубьями / П.С. Рубин, О.А. Макалова, А.Н. Качанов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2013. – № 6. – С. 78 – 86.
5. Рубин, П.С. Припуски под чистовую обработку цилиндрических колес с арочными зубьями / П.С. Рубин, А.С. Тарапанов // *Мир транспорта и технологических машин*. – 2014. – №1 (44). – С. 76 – 83.

Рубин Павел Сергеевич

Государственный университет – УНПК, г. Орел
Аспирант кафедры «Конструкторско – технологическое обеспечение машиностроительных производств»,
E-mail: paulus_rub@mail.ru

Тарапанов Александр Сергеевич

Государственный университет – УНПК, г. Орел
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Конструкторско – технологическое обеспечение машиностроительных производств»,
E-mail: tarapanov@rambler.ru

P.S. RUBIN, A.S. TARAPANOV

PROBLEMS OF ALLOWANCE FOR FINISHING CYLINDRICAL WHEELS WITH ARCHED TEETH

The problems of process management allowances and solution methods for defining the parameters of the cutting tool at specified Parameters arch gear and machining allowance for finishing cylindrical gears with arched teeth.

Keywords: *arched tooth, spur gear, cutter head, roughing, finishing allowance, management allowances.*

BIBLIOGRAPHY

1. Pat. Rossiyskaya Federatsiya 2404030 MPK B23F9/00 Sposob izgotovleniya tsilindricheskikh koles s arochnymi zub'yami / Plakhtin V.D., Pankov I.G., Davydov A.P., Margolit R.B., Parshin A.N., Lipatov S.I.; Za-yavitel' i patentoobladatel': ООО NPO «Zubchatyye transm issii», ООО «Stankon» – № 2009114308/02; zayavl. 16.04.2009; opubl. 20.11.2010. – Byul. №32.
2. Rubin, P.S. Razrabotka matematicheskogo otobrazheniya skhemy formoobrazovaniya arochnykh zub'yev tsi-lindricheskikh koles reztsovyimi golovkami s nulevym uglom profilya rezhushchey kromki / P.S. Rubin, A.V. Oni-shchenko // *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii*. – 2012. – № 3–3 (293). – S. 15–19.
3. Rubin, P.S. Perspektivy razvitiya sposobov obrabotki tsilindricheskikh koles s arochnymi zub'yami / P.S. Rubin, Tarapanov A.S. // *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii*. – 2012. – № 6 (296). – S. 75 – 80.
4. Rubin, P.S. Vybor varianta chernovoy obrabotki tsilindricheskikh koles s arochnymi zub'yami / P.S. Rubin, O.A. Makalova, A.N. Kachanov // *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii*. – 2013. – № 6. – S. 78 – 86.
5. Rubin, P.S. Pripuski pod chistovuyu obrabotku tsilindricheskikh koles s arochnymi zub'yami / P.S. Rubin, A.S. Tarapanov // *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin*. – 2014. – № 1 (44). – S. 76 – 83.

Rubin Pavel Sergeevich

FSEI HVT «State University – ESPC», Orel
The postgraduate of the Department " Design – processing software engineering industries",
E-mail: paulus_rub@mail.ru

Tarapanov Alexander Sergeevich

FSEI HVT «State University – ESPC», Orel
The Doctor of Technical Sciences, professor, professor of the Department " Design – processing software engineering industries ",
E-mail: tarapanov@rambler.ru

С.В. ГЕРОВА

ПРОДЛЕНИЕ РЕСУРСА ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РЕМОНТНО–ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Рассмотрены основные методы нанесения защитных покрытий на лопатки турбин. Предложена последовательность выполнения метода нанесения теплозащитного покрытия с формированием жаростойкого подслоя.

Ключевые слова: лопатки, жаростойкие покрытия, теплозащитные покрытия, прочность, выносливость, ресурс.

Продление ресурса турбинных лопаток газотурбинных установок путем восстановительной технологии, обеспечивающей улучшение функциональных характеристик структуры поверхности деталей – одна из актуальных комплексных и экономически выгодных задач машиностроения. Решением такой задачи является совершенствование технологии ремонта лопаток с применением современных методов диагностики и восстановления деталей.

Широко используемые технологии ремонта лопаток турбин гарантируют ресурс отремонтированных лопаток, составляющий около 50% от назначенного ресурса нового комплекта лопаток. Однако этот показатель можно увеличить за счёт нанесения жаростойких и теплозащитных покрытий на уже отремонтированные лопатки.

При исследовании путей решения поставленной задачи были рассмотрены методы оценки предельной жаропрочности по методу В. И. Трефилова, иерархия структурных уровней высокотемпературных материалов, описанная академиком В. В. Скороходом, основные направления повышения прочности по Декеру, проанализированы современные методы контроля состояния сопловых и рабочих лопаток газовых турбин, а также методы нанесения защитных покрытий.

К основным методам нанесения защитных покрытий относятся:

1) Метод порошков (метод диффузионного насыщения, метод твердофазной диффузии и т.п.).

Порошок металла (сплав), активатора (галоидной соли), иногда и наполнителя (для предотвращения спекания порошка) вместе с деталью погружают в контейнер, а контейнер – в печь. В среде вакуума, инертного газа или водорода (а для герметичного контейнера – воздуха) проводят определенную термообработку. Затем детали выгружают, очищают и отжигают. Иногда последнюю операцию не проводят, но в большинстве методов необходим повторный нагрев: для снятия напряжений, проплавления пористых покрытий или проведения диффузионного отжига в вакуумных камерах или в камерах с защитной атмосферой.

При диффузионном насыщении алюминием никелевого сплава происходит диссоциация активатора $\text{NH}_4\text{NH}_3 + \text{HCl}$ и образование летучего AlCl_3 , последний путем нескольких промежуточных реакций отщепляет активный атомарный Al на поверхности детали, что приводит к образованию алюминидов никеля Ni. Состав системы «основание – покрытие» для алитирования таков: $\text{Ni}/\text{NO}_3\text{Al}/\text{Ni}_2\text{Al}_3/\text{NiAl}$ или $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{NiAl}_2\text{O}_4$. Фаза NiAl (моноалюминид никеля) наиболее желательна – она имеет высокую температуру плавления и образует плотную окисную пленку. Для повышения устойчивости моноалюминид никеля NiAl дополнительно легируют элементами, образующими тугоплавкие комплексные фазы, связывающие Al в более стойкие соединения (Si, Ta). При работе происходит диффузия алюминия Al к основе и никеля Ni в покрытие, которое постепенно теряет свои защитные свойства ($\text{NiAl} + 2\text{Ni} \rightarrow \text{Ni}_3\text{Al}$, Ni_3Al обладает значительно более низкой жаростойкостью; хром Cr, правда, повышает жаростойкость Ni_3Al до уровня NiAl). Для замедления диффузии Ni наносят барьерные слои между основой и жаростойким покрытием (Co, Pt, Ta, Nb), но эти слои часто уменьшают сцепляемость и их нанесение требует применения других методов.

Достоинствами метода порошков являются:

- а) дешевизна;
- б) простота;
- в) получение равномерного по глубине и составу слоя, независимо от конфигурации деталей, покрытий (в т.ч. в замкнутых полостях и на труднодоступных поверхностях);
- г) возможность оконтуровать (залечивать) мелкие дефекты поверхности.

Недостатки:

- а) затруднены регулирование содержания алюминия в покрытии и возможность контролировать процесс в целом;
- б) сложность ввода в состав покрытия некоторых полезных лигатур (некоторые, как например РЗМ и иттрий, практически нельзя ввести в покрытие);
- в) малая теплопроводность насыщающей смеси приводит к низкой скорости охлаждения и ограничивает применение высоких температур;
- г) необходимость сложной термообработки, многостадийность процессов, связанная с процессами ввода в состав покрытия некоторых полезных лигатур, и малая теплопроводность насыщающей смеси приводит к ухудшению прочностных характеристик;
- д) невысокая производительность.

2) Шликерный метод – суспензия, состоящая из порошка, металла, сплава (иногда с добавками окисла) и лака с растворителем (амилацетат, нитроцеллюлоза, коллоксилин, н-ксилол и полистирол и т.п.), наносится на деталь при комнатной температуре. Суспензию наносят кисточкой, распылением или окунанием. Затем следует сушка и диффузионный отжиг. При нагревании выше, примерно 315 °С, лак разлагается, а при дальнейшем нагреве (для алюминидных покрытий ~1100 °С) происходит непосредственное взаимодействие наносимой смеси с подложкой. Отжиг производится обычно в инертной атмосфере или вакууме.

Метод обладает достоинствами метода порошков, кроме того, в известных пределах позволяет регулировать содержание алюминия в смеси и расширить применение полезных компонентов, а также наносить покрытие на определенных участках, что можно использовать при ремонтах.

Однако испарение органической составляющей приводит к образованию микроплоскостей, существенно уменьшая эрозионную и коррозионную стойкость, кроме того, затруднено достижение равномерной толщины покрытия на детали.

3) Метод электрофореза близок к шликерному методу. В этом методе в суспензию с алюминиевым порошком подается напряжение и на деталь (анод), осаждается алюминий и другие требуемые компоненты. Изменение сопротивления в процессе формирования слоя уменьшает осаждение и выравнивает толщину на разных участках. Затем следует сушка и диффузионная термообработка в вакууме, аргоне или водороде при 1040–1100 °С (8.2.5; 8.2.6).

4) Металлизация в расплавах солей – электролитический процесс (деталь – катод) при высоких температурах, в ходе которого идут химические реакции и диффузионные процессы. Поддается регулировке с изменением времени нанесения, температуры и напряжения. Не требует особой подготовки поверхности, т.к. расплавленная соль растворяет окалину, но как и в методе горячего окунания необходим особый контроль чистоты ванны. Методы горячего окунания и металлизации в расплавах солей позволяют применять для покрытия только сравнительно простые композиции.

В вышеизложенных методах содержание алюминия выше 31–37 % (отвечающее моноалюминиду никеля), приводит к заметному снижению прочностных и пластических свойств покрытий, уменьшает сопротивление термической усталости и выносливости. Имеется тенденция к снижению содержания алюминия до 12–14 %, но это ухудшает защитные свойства. Покрытие толщиной 0,04 мм, имеющее в своем составе 34–36 % алюминия, на работающих агрегатах при температуре 700–900 °С служит в 1,5 раза дольше, чем покрытие, отличающиеся только более низким (20–24 %) содержанием алюминия.

Уменьшение содержания алюминия в определенных пределах можно компенсировать легированием хромом, кремнием и некоторыми другими элементами, и увеличением толщины, которое может быть ориентировочно рассчитано. Но получение содержания алюминия менее 18 % и достижение требуемых защитных свойств методами, в которых диффузионное

насыщение – основной этап процесса нанесения покрытий, технологически сложно, причем эта сложность резко возрастает с уменьшением содержания алюминия и приводит к необходимости применения более высоких температур и увеличения времени насыщения, а это ухудшает свойства основы. Такие покрытия требуют применения других методов нанесения, в частности, вакуумных методов и плазменного напыления.

Вакуум требуется при некоторых стадиях нанесения покрытий и в других методах. Вакуумные методы требуют применения разряжения $10^{-2} - 10^{-5}$ Па, для проведения процесса полностью или для основных стадий процесса.

5) Катодное распыление. Материал покрытия бомбардируется положительными ионами и оседает на деталь.

Достоинства:

- а) возможность полной очистки поверхности непосредственно перед нанесением;
- б) универсальность, возможность применять почти любые материалы и любые подложки;
- в) высокая адгезия и однородность покрытий.

Основной недостаток метода – низкая скорость конденсации.

б) Термическое напыление (физическое осаждение из паровой фазы): наносимый металл испаряется в вакууме ($10^{-2}-10^{-3}$ Па) до создания давления пара металла ~ 1 Па, металл осаждается на поверхности, нагретой до ~ 200 °С подложки. Метод отличается высокой производительностью, возможностью наносить многослойные, комбинационные покрытия на любой материал в одной вакуумной установке, достигается высокая однородность и чистота покрытия. К недостаткам можно отнести сложность установки, большие потери наносимого металла; трудность достижения однородной толщины на деталях сложной конфигурации.

7) Ионная имплантация – термическое напыление в газовом тлеющем разряде, при котором на подложку подается отрицательный потенциал, относительно тигля с испаряемым металлом. Часть паров металла ионизируется в разряде и оседает на подложке. Среда: аргон, неон, гелий (давление $\sim 10^{-1}$ Па). Испарение металла может быть резистивным (пропусканием тока), электронно–лучевым и электронно–дуговым.

Метод позволяет очищать поверхность положительными ионами непосредственно перед нанесением покрытия, достигается высокая адгезия, равномерность наносимого слоя и экономное расходование.

Основной недостаток – сложность оборудования, в частности необходимость в мощной электронной пушке и вакууме $10^{-4}-10^{-5}$ Па до заполнения камеры инертным газом.

8) Вакуумно–диффузионная металлизация. Независимо от метода подачи наносимого материала, температура подложки близка к температуре солидуса (равновесию твердой и жидкой фаз), при которой происходит интенсивная диффузия между основой и покрытием. Метод дает высокую адгезию, однако имеется опасность некомпенсированной диффузии и образования пор Киркендала, что наоборот резко уменьшает сцепление.

9) Электронно–лучевой метод. Метод требует применения электронной пушки – устройства, в котором вольфрамовый катод эмитирует поток электронов, после фокусировки двигающихся по искривленной траектории к поверхности испарителя. Электронный луч, сканируемый магнитной отклоняющей системой, испаряет практически любые вещества. Метод позволяет наносить композиции заданного состава, в частности, наиболее эффективные по жаростойкости Mo–Cr–Al–Y (Al–12–15 %), где Mo, Co, Ni или сочетание Co–Ni можно также вводить в смесь ZrO₂ и др. неметаллические, и в т.ч. тугоплавкие, компоненты. Основной недостаток – высокая сложность установки [5].

В отличие от широко применяемых жаростойких покрытий, теплозащитные покрытия защищают не только поверхность лопаток от высокотемпературной коррозии, но и материал лопатки от разупрочнения в результате воздействия высоких температур. Использование теплозащитных покрытий позволяет понизить температуру лопаток и увеличить их долговечность. При формировании теплозащитного покрытия должна быть соблюдена следующая

последовательность: проводится ионно–имплантационная обработка поверхности лопатки; вакуумно–плазменное нанесение жаростойкого слоя и последующая термообработка покрытия; ионно–имплантационная обработка поверхности лопатки ионами, по крайней мере, одного из элементов N, Pd, Ag, Nb, Pt, Yb, Y, La, Hf, Cr, Si. При нанесении теплозащитного покрытия таким методом повышается выносливость и циклическая прочность лопатки, что позволяет продлить гарантированный ресурс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корж, В.В. Газотурбинные установки: учеб. пособие / В.В. Корж. – Ухта: УГТУ. – 2010. – 180 с.
2. Газоперекачивающие агрегаты магистральных газопроводов: учебное пособие / М.Б. Хадиев. – Казань. – 2004. – 300 с.
3. Сулима, А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Д.Ю. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988 – 240 с.
4. Панин, В.Е. Поверхностные слои как синергетический активатор пластического течения нагруженного тела / В.Е. Панин. – МиТОМ. – 2005. – № 7. – С. 62–68.
5. Вячеславова, О.Ф. Современные технологии обработки материалов / О.Ф. Вячеславова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 2. – С. 34–43.

Герова Светлана Валерьевна

Магистрант

Брянский государственный технический университет

Тел. +7 920 860 28 89

E-mail: svetger111@gmail.com

S.V. GEROVA

EXTENDED LIFE TURBINE BLADES BY IMPROVING REPAIR AND REHABILITATION TECHNOLOGY

The basic methods for applying protective coatings on turbine blades. The sequence of execution of the method applying thermal barrier coating to form a heat-resistant underlayer.

Keywords: *blade, heat-resistant surface, heat-resistant coatings, strength, endurance, resource.*

BIBLIOGRAPHY

1. Korzh, V.V. Gazoturbinnyye ustanovki: ucheb. posobiye / V.V. Korzh. – Ukhta: UGTU. – 2010. – 180 s.
2. Gazoperekachivayushchiye agregaty magistral'nykh gazoprovodov: uchebnoye posobiye / M.B. Khadiyev. – Kazan. – 2004. – 300 s.
3. Sulima, A.M. Poverkhnostnyy sloy i ekspluatatsionnyye svoystva detaley mashin / A.M. Sulima, V.A. Shulov, D.YU. Yagodkin. – M.: Mashinostroyeniye, 1988 – 240 s.
4. Panin, V.Ye. Poverkhnostnyye sloi kak sinergeticheskiy aktivator plasticheskogo techeniya nagruzhen-nogo tela / V.Ye. Panin. – MiTOM. – 2005. – № 7. – S. 62–68.
5. Vyacheslavova, O.F. Sovremennyye tekhnologii obrabotki materialov / O.F. Vyacheslavova // Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya. – 2006. – № 2. – S. 34–43.

Gerova Svetlana Valer'yevna

Magistrant of Bryansk State Technical University

Phone: +7 920 860 28 89

E-mail: svetger111@gmail.com

М.А. БУРНАШОВ, А.Н. ПРЕЖБИЛОВ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ЛЕДЯНОЙ ЧАСТИЦЫ ПРИ ВОДОЛЕДЯНОЙ ОЧИСТКЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

В статье рассмотрены энергетические и температурные процессы, происходящие при взаимодействии ледяной частицы с удаляемым материалом. Предложена методика определения энергии, затраченной на нагрев частицы льда в процессе водоледяной очистки деталей машин.

Ключевые слова: водоледяная очистка, исследование частиц, ледяная частица, энергия разрушения покрытия, взаимодействие частицы льда с материалом покрытия.

Механизм разрушения материала покрытия под действием водоледяной струи определяется многофазным характером высокоскоростного потока (вода – частицы льда). При этом струя воды, затратив часть своей энергии на разгон частиц льда, способна создать в разрушаемом материале напряжения соизмеримые с его прочностью. В то же время, частицы льда, осуществляют ударное воздействие на материал, образуя в нем микротрещины, являющиеся концентраторами напряжения, что способствует повышению эффективности очистки в целом.

Очистка поверхностей деталей машин водоледяной струей включает в себя целый ряд сложных физических процессов, основными из которых являются: удар, внедрение и движение

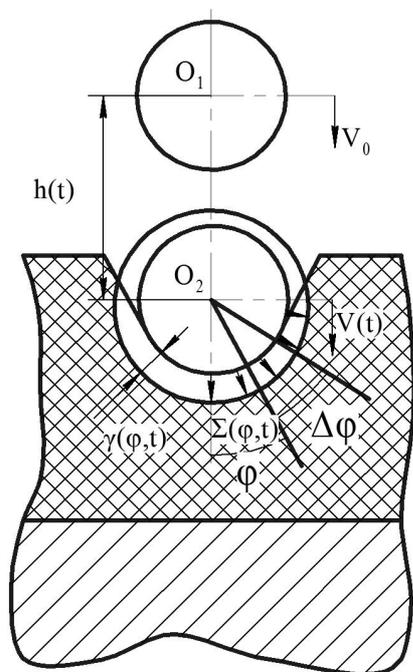


Рисунок 1 – Расчетная схема процесса взаимодействия частицы льда с удаляемым покрытием

частицы льда вдоль поверхности взаимодействия, нагрев частицы льда, сопровождающийся обратным фазовым переходом (таянием), конечное разрушение частицы льда о твердый материал детали и т.д. Поэтому целесообразно рассмотреть процесс единичного взаимодействия частицы льда с удаляемым материалом покрытия и, обобщить полученный результат на весь процесс очистки с целью определения его производительности. Однако, необходимо учесть, что каждый единичный акт взаимодействия частицы льда с удаляемым материалом, подобен предыдущему с некоторым коэффициентом подобия, зависящим от начальных условий взаимодействия.

Вся генерируемая при ударном взаимодействии энергия в замкнутой системе «частица льда – разрушаемый материал – материал детали», преобразуется в тепловой поток и работу резания. Определение доли энергии, затраченной на нагрев частицы льда, который сопровождается возникновением локальных зон обратного фазового перехода (ОФП) льда и на нагрев материала представляет особый интерес.

Загрязняющие покрытия обладают низкой способностью к теплопередаче, следовательно, определяющей механические и теплофизические свойства материала

покрытий будет являться температура контактной поверхности «частица льда – материал».

Схема процесса взаимодействия частицы льда с покрытием представлена на рисунке 1.

Уравнение движения частицы льда в удаляемом материале запишется в следующем виде:

$$m(t) \frac{dV}{dt} = -\frac{1}{2} C_x \rho_c (T) S(h) V^2(t) - \sigma_{comp}(t) S(h) - F_{mp}(t, \varphi); \quad (1)$$

где: $m(t)$ – текущее значение массы частицы льда с учетом ОФП на контактирующей поверхности;

$V(t)$ – текущее значение скорости проникания;

C_x – коэффициент лобового сопротивления частицы льда;

$S(h, \varphi)$ – текущее значение проекции площади сечения частицы льда с учетом глубины проникания и наличия ОФП на элементарной площадке в пределах телесного угла $\Delta\varphi$:

$$S(h, \varphi) = \pi R^2(t, \varphi) \cdot \left[\frac{h(t)}{R(t, \varphi)} H(R - h) + H(h - R) \right]; \quad (2)$$

где: $h(t), R(t)$ – функции глубины проникания и текущего радиуса частицы льда с учетом ОФП соответственно;

$H(...)$ – функция Хевисайда.

Первое слагаемое правой части выражения (1) характеризует потерю кинетической энергии ледяной частицы при взаимодействии с материалом. Второе слагаемое отражает сопротивление материала разрушающему воздействию, а третье – силу трения, действующую на частицу при проникновении в удаляемый материал.

Для рассматриваемой схемы движения частицы льда в материале при наличии фазовых переходов на контактной поверхности, сила трения будет зависеть от наличия жидкой фазы:

$$F_{mp}(t, \varphi) = f_V(t) \sigma_r(t, \varphi) S(h, \varphi) \cdot H[dA(t, \varphi) - (q + C_V \Delta T_1) dm(t, \varphi)] + 2\mu_1 \frac{V(t, \varphi)}{\gamma(t, \varphi)} S(h, \varphi) \cdot H[(q + C_V \Delta T_1) dm(t, \varphi) + dA(t, \varphi)] \quad (3)$$

$$\sigma_x(t, \varphi) = \frac{1}{2} \rho_c(t) V^2(t, \varphi); \quad (4)$$

$$\sigma_r(t, \varphi) = \frac{v_x}{1 - v_n} \sigma_x(t, \varphi);$$

где: $(q + C_V \Delta T_1) dm(t, \varphi)$ – значение энергии, необходимой для перевода твердой фазы сферического слоя массой dm в жидкое состояние;

μ_1 – коэффициент динамической вязкости жидкой фазы;

γ – размер зазора между поверхностью частицы льда и профилем каверны в преграде.

Значение γ в пределах дискретной угловой координаты $\Delta\varphi$ определяется массой твердой фазы, ограниченной поверхностью в виде шарового слоя, «теряемой» в каждый дискретный момент времени.

$f_V(T)$ – функция скоростного коэффициента трения;

$\sigma_x(t, \varphi)$ – значение осевого напряжения на поверхности контакта частицы льда с преградой, в общем случае, равно давлению скоростного напора;

$\sigma_r(t, \varphi)$ – значение радиального напряжения на поверхности контакта частицы льда с преградой.

Работа сил сопротивления, определяющая интенсивность разогрева контактной зоны, представляется следующей суммой:

$$A(t, \varphi) = A_1(t, \varphi) + A_2(t, \varphi) + A_3(t, \varphi), \quad (5)$$

где: $A_1(t, \varphi), A_2(t, \varphi), A_3(t, \varphi)$ – работа инерционной составляющей силы сопротивления, работа силы трения и работа сил сопротивления пластическому деформированию покрытия соответственно [120].

Изменение размера частицы льда при очистке в пределах угловой координаты φ определяется по следующей зависимости:

$$d(t, \varphi) = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi\rho_l} \left(m(t) - \int_0^{\frac{\pi}{2}} m_l(\varphi) d\varphi \right)}; \quad (6)$$

где: ρ_l – плотность частицы льда; $m_l(\varphi)$ – масса частицы льда, «потерянная»,

$$A(t, \varphi) = Q(t, \varphi) \quad (7)$$

где: $Q(t, \varphi)$ – тепловая энергия системы контактирующих тел.

В соответствии с условием переноса тепла через граничную поверхность двух контактирующих тел при идеальном тепловом контакте [4] и законом сохранения энергии количество тепла, перешедшее в частицу льда, и соответствующее изменение её массы определяются:

$$dQ_1(t, \varphi) = \frac{v_m}{v_l} dA(t, \varphi); \quad (8)$$

$$m(t) = m(t - \tau) - \int_0^{\varphi_k} \frac{Q_1(t, \varphi)}{q + C_V^m \Delta T_1} d\varphi,$$

где: ΔT_1 – диапазон изменения температуры контактного слоя частицы льда, определяющего момент ОФП ($\Delta T_1 = T_{ОФП} - T_{01}$;

$T_{ОФП}$ – температура ОФП;

T_{01} – начальная температура частицы льда);

m_0 – начальная масса частицы льда.

Учитывая, что рассмотренный единичный акт взаимодействия ледяной частицы с разрушаемым материалом покрытия подобен остальным, с учетом некоторого коэффициента подобия, становится возможным вычислить процент энергии, затраченной на нагрев частицы льда, который сопровождается возникновением локальных зон обратного фазового перехода (ОФП) льда и на нагрев материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурнашов, М.А. Очистка поверхностей высоконапорной водоледяной струей с заранее подготовленными частицами льда / М.А. Бурнашов, Ю.С. Степанов, А.Н. Прежбилов, С.Д. Усмонов // *Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии: Материалы международной науч.-техн. конф. Липецк: Изд-во ЛГТУ. – 2012. – Ч. 2. – С. 7–11.*
2. Бурнашов, М.А. Теоретическое обоснование развития метода очистки поверхности деталей машин высоконапорной водоледяной струей с заранее подготовленными частицами льда / М.А. Бурнашов, Ю.С. Степанов, А.Н. Прежбилов // *Технологическое обеспечение машиностроительных производств: сборник научных трудов первой международной заочной научно-технической конференции. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. – 2014. – С. 468–471.*
3. Бурнашов, М.А. Метод очистки поверхности водоледяной струей с заранее подготовленными частицами льда и оборудование для него / М.А. Бурнашов, А.Н. Прежбилов // *Мир транспорта и технологических машин. – 2013. – № 2(41). – С. 66–70.*
4. Бурнашов, М.А. Технологии и оборудование для разрезания рулонных и листовых неметаллических материалов водолеяными струями высокого давления: дисс... док. техн. наук. – Орел. – 2009. – 316 с.

Бурнашов Михаил Анатольевич
Технологический институт имени Н.Н. Поликарпова
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»
302020, Орел, ул. Московская, д. 34
Д.т.н., профессор кафедры «КТОМП»
Телефон: (4862)54–15–03

Прежбилов Александр Николаевич
Инженер ЗАО «Научприбор», г. Орел
Телефон: 89536231439
E-mail: stker@rambler.ru

M.A. BURNASHOV, A.N. PREZHBILOV

THE POWER ANALYSIS OF PROCESS OF HEATING OF THE ICE PARTICLE AT WATER ICE CLEANING OF DETAILS

In article the power and temperature processes happening at interaction of an ice particle to a deleted material are considered. The technique of determination of the energy spent for heating of a particle of ice in the course of water ice cleaning of details of cars is offered.

Keywords: *water ice cleaning, research of particles, ice particle, energy of destruction of a covering, interaction of a particle of ice with a covering material.*

BIBLIOGRAPHY

1. Burnashov, M.A. Ochistka poverkhnostev vysokonapornov vodoledyanov struyev s zaraneve podgotovlennymi chastitsami l'da / M.A. Burnashov, Yu.S. Stepanov, A.N. Prezhbilov, S.D. Usmonov // *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy modernizatsii sovremennogo mashinostroyeniya i metallurgii: Materialy mezhhdunarodnoy nauch.-tekhn. konf. Lipetsk: Izd-vo LGTU. – 2012. – Ch. 2. – S. 7–11.*
2. Burnashov, M.A. Teoreticheskoye obosnovaniye razvitiya metoda ochistki poverkhnosti detaley mashin vysokonapornov vodoledyanov struyev s zaraneve podgotovlennymi chastitsami l'da / M.A. Burnashov, Yu.S. Stepanov, A.N. Prezhbilov // *Tekhnologicheskoye obespecheniye mashinostroitel'nykh proizvodstv: sbornik nauchnykh trudov pervoy mezhhdunarodnoy zaochnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Chelyabinsk: Izdatel'skiy tsentr YUUrGU. – 2014. – S. 468–471.*
3. Burnashov, M.A. Metod ochistki poverkhnosti vodoledyanov struyev s zaraneve podgotovlennymi chastitsami l'da i oborudovaniye dlya nego / M.A. Burnashov, A.N. Prezhbilov // *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. Orel: Gosuniversitet-UNPK. – 2013. – № 2(41). – S. 66–70.*
4. Burnashov, M.A. Tekhnologii i oborudovaniye dlya razrezaniya rulonnykh i listovykh nemetallicheskih materialov vodoledyanymi struyami vysokogo davleniya: diss... dok. tekhn. nauk. – Orel. – 2009. – 316 s.

Burnashov Michael Anatolievich
Technological Institute of the NN Polikarpov FGBOU
VPO "State University – ESPC"
302020, Eagle Street, Moscow, d. 34
Ph.D., professor of "KTOMP"
Telephone: (4862) 54–15–03

Prezhbilov Alexander Nikolaevich
Engineer of JSC "Nauchpribor" Orel
Phone: 89536231439
E-mail: stker@rambler.ru

А.М. МИМОНОВ, Е.А. ЗВЯГИНА

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВКИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ БЫСТРОПЕРЕНАЛАЖИВАЕМОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В работе дана краткая историческая справка создания обрабатывающих центров, их характеристика, классификация, область применения. Рассмотрено преимущество применения обрабатывающих центров на примере механической обработки детали «Корпус» на ОАО «Промприбор».

Ключевые слова: обрабатывающий центр, технологический процесс, обработка детали, точность обработки, деталь.

Одним из важнейших факторов для успешной деятельности любого современного предприятия является наличие многофункционального оборудования необходимого для ускорения процесса производства изделий, включающего в себя огромное количество операций. Поэтому в последнее время на многих российских предприятиях на смену универсальному оборудованию приходят современные обрабатывающие центры (ОЦ).

Обрабатывающие центры впервые появились в США около 60 лет назад и использовались в авиационной промышленности, хотя создание обрабатывающих центров с числовым программным управлением приписывается итальянской компании А. Bulleri, которая первая в мире начала проводить эксперименты по использованию оборудования с ЧПУ в деревообрабатывающей отрасли. В 1968 году японская компания Shoda создала первый в мире обрабатывающий центр NC-111A, имевший горизонтальный стол и вертикальный фрезерный суппорт.

К обрабатывающим центрам относят многооперационные станки-автоматы, предназначенные для последовательного выполнения технологических операций различного характера, связанных с механической обработкой заготовок. При этом обработка изделий идет по программе, заданной заранее, за одну остановку и без остановок, используемых для промежуточной перенастройки и замены инструмента. Современные обрабатывающие центры могут обеспечить выполнение сразу несколько операций: точение, фрезерование, сверление и другие при одной установке и закреплении заготовки.

По назначению обрабатывающие центры можно разделить на 2 группы:

1. Для обработки тел вращения. При этом варианте исходная заготовка зажимается в шпинделе станка и вращается с заданной скоростью (как правило, от 5000 до 15000 оборотов в минуту). Механическая обработка производится аналогично механической обработке на токарном или шлифовальном станке;

2. Для обработки сложных корпусных деталей. Данный тип центров напоминает конструкцию фрезерно-расточных станков. Деталь неподвижно крепится на координатный стол, а шпиндель перемещается при помощи вспомогательных приводов. Самые современные модели могут обеспечить до 6 степеней свободы для инструмента и 5 для заготовки. Это дает возможность обрабатывать практически все поверхности детали самых сложных форм в кратчайшие сроки и с высокой точностью [1].

Отдельной группой стоят порталные обрабатывающие центры. Они предназначены для обработки крупных и массивных деталей, имеют узкие и длинные столы, которые перемещаются по рельсовым направляющим. В магазинах инструментов содержится до 180 видов труда, которые способны произвести обработку любой сложности. Широкое применение эти станки нашли в автомобильной, аэрокосмической промышленности и в судостроении, активно используются для изготовления пресс-форм и штампов, которые имеют повышенные требования к точности [2].

Компоновка обрабатывающего центра любой модели, помимо обычных параметров, определяется его технологическими возможностями. К ним относятся: размеры рабочего пространства, характеристика инструментального блока, емкость инструментального магазина, время смены инструмента, количество и размеры столов-спутников, тип системы управления, число одновременно управляемых координат и др.

Инструментальные магазины обрабатывающих центров могут содержать от 10 до 50 различных инструментов, что хватает для всех вариантов обработки [1].

Все обрабатывающие центры оснащены автоматическим сменщиком инструментов (АСИ). Емкость АСИ, как правило, составляет от 6 до 60 позиций. Это дает возможность на одном станке осуществлять полный цикл изготовления детали от черновой до чистовой обработки поверхности.

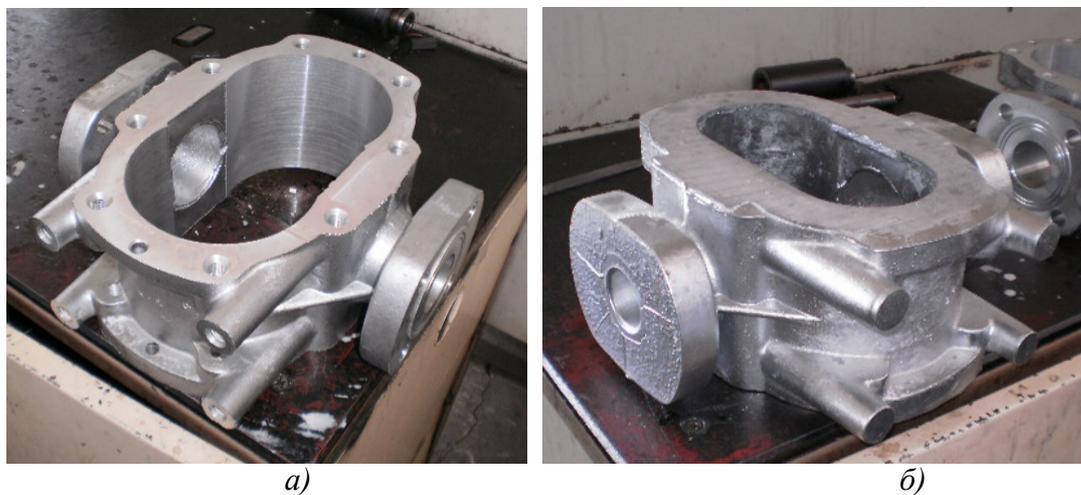
Большинство обрабатывающих центров имеет 3–мерную систему перемещения инструмента относительно детали. Для обработки изделий сложной формы предназначены 4–, 5– и 6– координатные ОЦ. Существуют центры и с 9–осевой обработкой. Обычно кроме линейных перемещений вдоль осей координат своим перемещением снабжены некоторые рабочие органы. Такие центры называют многоосевыми обрабатывающими центрами [3, 4].

Обрабатывающие центры стандартно комплектуются системой позиционирования и калибрования положения обрабатывающего инструмента, что экономит время, необходимое на подготовку и наладку станка.

Механическая обработка заготовок на обрабатывающих центрах имеет ряд особенностей. Высокие требования предъявляются к механизмам крепления заготовки. Так как обработка происходит на повышенных режимах резания, зажим заготовки должен обеспечивать ее надежную фиксацию, но при этом обеспечивать и доступ ко всем обрабатываемым поверхностям за один установ заготовки [1].

Обрабатывающие центры рекомендуется применять при мелко– и среднесерийном производстве, так как относятся к быстропереналаживаемому оборудованию.

Преимущества применения ОЦ можно рассмотреть на примере процесса обработки Корпуса 1.04.02.ППО40–0,6СУ из алюминиевого сплава АК5Н7 на ОАО «Промприбор», г. Ливны. Корпус является основной деталью счетчика жидкости, предназначенного для точного определения объемного количества учитываемого продукта. Технологический процесс механической обработки Корпуса состоит из операций обработки рабочей полости, торцовых поверхностей, входного и выходного патрубков, крепежных отверстий на торцах корпуса для присоединения передней и задней крышек (рисунок 1).



*Рисунок 1 – Корпус счетчика жидкости:
а) заготовка; б) деталь*

В таблице 1 представлены два варианта маршрута обработки корпуса.

Рассмотрим более подробно представленные варианты.

1–й вариант, который ранее применялся для обработки Корпуса на предприятии, состоит из 8–ми операций, выполняемых на универсальном и специальном оборудовании. Первые операции 005, 010, 015 связаны с формированием технологических баз. На шестипозиционном агрегатном станке ЗХА4912П растачивали рабочую полость детали, обрабатывали 8 отверстий М12 и 2 отверстия \varnothing Н8, расположенных на торцах корпуса, а также 4 отверстия М12, расположенных на бобышках корпуса (рисунок 2). На токарно–револьверном станке обрабатывали поверхности входного и выходного патрубков. Токарные операции 035 и 040 применяли для чистовой подрезки торца и точения канавки $b = 4,7$ мм.

Таблица 1 – Варианты маршрута обработки корпуса.

I вариант	II вариант
Наименование операции. Технологическое оборудование	Наименование операции. Технологическое оборудование
005 Фрезерная. Вертикально-фрезерный, 6P12	005 Фрезерно-сверлильно-расточная Обработывающий горизонтальный центр HECKERT CWK 630
010 Фрезерная. Вертикально-фрезерный, 6P12	010 Фрезерно-сверлильно-расточная Обработывающий вертикальный центр TOPPER TMV-610A
015 Сверлильная. Настольно-сверлильный 2A112	
020 Сверлильная. Настольно-сверлильный 2A112	
025 Агрегатная. Агрегатный 3XA4912П	
030. Токарная. Токарно-револьверный 1П365	
035. Токарная. Токарно-винторезный 16K25	
040. Токарная. Токарно-винторезный 1M63M1	



Рисунок 2 – Сверление 8 отверстий под резьбу М12 на шестипозиционном агрегатном станке 3XA4912П

2-й вариант обработки Корпуса, который сейчас применяется на производстве, состоит из 2-х операций, выполняемых на обрабатываемых центрах. Черновую обработку торцов, обработку 8-ми крепежных отверстий М12 и 2-х отверстий $\varnothing 9$, поверхностей входного и выходного патрубков и 4-х резьбовых отверстий М12, расположенных на бобышках корпуса выполняют на 2-х местном горизонтальном обрабатывающем центре HECKERT CWK 630. Обработку выполняют за 2 установка с неоднократным поворотом стола (рисунок 3). Для обеспечения свободного доступа режущего инструмента к обрабатываемым поверхностям применяют специальное приспособление. Чистовую обработку торца, точение канавки $b=4,7$ мм, чистовое растачивание рабочей полости, выполняют на вертикальном обрабатывающем центре TOPPER TMV-610A, (рисунок 4).

Наглядно видно, что применение обрабатывающих центров при обработке Корпуса позволило сократить количество операций и соответственно количество применяемого технологического оборудования, численность рабочих, высвободить производственную площадь.

Если сравнивать производительность обработки Корпуса на 6 позиционном агрегатном станке 3XA4912П с обработкой на обрабатывающих центрах при выполнении аналогичных операций, то обработка на агрегатном станке более производительна, чем на ОЦ. При расчете машинного времени установлено, что машинное время обработки детали на агрегатном станке составляет $T_m=3,96$ мин, что в 2,5 раза меньше, чем на обрабатывающих центрах ($T_m = 9,96$ мин). Это связано с тем, что для формирования резьбовых отверстий на агрегатном станке применяют многошпиндельные сверлильные и резьбонарезные головки, обработ-

ку поверхностей ведут одновременно с нескольких сторон. Обработку этих же поверхностей на ОЦ выполняют последовательно, что в целом увеличивает время, не смотря на интенсификацию режимов резания.

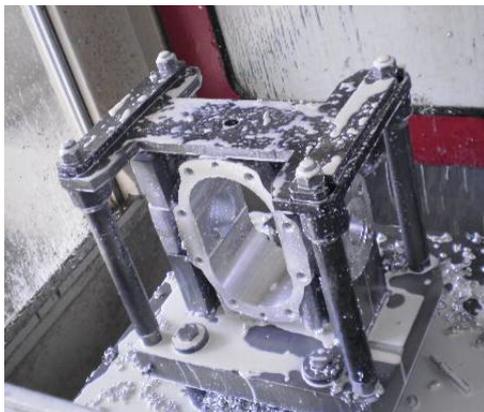


Рисунок 3 – Черновая обработка Корпуса на 2-х местном горизонтальном обрабатывающем центре HECKERT CWK 630



Рисунок 4 – Чистовая обработка Корпуса на вертикальном обрабатывающем центре TOPPER TMV-610A

Однако, не смотря на то, что производительность на агрегатном станке выше, чем на ОЦ, их применение ограничивается номенклатурой выпускаемых изделий. Агрегатные станки разрабатываются для обработки конкретных деталей и при малом выпуске изделий данные станки простаивают в ожидании новой партии заготовок. Эффективное применение агрегатных станков возможно только при крупносерийном, массовом производстве.

На предприятии также отмечено, что применение обрабатывающих центров позволило повысить точность обработки Корпуса, снизить процент брака за счет сокращения количества переустановок заготовки, автоматической настройки станка на размер и его поднастройки по эталонной детали. Также точность обработки не зависит от квалификации и утомляемости рабочего. Применение обрабатывающих центров позволило не только сократить количество рабочих в 4 раза, но и рационально использовать рабочую силу. Настройку ОЦ выполняют рабочие высокой квалификации, а работу на настроенных станках выполняют операторы 3, 4 разряда, при этом применяется многостаночное обслуживание.

Замена универсального оборудования на ОЦ позволило сократить количество специальных приспособлений для установки и закрепления заготовки корпуса. Однако увелились расходы на закупку режущего инструмента. Это связано с применением инструмента с механическим креплением многогранных пластин импортного производства для обеспечения высокоскоростной обработки заготовки.

Преимуществом применения ОЦ является их быстрая переналадка для обработки других деталей. Установленные ОЦ также применяют для обработки передней и задней крышек счетчика жидкости, корпусных деталей счетчиков других моделей, типоразмеров.

Современный обрабатывающий центр способен сократить количество операций и соответственно количество применяемого технологического оборудования. Высвобождается производственная площадь, персонал, имеется возможность применения многостаночного обслуживания. Обработка детали получается достаточно качественной, с малой величиной погрешности обработки, снижается процент бракованных деталей. По сравнению с универсальным оборудованием сокращается вспомогательное время, затрачиваемое на переустановку заготовки, замену режущего инструмента и т.д. Обрабатывающие центры являются быстроперенастраиваемым оборудованием, что дает возможность их применять при серийном производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вертикальные обрабатывающие центры MAZAK [Электронный ресурс] Режим доступа <http://www.webrarium.ru/machine-centr.html>.
2. Обрабатывающие центры с ЧПУ [Электронный ресурс] Режим доступа <http://okumatrade.com/articles/obrabatyvayushhie-centry-s-chpu/>.
3. 5-осевой обрабатывающий центр – Компания Актант [Электронный ресурс] Режим доступа <http://actant-stanki.ru/tech/5-osevoj-obrabatyvajushhij-centr.php>.
4. Обрабатывающий Центр – Энциклопедии & Словари [Электронный ресурс] Режим доступа <http://enc-dic.com/polytech/Obrabatvayuschi-centr-6427.html>.

Звягина Елена Александровна
Ливенский филиал Госуниверситета–УНПК г. Ливны
Кандидат технических наук, доцент кафедры технология машиностроения
E-mail: nioliv@mail.ru

Мимонов Андрей Михайлович
Ливенский филиал Госуниверситета – УНПК
Студент 3 курса направления 151900.62 Конструкторско–технологическое обеспечение машиностроительных производств
E-mail: nioliv@mail.ru

A.M. MIMONOV, E.A. ZVYAGINA

PROCESS OPTIMIZATION MACHINING BASED ON THE BLANKS APPLICATION QUICKSET PROCESS EQUIPMENT

The paper gives brief historical help create processing center, their characteristics, classification, field of application. Reviewed advantage of application processing centers on the example of machining parts Hull at open joint stock company "Prompribor".

Keywords: *processing center, technological process, processing details, accuracy of processing, detail.*

BIBLIOGRAPHY

1. Obrabatyvayushchiye tsentry s CHPU [Elektronnyy resurs] Rezhim dostupa <http://okumatrade.com/articles/obrabatyvayushhie-centry-s-chpu/>.
2. Obrabatyvayushchiy Tsentri – Entsiklopedii & Slovari [Elektronnyy resurs] Rezhim dostupa <http://enc-dic.com/polytech/Obrabatvayuschi-centr-6427.html>.
3. Vertikal'nyye obrabatyvayushchiye tsentry MAZAK [Elektronnyy resurs] Rezhim dostupa <http://www.webrarium.ru/machine-centr.html>.
4. 5-osevoy obrabatyvayushchiy tsentri – Kompaniya Aktant [Elektronnyy resurs] Rezhim dostupa <http://actant-stanki.ru/tech/5-osevoj-obrabatyvajushhij-centr.php>.

Zvyagina Elena Aleksandrovna
Livny branch of the State University–UNPK Livny
Ph.D., Associate Professor of Engineering Technology
E-mail: nioliv@mail.ru

Mimonov Andrew Mikhailovich
Livny branch of the State University – ESPC
3rd year student of direction 151900.62 Design and engineering software engineering industries
E-mail: nioliv@mail.ru

Д.А. БЕКТАШОВ, А.А. КРАПОСТИН

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ МИНЕРАЛОКЕРАМИЧЕСКОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА, ПРИМЕНЯЕМОГО ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

В процессе механической обработки деталей энергетических устройств было установлено, что минералокерамический режущий инструмент, изготовленный из ВОК 71, разрушался внезапно хрупким сколом. Широкому применению этого инструмента мешает невысокая стойкость и вследствие этого низкая надежность. Для изыскания способов повышения надежности необходимо исследовать кристаллическое строение минералокерамического инструмента.

Ключевые слова: минералокерамический режущий инструмент, кристаллическое строение, химическое соединение.

Всякое вещество может находиться в трёх агрегатных состояниях – твёрдом, жидком и газообразном. Состояние, в которое вещество переходит при очень высоких температурах, – плазма не может считаться четвёртым агрегатным состоянием, так как переход вещества в плазменное состояние не протекает до конца при постоянных (равновесных) температуре и давлении, согласно правилу фаз. Переход из одного состояния в другое происходит при определённой температуре и сопровождается резким изменением свойств.

Все металлы и их сплавы в твёрдом состоянии, в отличие от аморфных веществ (смола, янтарь, стекло и др.), являются кристаллическими телами. Свойства металлов одинаковы по всем направлениям.

В твёрдых телах порядок расположения атомов определённый и закономерный. В жидкостях частицы сохраняют «ближний порядок» (закономерное расположение имеют небольшое количество близко расположенных атомов). Всё многообразие металлов и сплавов обусловлено особым типом металлической связи и атомно–кристаллическим строением.

Атомы находятся в упорядоченном состоянии в виде кристаллической (рисунок 1).

Чистые металлы находят довольно ограниченное применение. Их используют главным образом в электрорадиотехнике (проводниковые, электровакуумные и другие материалы). Основными конструкционными материалами являются металлические сплавы. Сплавом называют вещество, полученное сплавлением двух или более элементов (компонентов). Сплав, приготовленный преимущественно из металлических элементов и обладающий металлическими свойствами называется металлическим сплавом.

Металлические сплавы можно также получать методами порошковой металлургии, диффузией и другими методами. Преимущественное использование в технике металлических сплавов объясняется тем, что они обладают более ценными, чем чистые металлы, комплексами механических, физических и технологических свойств.

При образовании сплавов в процессе их затвердевания возможно различное взаимодействие компонентов.

Если в процессе кристаллизации сила взаимодействия между однородными атомами окажется больше силы взаимодействия между разнородными атомами, то после кристаллизации образуется механическая смесь, состоящая из зерен чистых металлов. В этом случае в твердом сплаве будут присутствовать зерна одного чистого металла и рядом с ними зерна другого чистого металла. Такая форма взаимодействия возникает при большом различии в свойствах входящих в сплав металлов.

Другой формой взаимодействия между веществами, входящими в состав сплава, является образование твердых растворов. В твердом растворе так же, как и в чистых металлах, атомы в пространстве расположены закономерно, образуя кристаллическую решетку. Этим они отличаются от жидких растворов. В твердом растворе одно из входящих в состав веществ сохраняет присущую ему кристаллическую решетку, а второе вещество, утратив свое кристаллическое строение, в виде отдельных атомов распределяется в кристаллической решетке первого. Первое вещество является растворителем, а второе – растворимым. В зависимости от характера распределения атомов растворимого элемента различают твердые растворы внедрения, замещения и вычитания. Независимо от типа твердого раствора общим для

них является то, что они однофазны и существуют в интервале концентраций. Для твердых растворов характерен металлический тип связи.

В твердых растворах внедрения атомы растворимого элемента распределяются в кристаллической решетке металла – растворителя, занимая места между его атомами. У металлов атомы в кристаллической решетке располагаются близко друг к другу и пустоты между ними имеют малые размеры. Разместиться в таких пустотах могут только атомы с очень малыми размерами.

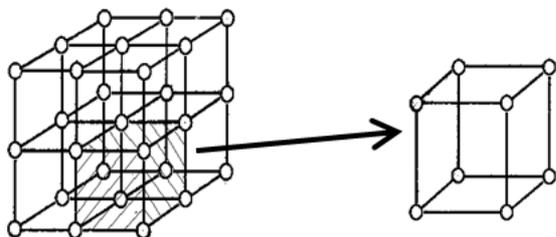


Рисунок 1 – Кристаллическая решетка и элементарная ячейка

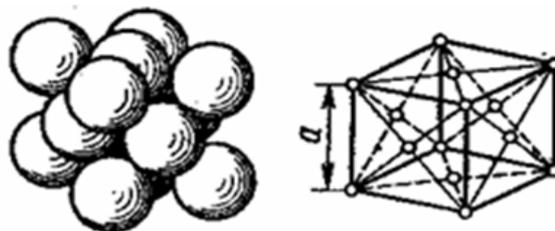


Рисунок 2 – Кубическая гранецентрированная решетка

Наименьшие размеры атомов имеют некоторые металлоиды – водород, азот, углерод, бор, которые и образуют с металлами твердые растворы внедрения. Но и у этих элементов размер атомов несколько превышает размер межатомных промежутков в кристаллической решетке металлов, поэтому при образовании твердых растворов внедрения решетка искажается и в ней возникают напряжения. При этом концентрация твердого раствора внедрения не может быть высокой: она редко превышает 1–2%.

В твердых растворах замещения атомы растворимого элемента занимают места основного металла. Посторонние атомы могут замещать атомы растворителя в любых местах, поэтому такие растворы называют неупорядоченными твердыми растворами. Размеры атомов растворимого элемента всегда отличаются от размеров атомов растворителя (они больше или меньше), поэтому при образовании твердого раствора замещения кристаллическая решетка металла-растворителя немного искажается, не утрачивая при этом своего основного строения.

Твердые растворы замещения могут быть ограниченными и неограниченными. Одно из условий неограниченной растворимости – размерный фактор: чем больше различие в атомных радиусах, тем меньше растворимость.

Неограниченная растворимость компонентов присуща системам, в которых атомные радиусы элементов различаются не более чем на 8 – 15%. Кроме того, они должны быть изоморфными (иметь близкие по типу и по параметрам кристаллические решетки). В таблице Д.И. Менделеева такие элементы расположены близко, например системы Fe_α – Cr, Cu – Ni, Co – Ni, Ti – V и др.

С понижением температуры в твердых растворах замещения может произойти процесс перераспределения атомов, в результате которого атомы растворенного элемента займут строго определенные места в решетке растворителя. Такие твердые растворы называют упорядоченными твердыми растворами, а их структуру – сверхструктурой. Упорядоченные твердые растворы характеризуются большей твердостью, меньшей пластичностью и электросопротивлением. Их можно рассматривать как промежуточные фазы между твердыми растворами и химическими соединениями.

Химические соединения чаще всего образуются между элементами, расположенными далеко друг от друга в таблице Д.И. Менделеева, т. е. существенно различающимися по своему строению и свойствам, если сила взаимодействия между разнородными атомами больше, чем сила взаимодействия между атомами однородными.

Химические соединения имеют ряд особенностей, отличающих их от твердых растворов:

а) соотношение чисел атомов элементов, образующих соединение, строго определенное, соответствующее стехиометрической пропорции, выраженной формулой вида A_nB_m;

б) они имеют свою кристаллическую решетку, отличную от решетки элементов, образовавших это соединение, с правильным упорядоченным расположением атомов компонентов в кристаллической решетке;

в) свойства соединения заметно отличаются от свойств исходных элементов;

г) как и чистые металлы, они имеют постоянную температуру плавления (диссоциации).

Химические соединения, как правило, обладают большой твердостью и очень хрупкие.

Кроме твердых растворов и химических соединений, в металлических сплавах встречаются фазы, которые по строению и свойствам не относятся ни к первым, ни ко вторым; они являются промежуточными. Как и химические соединения, они имеют свою, отличную от образующих их компонентов, кристаллическую решетку, но в то же время они могут существовать в интервале концентраций, как и твердые растворы.

Промежуточные фазы многочисленны и разнообразны. Эти соединения не подчиняются правилам нормальной валентности. Кратко рассмотрим наиболее распространенные из них.

Интерметаллиды – соединения между металлами. Например, CuAl_2 , MoFe_2 , Ni_3Ti и др.

Металлические соединения – для них характерен металлический тип связи. К ним относятся фазы внедрения – соединения переходных металлов с H, C, B и N (гидриды, карбиды, бориды и нитриды). Для фаз внедрения характерно отношение малого диаметра к большому в пределах 0,41 – 0,59. Фазы внедрения обладают высокой твердостью и очень тугоплавки.

Электронные соединения характеризуются определенным отношением числа валентных электронов к числу атомов (электронной концентрацией). Электронные соединения образуются при взаимодействии металлов 1 класса (Cu, Ag, Au, Mn, Fe, Co, Ni и некоторые другие) с металлами 2 класса (Zn, Al, Sn, Si, Cd, Mg и др.). Электронные соединения могут образовываться с компонентами, из которых они состоят, твердые растворы в широком интервале концентраций [1, 2, 4].

Согласно представленной теории технологии металлов попробуем установить принадлежность минералокерамического режущего инструмента на примере ВОК 71. Режущая пластина, изготовленная из ВОК 71, состоит из оксида алюминия и карбида титана: Al_2O_3 – 70%, TiC – 30%.

Рассмотрим первую составляющую – оксид алюминия. Алюминий имеет кубическую гранцентрированную кристаллическую решетку (рисунок 2). 8 атомов расположены в углах куба и по одному атому в центре каждой грани.

В соединении Al_2O_3 на 14 атомов алюминия приходится 21 атом кислорода. Атомы кислорода будут внедряться в кристаллическую решетку алюминия, так как они не могут замещать атомы алюминия в связи с тем, что не будет образование кристаллической решетки, так как кислород не является металлом.

Оксид алюминия не будет являться механической смесью, так как в его составе нет зерен чистых металлов. Он также не будет являться твердым раствором в связи с тем, что концентрация твердого раствора внедрения не может быть высокой: она редко превышает 1–2%. В нашем случае концентрация внедрения кислорода в кристаллическую решетку алюминия значительно превышает указанные 1–2 %.

Минералокерамический режущий инструмент будет являться химическим соединением, так как:

- 1) соотношение чисел атомов элементов, образующих соединение, строго определенное, соответствующее стехиометрической пропорции, выраженной формулой Al_2O_3 ;
- 2) кристаллическая решетка будет отличаться от решетки элементов, образовавших это соединение, с правильным упорядоченным расположением атомов компонентов в кристаллической решетке;
- 3) свойства соединения заметно отличаются от свойств исходных элементов (алюминий является мягким металлом, а режущая пластина, изготовленная из ВОК 71, обладает очень высокой твердостью HRA 93).

Вторая составляющая 30% TiC будет являться металлическим соединением, так как для него характерен металлический тип связи и будут относиться фазы внедрения – соединения переходных металлов с C (карбиды титана). Для фаз внедрения характерно отношение малого диаметра к большому в пределах 0,41 – 0,59. Фазы внедрения обладают высокой твердостью и очень тугоплавки. Металлическое соединение будет обладать теми же свойствами, что и химическое соединение [1].

В связи с тем, что атомы кислорода будут внедряться в кристаллическую решетку алюминия, а атомы углерода будут внедряться в кристаллическую решетку титана, то они будут занимать места между основными атомами кристаллических решеток металлов растворителей. У металлов атомы располагаются близко друг к другу и пустоты между ними имеют малые размеры. Разместиться в таких пустотах могут только атомы с очень малыми размерами. Наименьшие размеры имеют некоторые металлоиды – водород, азот, углерод, бор. Но и у этих элементов размер атомов несколько превышает размер межатомных промежутков в кристаллической решетке металлов. Поэтому при внедрении атомов кислорода и углерода кристаллические решетки будут искажаться, что приведет к возникновению внутренних напряжений.

Представленная теория подтверждается микронзондовыми исследованиями. Концентрационные кривые, представленные на рисунке 3, показывают наличие повышенного содержания кислорода в тех точках контактной поверхности, где фиксируется также высокое содержание Ti и Al. То есть в процессе резания под действием динамических нагрузок происходит разрушение межатомных связей и вследствие этого разрушение кристаллической решетки, что приводит к разрушению минералокерамического режущего инструмента.

В результате проведенных исследований было установлено, что минералокерамический режущий инструмент, полученный методами порошковой металлургии, является химическим соединением, обладающим высокой твердостью и тугоплавкостью.

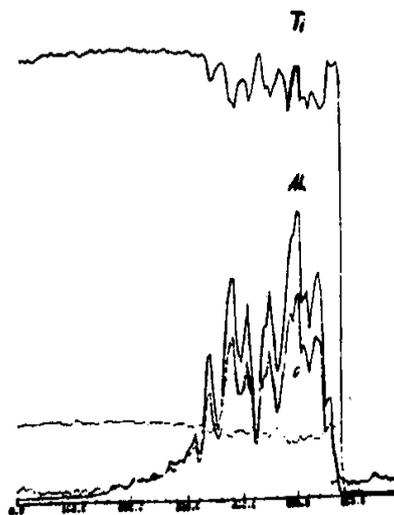


Рисунок 3 – Концентрационные кривые O, Ti, Al микронзондовых исследований на контактных площадках изношенного инструмента, изготовленного из BOK 71

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология металлов / Б.В. Кнорозов, Л.Ф. Усова, А.В. Третьяков, И.А. Арутюнова, С.П. Шабашов, В.К. Ефремов. М.: Металлургия, 1979. – 904 с.
2. Арзамасов, Б.Н. Материаловедение / Б.Н. Арзамасов, И.И. Сидорин, Г.Ф. Косолапов. М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.
3. Постников, В.С. Физика и химия твердого состояния. / В.С. Постников. М.: Металлургия, 1978. – 544 с.
4. Лахтин, Ю.М. Материаловедение / Ю.М. Лахтин, Б.Н. Арзамасов. М.: Машиностроение, 1980. – 493 с.

Бекташов Дмитрий Алиевич

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, г. Иваново
к.т.н., доцент кафедры Технологии автоматизированного машиностроения
E-mail: alex19882003@list.ru

Крапостин Алексей Александрович

Ивановский государственный политехнический университет, г. Иваново
Аспирант кафедры технологии машиностроительного производства
E-mail: alex19882003@list.ru

D.A. BEKTASHOV, A.A. KRAPOSTIN

INVESTIGATION OF THE CRYSTAL STRUCTURE OF THE MINERAL CERAMIC CUTTING TOOL USED FOR MACHINING PARTS POWER DEVICES

While mechanical processing of power devices details the cemented-oxide cutting tool manufactured from fiber optic cable 71 was stated to be suddenly destroyed with cleavage. Short life and low durability prevent this tool from broad usage. To find the ways of raising its durability crystal structure of the cemented-oxide cutting tool is necessary to examine.

Keywords: cemented-oxide cutting tool, crystal structure, chemical mixture.

BIBLIOGRAPHY

1. Tekhnologiya metallov / B.V. Knorozov, L.F. Usova, A.V. Tretyakov, I.A. Arutyunova, S.P. Shabashov, V.K. Yefremov. M.: Metallurgiya, 1979. – 904 s.
2. Arzamasov, B.N. Materialovedeniye / B.N. Arzamasov, I.I. Sidorin, G.F. Kosolapov. M.: Mashinostroyeniye, 1986. – 384 s.
3. Postnikov, V.S. Fizika i khimiya tverdogo sostoyaniya. / V.S. Postnikov. M.: Metallurgiya, 1978. – 544 s.
4. Lakhtin, Yu.M. Materialovedeniye / Yu.M. Lakhtin, B.N. Arzamasov. M.: Mashinostroyeniye, 1980. – 493 s.

Bektashov Dmitry Alievich

Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin Ivanovo
Ph.D., assistant professor of mechanical engineering technology of automated
E-mail: alex19882003@list.ru

Krapostin Alexey Aleksandrovich

Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo
Graduate student technology engineering production
E-mail: alex19882003@list.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИЙ, ДЕЙСТВУЮЩИХ ПОД УГЛОМ К НАПРАВЛЕНИЮ РЕЗАНИЯ

Представлены результаты исследования влияния вибраций под произвольным углом к направлению резания. При анализе трения между стружкой и передней поверхностью резца использовалась модель изменения силы резания при наличии механической вибрации под некоторыми углами к направлению движения. Показано, что при умеренно высоких частотах вибрации возможно значительное сокращение силы резания. Вследствие кратковременности импульсов зона пластической деформации сосредоточена только в окрестности вершины резца, за короткий промежуток времени импульсы микротрещины не успевают расти. Кроме этого, при обратном ходе резца в зоне резания происходит релаксация напряжений, и часть микротрещин исчезает. Поэтому, при вибрационном резании, качество обработанной поверхности гораздо выше, чем при обычном.

Ключевые слова: *вибрации, резание, сила резания, импульсы, релаксация напряжений.*

Экспериментально доказано, что при определенных условиях вибрации могут уменьшать силу резания при резании. Существует модель, которая учитывает эффект вибрации параллельно направлению резания [1], которая описывает уменьшение силы резания независимо от скорости резания. Данная модель показывает снижение силы резания как отношение скорости вибрации к скорости резания. Чем больше это отношение, тем большее уменьшение силы имеет место. Если это соотношение меньше единицы (при скорости резания, превышающей скорость вибрации), вибрация уже не влияет на силу резания. В работе [2] представлена теоретическая модель изменения силы резания при наличии механической вибрации под произвольными углами к направлению движения. Если вибрация параллельна направлению скольжения, уравнения для определения снижения силы резания подобны [1]. При нормальных и поперечных колебаниях направлению резания, сила резания также может уменьшаться.

В реальных условиях, в частности, из-за отжима инструмента и упругого восстановления поверхности, направление вибраций является случайным фактором. Были проведены исследование влияния вибраций под произвольным углом к направлению резания. При анализе трения между стружкой и передней поверхностью резца использовалась модель [2].

На рисунке 1 показаны параметры обычного резания: глубина (t_o), толщина стружки (t_c), скорость резания (V), скорость схода стружки (V_c), угол сдвига (θ) и передний угол (γ). Некоторыми из этих параметров можно управлять (глубиной резания, скоростью резания и передним углом). Угол сдвига, толщина стружки, скорость схода стружки зависят от свойств материала, скорости резания, переднего угла резца и трения на передней поверхности.

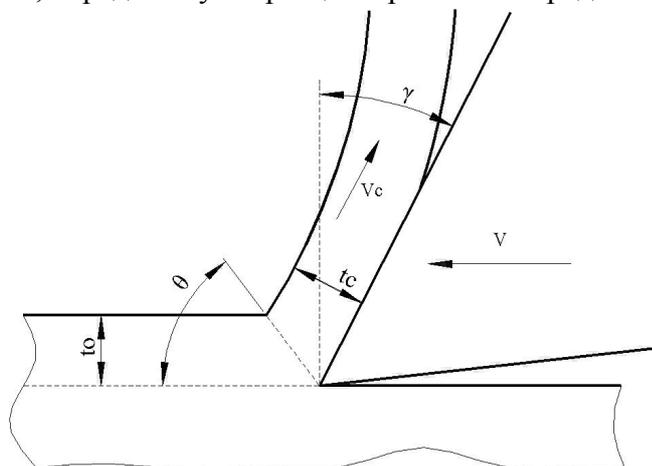


Рисунок 1— Основные параметры обычного резания

При введении колебаний инструмента наблюдается изменение всех этих параметров. Относительная скорость резания между заготовкой и инструментом изменяется по величине и направлению. Передний угол непрерывно меняется с вибрацией. Таким образом, t_0 , V и γ периодически изменяются относительно их номинальной величины. Изменения этих параметров, в свою очередь, влияют на угол сдвига θ , толщину стружки t_c и скорость схода стружки V_c . Наконец, трение по передней поверхности влияет на соотношение скорости схода стружки к скорости инструмента. Так как угол сдвига зависит также от трения на передней поверхности, взаимосвязи между всеми переменными представляются довольно сложными. Угол сдвига играет ключевую роль в определении сил на режущей кромке, однако, предсказать влияние на него вибрации даже в простом случае затруднительно.

Была разработана упрощенная модель сил. Первым шагом в моделировании вибрационного воздействия на силы резания является простое предположение о влиянии вибрации на угол сдвига. Мы полагаем, что угол плоскости сдвига θ по отношению к неподвижной системе координат остается постоянным, но по отношению к направлениям перемещения режущей кромки меняется. На рисунке 2 показано изменение геометрии резания, когда инструмент находится в начале и конце цикла колебания. Когда направление резания горизонтально, угол сдвига принимает значение θ_1 . Когда скорость вибрации максимальна, мгновенное значение скорости резания меняется, и угол сдвига θ_2 становится меньше θ_1 .

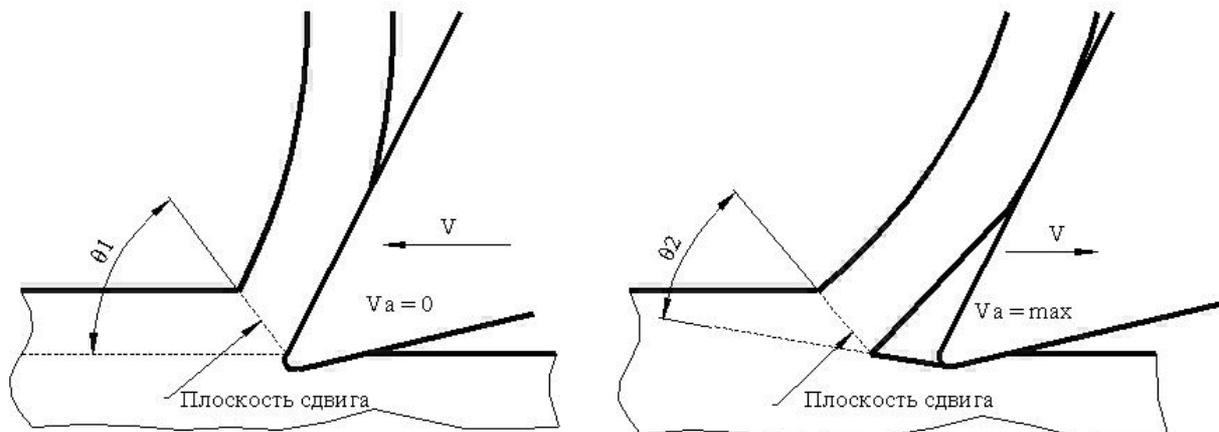


Рисунок 2 – Изменение геометрии резания при наложении вибрации

Мгновенное значение угла сдвига:

$$\theta_2 = \theta_1 - \arctg\left(\frac{V_a}{V}\right),$$

где $V_a = a\omega \sin \omega t$

На рисунке 3 показано изменение мгновенного значения угла плоскости сдвига при $V=1$ м/с, $\gamma = 0^\circ$, $\theta_1=20^\circ$.

Основываясь на этом выражении для угла сдвига, можно рассчитать изменение скорости стружки.

Сравнивая скорость стружки и скорость передней поверхности резца с учетом вибраций, скорость стружки может быть рассчитана следующим образом:

$$V_c = V \frac{t_0}{t_c} = V \frac{\sin \theta}{\cos(\theta - \gamma)}$$

Анализируя последнее выражение можно установить, что скорость передней поверхности с вибрацией превышает скорость стружки в течение короткого времени во время каждого цикла колебаний (рисунок 4).

Вибрационное резание представляет собой периодический с частотой ω виброударный процесс [1], в котором взаимодействие резца и детали сопровождается периодическим ослаблением контакта резца и заготовки.

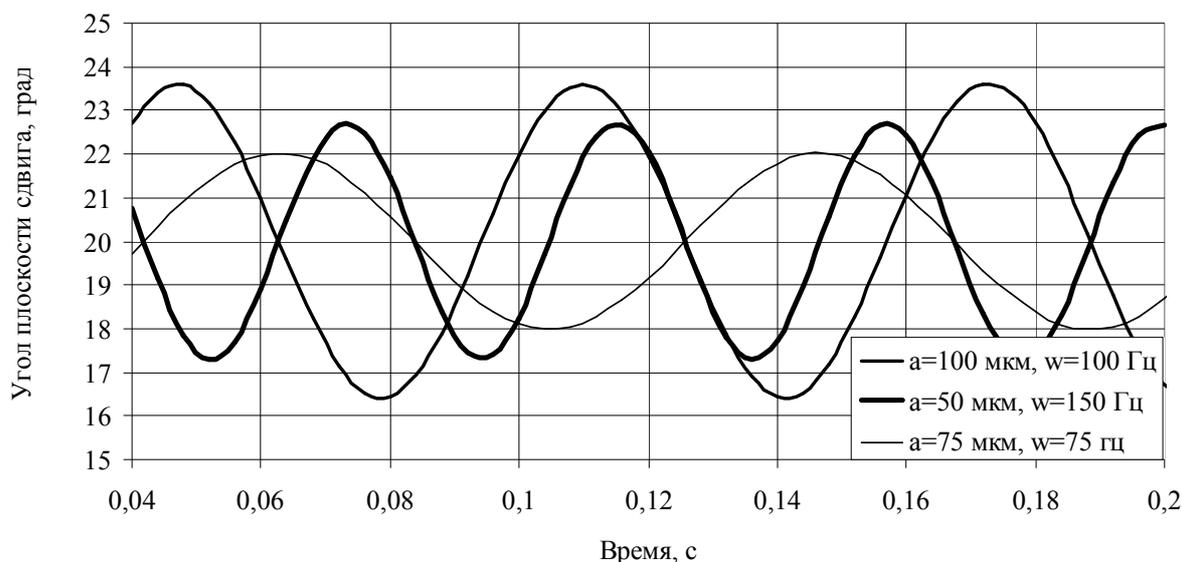


Рисунок 3 – Изменение мгновенного значения угла плоскости сдвига θ

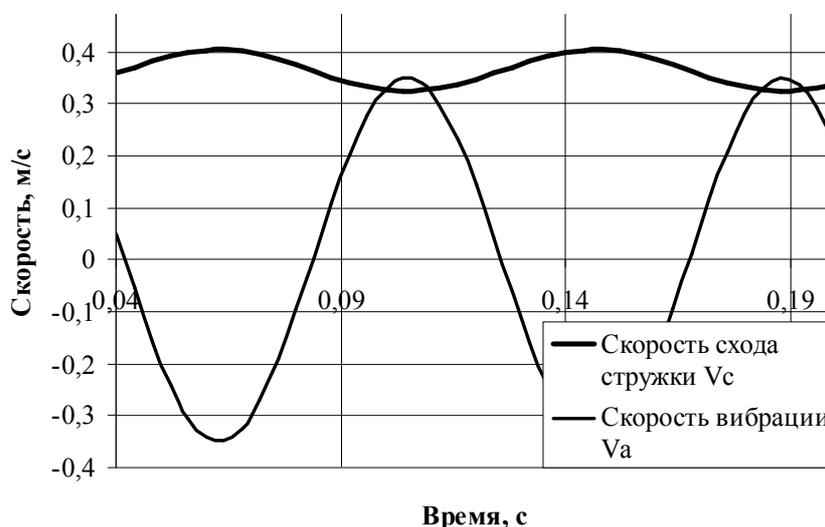


Рисунок 4 – Соотношение скорости схода стружки и скорости V_c и скорости вибрации передней поверхности V_a при $\omega = 75 \text{ с}^{-1}$, $a = 75$ мкм

При этом амплитуда возникающих импульсных сил равна обычной силе резания, а длительность импульсов зависит от соотношения скорости резания V и амплитуды a вибрационной скорости резца. В эти периоды, сила резания между стружкой и инструментом изменяется. Следовательно, усредненная в течение ряда циклов, сила резания меньше ее номинальной величины. Увеличение частоты или амплитуды вибрации увеличивает время, когда скорость передней поверхности превышает скорость схода стружки и тем самым еще больше снижает среднюю силу резания.

Максимальное сокращение силы резания на передней поверхности, и, следовательно, общее сокращение сил резания, возможно при достаточно высокой скорости вибрации.

При обычном резании, то есть при непрерывном взаимодействии резца и детали зона пластической деформации, расположенная в окрестности режущих кромок, распространяется со скоростью резания. Эта зона насыщена микротрещинами, распределенными случайным образом. Их рост происходит также по случайному закону. Поэтому, получаемая поверхность, как правило, имеет не регулярное распределение микронеровностей. Вибрационное резание происходит в результате периодических микровоздействий. Вследствие кратковременности импульсов зона пластической деформации сосредоточена только в окрестности вершины резца, за столь короткий промежуток времени микротрещины не успевают расти. Кроме этого, при обратном ходе резца в зоне резания происходит релаксация напряжений и

часть микротрещин исчезает. Поэтому при вибрационном резании, качество обработанной поверхности гораздо выше, чем при обычном.

Предложенная модель, основанная на простых геометрических предположениях об угле сдвига, показывает, что при умеренно высоких частотах вибрации возможно значительное сокращение силы резания. Необходимо дальнейшее уточнение предположений о характере изменения угла сдвига. Дальнейшие исследования должны уточнить влияние глубины резания и изменения силы резания от угла сдвига.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Astashev, V.K. Effect of Ultrasonic Vibration of a Single-Point Tool on Process of Cutting // Journal of Machine Manufacturing and Reliability. – 1992. – № 3. – pp. 65–70.
2. Назаренко, А.Ф. Исследование влияния вибраций на трение / А.Ф. Назаренко // Трение и износ. – 1994. – Т. 15. – № 4. – С. 36–39.

Волченков Алексей Васильевич

Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
Кандидат технических наук, доцент кафедры АПМ и ТП
Тел. (49234) 77–1–45
E-mail volchenkov@yahoo.com

A. V. VOLCHENKOV

RESEARCH OF VIBRATION INFLUENCE OPERATING AT AN ANGLE TO THE CUTTING DIRECTION

Results of research of influence of vibrations under any corner to the cutting direction are presented. In the friction analysis between shaving and a forward surface of a cutter the model of change of force of cutting in the presence of mechanical vibration under some corners to the movement direction was used. It is shown that with moderately high frequencies of vibration probably considerable reduction of force of cutting. Owing to short duration of impulses the zone of plastic deformation is concentrated only in a vicinity of top of a cutter, for short periods of an impulse of a microcrack don't manage to grow. Besides, at reverse motion of a cutter in a zone of cutting there is a relaxation of tension, and the part of micro cracks disappears. Therefore, at vibration cutting, quality of the processed surface is much higher, than at the usual.

Keywords: vibrations, cutting, cutting force, impulses, relaxation of tension.

BIBLIOGRAPHY

1. Astashev, V.K. Effect of Ultrasonic Vibration of a Single-Point Tool on Process of Cutting // Journal of Machine Manufacturing and Reliability. No 3. 1992. pp. 65–70.
2. Nazarenko, A.F. Issledovaniye vliyaniya vibratsiy na treniye / A.F. Nazarenko // Treniye i iznos. – 1994. – Т. 15. – № 4. – С. 36–39.

Volchenkov Aleksey Vasilyevich

Murom Institute (branch) Federal state budgetary
Educational Institution of Higher Professional Education
"Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich
and Nickolay Grigoryevich Stoletovs"
Dr. Eng., Associate Professor APM and TP Department
Phone (9234) 77–1–45
E-mail volchenkov@yahoo.com

В.А. КОМАРОВ

ОБРАБОТКА ВЫСОКОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ ИЗДЕЛИЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

На подавляющем большинстве деталей, изготавливаемых из сплава КВК-26 для изделий ОАО «МКБ «Факел», формирование резьбы в отверстиях осуществляется ручным способом, при этом используются комплекты метчиков (по 3-4 шт. в компл.). Трудоемкость выполнения этой операции значительная, а стойкость инструмента при работе с подобным материалом очень низка (используются несколько комплектов для нарезания резьбы на 1 корпусе).

Ключевые слова: резьбофреза, режимы резания, стойкость, теплопередача.

Представленная работа является продолжением серии работ автора по повышению эффективности технологических процессов механической обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов на основе использования базовых положений «импульсной» теории резания [1-3].

Развитие наукоемких отраслей и высоких технологий является основой технологической безопасности и независимости страны и вносит большой вклад в решение импортозамещения в машиностроении. Только за счет инноваций, инвестиций в новые технологии и создание современных производств можно обеспечить снижение импортной зависимости [4].

Применение современного инструмента (резьбофрез) в сочетании с высокоскоростной обработкой должно значительно сократить трудоемкость выполнения подобного типа операций, а также значительно уменьшить затраты на приобретение инструмента. На рисунке 1 приведена схема резьбофрезерования:

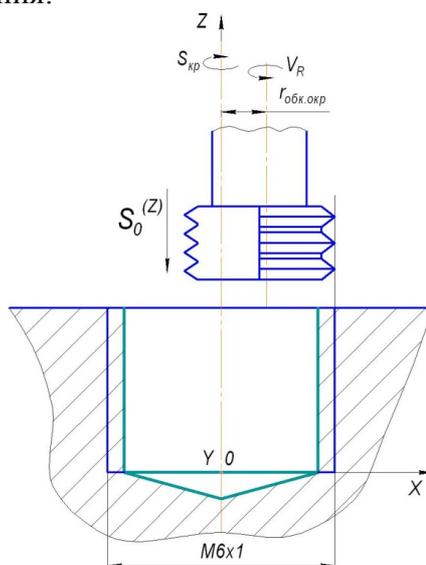


Рисунок 1 - Кинематическая схема резьбофрезерования

Расчет оптимальных режимов резания, обеспечивающих достаточную прочность и стойкость инструмента, осуществим по уравнению, полученному на основе решения дифференциального выражения теплопередачи в однородной среде, в которой действует импульсный источник тепловыделения [5]:

$$\Delta T_{\tau} = \{ 0.85 \sigma_R^{(m)} m K_{sh} / (\pi \lambda_t c_p^{(t)} \rho_t)^{1/2} \} * (V / \ell_x)^{1/2} * \sum_{i=1}^{N1} (1/\sqrt{i}) \quad (1)$$

где:

$$\sum_{i=1}^{N1} (1/\sqrt{i}) \approx 2 (\ell_x V / (C^{(m)} W^{(m)} N))^{1/2} + ((C^{(m)} W^{(m)} N) / (\ell_x V))^{1/2} - 1.5 \quad (2)$$

$N1 = \ell_x / l_{imp}$ – число импульсов на пути резания длиной ℓ_x (для ротационной обработки)

$$\ell_x = \pi D,$$

D - диаметр инструмента;

$$C^{(m)} = (\pi^3(1-2\mu_m) \sigma_R^{(m)}) / (E_m - 3(1-2\mu^{(m)}) \sigma_R^{(m)}),$$

$\sigma_R = \sigma_B (1+1,35 \psi)$ - разрушающее напряжение и σ_B - предел прочности;

E - модуль Юнга;

ψ - относительное сужение поперечного сечения при разрыве;

μ - коэффициент Пуассона;

N - характеризует зону распространяемого теплового потока от зоны плавления стружки (рассчитывается по специальному алгоритму или определяется экспериментально) [5]:

$W^{(m)}$ - в M^2/c ; V - в м/с.

K_{sh} - коэффициент пропорциональности теплопоглощения Шарона:

$$K_{sh} = (\lambda_i c_p^{(i)} \rho_i)^{1/2} / ((\lambda_i c_p^{(i)} \rho_i)^{1/2} + (\lambda_m c_p^{(m)} \rho_m)^{1/2}) \quad (3)$$

λ_t - удельная теплопроводность режущего материала ($Вт/(м^0 C)$);

$c_p^{(i)}$ - удельная теплоемкость режущего материала ($Дж/(кг^0 C)$);

ρ_i - плотность режущего материала ($кг-масса/м^3$);

λ_m - удельная теплопроводность обрабатываемого материала ($Вт/(м^0 C)$);

$c_p^{(m)}$ - удельная теплоемкость обрабатываемого материала ($Дж/(кг-масса^0 C)$);

ρ_m - плотность обрабатываемого материала, ($кг-масса/м^3$);

$W = \lambda_m / (c_p^{(m)} \rho_m)$ - температуропроводность обрабатываемого материала ($м^2/с$):

$l_{imp} = CWN/V$;

T_{melt} - температура плавления обрабатываемого материала ($^0 C$).

Для сплавов: КВК-26 (26Х2НВР) физико-механические и теплофизические свойства:

$$E = 215 \cdot 10^9 \text{ (Па);}$$

$$\sigma_B = 1080 \text{ (МПА);}$$

$$\psi = 0.3; \lambda = 36 \text{ (Вт/м}^0 \text{ c);}$$

$$c_p \cdot \rho = 3.9 \cdot 10^6 \text{ (Дж/}^0 \text{ c м}^3 \text{);}$$

$$T_{melt} = 1500 \text{ (}^0 \text{ c);}$$

$$\ln(T_{melt}) \approx 7.31;$$

$$W = \lambda / (c_p \rho) = 9.2 \cdot 10^{-6} \text{ (м}^2 \text{/c);}$$

$$N = 1443 \text{ [6].}$$

Свойства твердого сплава марки: Т15К6 или Т5К10:

$$\Delta T_t \leq \Delta T_z = 860 \text{ }^0 \text{C;}$$

$$\lambda_t = 27,2 \text{ Вт/м}^0 \text{C;}$$

$$c_p^{(t)} \rho_t = 2.72 \cdot 10^6 \text{ Дж/}^0 \text{C м}^3.$$

Свойства покрытия алумонитрида (Ti-Al-N):

$$\Delta T_t \leq \Delta T_z = 1400 \text{ }^0 \text{C;}$$

$$\lambda_t = 21. \text{ Вт/м}^0 \text{C;}$$

$$c_p^{(t)} \rho_t = 3.1 \cdot 10^6 \text{ Дж/}^0 \text{C м}^3.$$

Коэффициент пропорциональности теплопередачи для пары – обрабатываемая сталь-алюмонитрид: $K_{sh} = 0,42$;

Коэффициент пропорциональности теплопередачи для пары – алумонитрид – твердый сплав Т15К6: $K_{sh} = 0,52$;

$K_{sh} = 0,21$ - доля тепла, получаемая твердым сплавом из стружки.

Пользуясь приведенными соотношениями, определены оптимальные режимы фрезерования резьбы М6х1:

$n = 9000$ (об/мин) - частота вращения инструмента диаметром 5 (мм);

$S_{кр.} = 120$ (мм/мин) = 2 (мм/с) - минутная подача (скорость движения резьбофрезы по окружности обката, радиусом r);

$S_o^{(z)}$ = S-шагу резьбы (1 мм) за один оборот фрезы по окружности обката.

Данные режимы обеспечивают минимизацию результирующей силы резания при одновременном профилировании резьбы 20 зубьями, менее 0,86 (Н). Это позволяет наряду с адгезионно-механическим износом при выбранных режимах резания использовать один фрезометчик на 12 000 – 20 000 отверстий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комаров, В.А. Повышение эффективности фрезерования закаленных стальных деталей / В.А. Комаров, В.В. Плешаков, А.А. Сапронов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. - № 1 (303). – С. 76 – 79.
2. Комаров, В.А. Повышение эффективности механической обработки закаленных железнодорожных колес / В.А. Комаров, В.В. Плешаков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. - № 2 (304). – С. 86 – 89.
3. Комаров, В.А. Обработка алюминиевых сплавов изделий авиакосмических аппаратов / В.А. Комаров // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. - № 5 (306). – С. 99 – 102.
4. Степанова, Е.Ю. Научно-технические отрасли и высокие технологии – основа технологической безопасности и независимости страны / Е.Ю. Степанова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - № 2 (304). – 2014. – С. 122 – 132.
5. Комаров, В.А. Повышение эффективности технологических процессов на основе совершенствования обработки резания / В.А. Комаров. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 164 с.
6. Кузнецов, В.Д. Физика твердого тела / В.Д. Кузнецов. - Изд. 2-е, заново перераб. - Томск: Красное знамя, 1937-1949. - Т.4 : Материалы по физике внешнего трения, износа и внутреннего трения твердых тел. – Изд-во Полиграфиздата, 1947. – 542 с.

Комаров Владимир Алексеевич

Московский государственный университет приборостроения и информатики
г. Москва, Стромынка, 20
Доктор технических наук, профессор
E-mail: komarovva11@rambler.ru

V. A. KOMAROV

**PROCESSING OF HIGH-STRENGTH ALLOY PRODUCTS
OF SPECIAL PURPOSE**

For most of the parts made of alloy KVK-26 for products of OJSC "MKB Fakel, formation of threaded holes are performed manually, using sets of taps (3 to 4 pcs. set). The complexity of this operation, significant, and tool life when working with this material is very low (there are several kits for tapping on 1 case).

Keywords: thread milling, cutting conditions, durability, heat transfer.

BIBLIOGRAPHY

1. Komarov, V.A. Povyshenie jeffektivnosti frezerovaniya zakalennyh stal'nyh detalej / V.A. Komarov, V.V. Pleshakov, A.A. Sapronov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2014. - № 1 (303). – S. 76 – 79.
2. Komarov, V.A. Povyshenie jeffektivnosti mehanicheskoy obrabotki zakalennyh zheleznodorozhnyh koles / V.A. Komarov, V.V. Pleshakov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2014. - № 2 (304). – S. 86 – 89.
3. Komarov, V.A. Obrabotka aljuminievyh splavov izdelij aviakosmicheskikh apparatov / V.A. Komarov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2014. - № 5 (306). – S. 99 – 102.
4. Stepanova, E.Ju. Naukoemkie otrasli i vysokie tehnologii – osnova tehnologicheskoy bezopasnosti i nezavisimosti strany / E.Ju. Stepanova // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. - № 2 (304). – 2014. – S. 122 – 132.
5. Komarov, V.A. Povyshenie jeffektivnosti tehnologicheskikh processov na osnove sovershenstvovaniya obrabotki rezaniya / V.A. Komarov. M.: Izd. MGTU im. N.E. Baumana, 2002. – 164 s.
6. Kuznecov, V.D. Fizika tverdogo tela / V.D. Kuznecov. - Izd. 2-e, zanovo pererab. - Tomsk: Krasnoe znamja, 1937-1949. - T.4 : Materialy po fizike vneshnego trenija, iznosa i vnutrennego trenija tverdyh tel. – Izd-vo Poligrafizdata, 1947. – 542 s.

Komarov Vladimir Alekseevich

Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Science
Moscow, Stromynka 20
Doctor of Technical Sciences, Professor
E-mail: komarovva11@rambler.ru

УДК 621.923

О.А. ВАСИЛЕНКО, В.Г. СЕМЕНОВ, А.В. ТЮХТА, Ю.В. ВАСИЛЕНКО

**РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ СОЖ
ПРИ ПЛОСКОМ ШЛИФОВАНИИ ПЕРИФЕРИЕЙ КРУГА**

Представлено обоснование нового функционального свойства СОЖ – улавливающего, заключающегося в нейтрализации отходов шлифования в зоне резания и оцениваемого посредством предельной концентрации вредных веществ в рабочей зоне станка.

Ключевые слова: плоское шлифование, функции СОЖ, подача СОЖ, улавливание отходов, экологичность обработки.

Одним из важнейших элементов технологического обеспечения финишных операций механической обработки вообще, абразивной обработки в особенности, наряду со станком, приспособлением и режущим инструментом является смазочно–охлаждающее технологическое средство (СОТС) [1]. Современные СОТС для обработки металлов – это сложные многокомпонентные системы неорганических и органических веществ. По агрегатному состоянию СОТС подразделяются на 4 типа: газообразные, жидкие, пластичные и твердые. Жидкие СОТС – смазочно–охлаждающие жидкости (СОЖ), являются самыми распространенными, в частности при плоском шлифовании периферией круга.

В развитии современной технологии машиностроения, наряду с уже традиционными требованиями постоянного повышения производительности, точности и качества обработки деталей, все более активно выдвигаются условия экологичности их изготовления [2]. СОЖ при шлифовании является одним из негативных факторов с точки зрения экологичности обработки, однако, за счет совершенствования техники подачи, ее вредное воздействие на окружающую среду и безвозвратные потери могут быть минимизированы и она же сама может быть использована как средство улавливания факела шлама, направлено движущегося из зоны резания и являющегося основным источником загрязнений [3].

Традиционно эффективность применения СОЖ определяется ее функциональными свойствами: смазывающим, охлаждающим, режущим, пластифицирующим, проникающим, моющим [1, 4], которые в значительной степени зависят от техники подачи СОЖ. На сегодня известно более 250 различных способов подачи СОЖ при шлифовании. Л.В. Худобиным впервые были систематизированы данные о технике подачи СОЖ по 4 группам признаков и выделены 19 основных способов ее подачи [5]. Однако, за прошедшее время, в результате проведенных теоретико–экспериментальных исследований отечественными и зарубежными учеными разработан целый ряд новых способов, анализ этих способов в 2002 г. позволил выделить уже 30 основных способов подачи СОЖ [6]. Результаты анализа и систематизации основных способов подачи СОЖ показали:

– самыми распространенными способами подачи СОЖ при плоском шлифовании являются подача СОЖ поливом или напорной струей в зону обработки, их использование позволяет повысить эффективность обработки, не применяя дорогостоящую модернизацию существующего парка станков;

– многие способы подачи СОЖ труднореализуемы из–за необходимости использования специального оборудования или существенной модернизации станков;

– оптимальным способом, позволяющим жидкости наиболее полно реализовывать свои основные функции, является шлифование в среде СОЖ, в этом случае теплоотвод от круга и поверхности обрабатываемой детали наиболее эффективен, СОЖ хорошо реализует свою смазочную функцию;

– некоторые из способов подачи СОЖ частично реализуют функцию улавливания отходов шлифования, однако для них эта функция является второстепенной и эффективность ее реализации низка.

В 2002 году разработан заградительный способ подачи СОЖ [7], позволяющий эффективно улавливать факел отходов, направленно движущийся из зоны резания (рисунок 1), что достигается посредством вертикального расположения сопла для подачи СОЖ за зоной обработки так, что на пути факела создается заградительная штора из жидкости, обеспечивающей его эффективное улавливание.

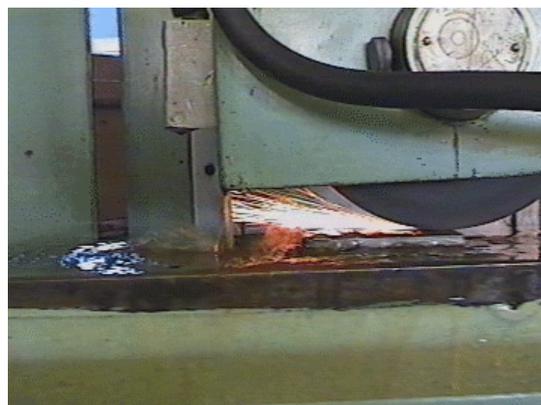
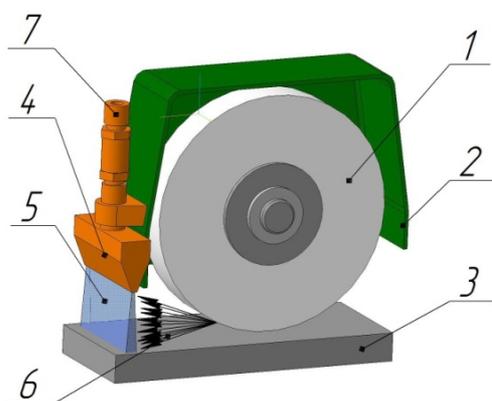
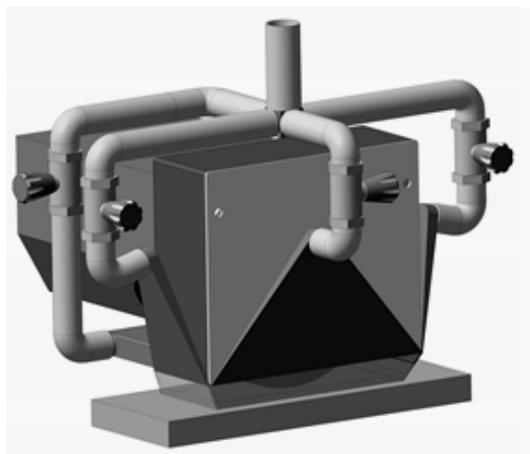


Рисунок 1 – Схема и фотография реализации заградительного способа подачи СОЖ при плоском шлифовании периферией круга:

1 – шлифовальный круг; 2 – защитный кожух; 3 – обрабатываемая деталь; 4 – сопло для подачи СОЖ; 5 – заградительная штора из СОЖ; 6 – факел отходов; 7 – трубопровод подвода СОЖ

В 2012 г. разработан комбинированный способ подачи СОЖ (рисунок 2), названный авторами – комбинаторный [3, 8], который заключается в том, что зону обработки по периметру полностью окружают шторами из СОЖ, а за счет наклона этих штор в зоне резания создается проточная ванна из технологической жидкости. Вследствие этого, весь шлам, вылетающий из зоны резания, полностью гарантированно улавливается шторами из СОЖ. Направленно движущиеся шторы СОЖ формируют в зоне обработки ванну из технологической жидкости, своим напором и углом атаки наполняя ее и удерживая от растекания, а также обеспечивая циркуляцию и проточность ванны.



а)



б)

Рисунок 2 – Комбинаторный способ подачи СОЖ:

а – 3-D модель установки для реализации способа, б – фотография реализации способа на станке 3E711ВФ1

В 2014 г. разработано новое устройство для комбинированной подачи СОЖ с формированием в зоне резания динамической пространственной ванны из технологической жидкости [9], показанное на рисунках 3, 4.

В нижней части устройство снабжено рядом нерегулируемых сопел 1–6, спозиционированных, как показано на рисунке 2, за счет которых, вокруг зоны резания, формируется сплошная заградительная штора из СОЖ, улавливающая все отходы шлифования и пары СОЖ. За счет комбинации не менее 6 основных способов подачи (поливом в зону обработки, поливом вне зоны обработки на периферию круга и на заготовку, шлифование в среде СОЖ, гидроаэродинамический, заградительный) нейтрализуется негативное влияние периферийных воздушных потоков на действие СОЖ, а, при контакте круга с заготовкой, мгновенно в зоне резания формируется проточная динамическая пространственная ванна из технологической жидкости.

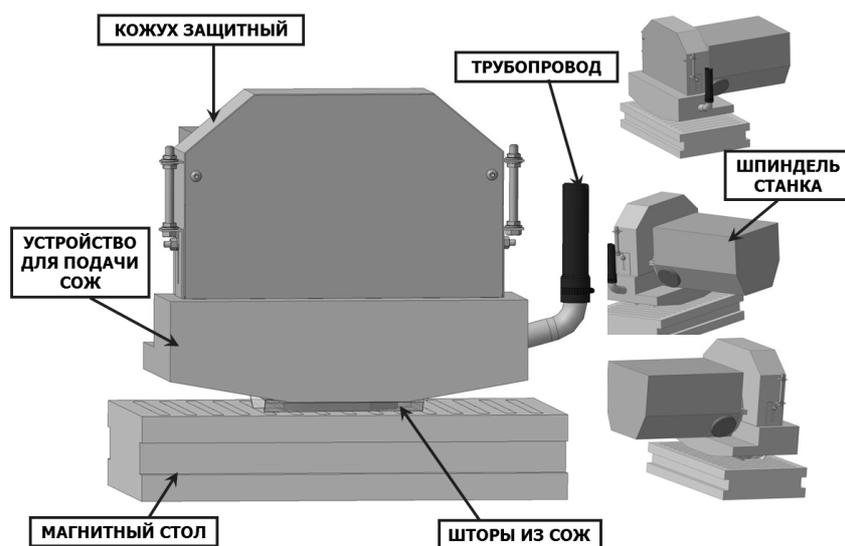


Рисунок 3 – 3-D модель общего вида нового устройства комбинированной подачи СОЖ при плоском шлифовании периферией круга

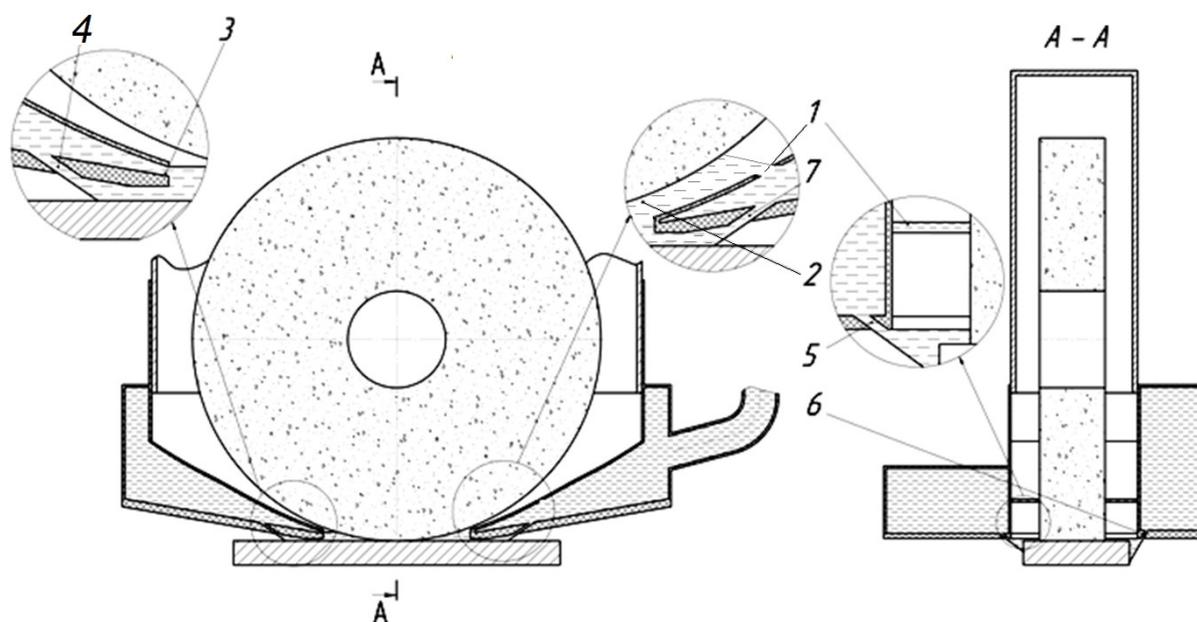


Рисунок 4 – Новое устройство комбинированной подачи СОЖ в разрезе:

- 1 – сопло для отсечения периферийных воздушных потоков и динамического наполнения ванны СОЖ (2) с тыльной стороны круга; 3 – сопло для динамического наполнения ванны из СОЖ с фронтальной стороны круга; 4, 7 – сопла для формирования заградительного контура с фронтальной и тыльной стороны; 5, 6 – сопла для формирования заградительного контура с боковых сторон

На основании развития техники подачи СОЖ, возможно говорить о выделении нового функционального свойства СОЖ – улавливающего. Улавливающее действие СОЖ заключается в снижении предельной концентрации вредных веществ в рабочей зоне оператора станка [10] за счет нейтрализации факела отходов шлифования, отдельных частиц шлама и мелкодисперсных паров технологической жидкости из зоны резания путем их физического взаимодействия с СОЖ.

Рабочая зона оператора станка – пространство высотой до 2 м над уровнем пола, на котором находится место постоянного пребывания рабочего, на котором он находится большую часть своего рабочего времени (более 50 % или более 2 ч непрерывно) [10].

Предельно допустимая концентрация (ПДК) вредных выбросов при шлифовании составляет $0,2 \text{ мг/м}^3$ [10]. В работе [8] указано, что измеренная концентрация вредных выбросов при сухом шлифовании составляет $0,54 \text{ мг/м}^3$, подаче СОЖ поливом – $0,2\text{--}0,24 \text{ мг/м}^3$, загради-

тельном способе подачи СОЖ – 0,18 мг/м³, комбинаторном способе подачи СОЖ – 0,05 мг/м³. При новом комбинированном способе подачи СОЖ (рисунок 3) такие исследования еще не проводились, но по предварительной оценке величина ПДК не должна превышать 0,05 мг/м³.

Численно улавливающее действие СОЖ возможно оценить через безразмерный коэффициент улавливания μ по формуле:

$$\mu = \frac{K}{\text{ПДК}} = \frac{K}{0,2}$$

где K – концентрация вредных выбросов в рабочей зоне, мг/м³.

Тогда, при сухом шлифовании $\mu = 2,7$, подаче СОЖ поливом $\mu = 1 \div 1,2$, заградительном способе подачи СОЖ $\mu = 0,9$, комбинаторном способе подачи СОЖ $\mu = 0,25$. Таким образом, улавливающее действие СОЖ можно считать удовлетворительным при значении коэффициента $\mu \leq 1$ и чем меньше это значение, тем эффективнее улавливающее действие СОЖ.

Тем не менее, следует отметить, что интенсивное попадание раскаленных отходов из зоны резания в СОЖ интенсифицирует ее испарение и нагрев, способно резко изменить ее состав и структуру [11], поэтому в каждом конкретном случае процесс улавливания требует взвешенного подхода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Худобин, Л.В. Смазочно–охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием. – М.: Машиностроение, 2006. – 544 с.
2. Ежелев, А.В. Анализ способов обработки поверхностно–пластическим деформированием / А.В. Ежелев, И.Н. Бобровский, А.А. Лукьянов // Фундаментальные исследования 2012. – № 6–3. – С. 642–646.
3. Тюхта, А.В. Технологическое обоснование и оценка эффективности комбинаторного способа подачи СОТС / А.В. Тюхта, Ю.В. Василенко, К.В. Подмастерьев // Научные технологии в машиностроении. – 2012. – № 5(11). – С. 15–21.
4. Носенко, В.А. Технология шлифования металлов / В.А. Носенко, С.В. Носенко. – Старый Оскол: ТНТ, 2013. – 616 с.
5. Худобин, Л.В. Техника применения смазочно–охлаждающих средств в металлообработке / Л.В. Худобин и др. – М.: Машиностроение, 1977. – 158 с.
6. Василенко, Ю.В. Современные тенденции развития абразивной обработки и перспективы применения СОТС при шлифовании / Ю.В. Василенко, Ю.С. Степанов // Качество машин: сб. тр. 4–й междунар. науч.–техн. конф., 10–11 мая 2001 г.: В 2 т. / Под общ. ред. А. Г. Сулова. – Брянск: БГТУ. – 2001. – Т. 2. – С. 74–77.
7. Василенко, Ю.В. Прогрессивная технологическая оснастка для подачи СОТС при абразивной обработке / Ю.В. Василенко // Известия ОрелГТУ, серия «Машиностроение. Приборостроение». – Орел: ОрелГТУ. – 2003. – № 1–2. – С. 12–14.
8. Тюхта, А.В. Практическое применение комбинаторного способа подачи СОЖ / А.В. Тюхта // Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии: сборник научных трудов международной научно–технической конференции, посвященной 50–летию кафедры технологии машиностроения ЛГТУ. – 2012. – Ч. 2. – С. 24–29.
9. Василенко, О.А. Теоретическое обоснование развития комбинированной техники подачи СОЖ при плоском шлифовании периферией круга / О.А. Василенко, В.Г. Семенов, А.В. Тюхта, Ю.В. Василенко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. – № 5. – С. 72–78.
10. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 30.04.2003 №76 (ред. от 16.09.2013) "О введении в действие ГН 2.2.5.1313–03" (вместе с "ГН 2.2.5.1313–03. Химические факторы производственной среды. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. Гигиенические нормативы", утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 27.04.2003) (Зарегистрировано в Минюсте России 19.05.2003 №4568).
11. Полянсков, Ю.В. Повышение эффективности операций шлифования путем стабилизации свойств СОЖ: Автореф. дисс. ... д–ра техн. наук. – М.: Моск. станкоинструмент. ин–т, 1989. – 34 с.

Василенко Ольга Аркадьевна

ФГБОУ ВПО Госуниверситет – УНПК, г. Орел
аспирант, преподаватель кафедры «Технология машиностроения, автоматизация и электрооборудование»
E-mail: ringingbell@yandex.ru

Тюхта Антон Владимирович

ФГБОУ ВПО Госуниверситет – УНПК, г. Орел
кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Вычислительная техника и информационные технологии»
E-mail: antoha_84@mail.ru

Семенов Виктор Геннадьевич

ФГБОУ ВПО Госуниверситет – УНПК, г. Орел
студент
E-mail: semjonov-viktor@rambler.ru

Василенко Юрий Валерьевич

ФГБОУ ВПО Госуниверситет – УНПК, г. Орел
кандидат технических наук, доцент,
директор Технологического института
им. Н.Н. Поликарпова
E-mail: vyuv-post@yandex.ru

O.A. VASILENKO, V.G. SEMENOV, A.V. TYUKHTA, Yu.V. VASILENKO

EXPANSION OF FUNCTIONAL PROPERTIES COOLANT AT FLAT GRINDING WHEEL PERIPHERY

The substantiation of new functional properties of the coolant - trapping, is to neutralize the waste grinding in the cutting zone and is estimated by the maximum concentration of harmful substances in the working area of the machine.

Keywords: surface grinding, the functions of the coolant, coolant, from capture-stroke, ecological processing.

BIBLIOGRAPHY

1. Khudobin, L.V. Smazочно-okhlazhdayushchiye tekhnologicheskiye sredstva i ikh primeneniye pri obrabotke rezaniyem. – M.: Mashinostroyeniye, 2006. – 544 s.
2. Yezhelev, A.V. Analiz sposobov obrabotki poverkhnostno-plasticheskim deformirovaniyem / A.V. Yezhelev, I.N. Bobrovskiy, A.A. Luk'yanov // Fundamental'nyye issledovaniya 2012. – № 6–3. – S. 642–646.
3. Tyukhta, A.V. Tekhnologicheskoye obosnovaniye i otsenka effektivnosti kombinatornogo sposoba podachi SOTS / A.V. Tyukhta, Yu.V. Vasilenko, K.V. Podmaster'yev // Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii. – 2012. – № 5(11). – S. 15–21.
4. Nosenko, V.A. Tekhnologiya shlifovaniya metallov / V.A. Nosenko, S.V. Nosenko. – Staryy Oskol: TNT, 2013. – 616 s.
5. Khudobin, L.V. Tekhnika primeneniya smazочно-okhlazhdayushchikh sredstv v metalloobrabotke / L.V. Khudobin i dr. – M.: Mashinostroyeniye, 1977. – 158 s.
6. Vasilenko, Yu.V. Sovremennyye tendentsii razvitiya abrazivnoy obrabotki i perspektivy primeneniya SOTS pri shlifovanii / Yu.V. Vasilenko, Yu.S. Stepanov // Kachestvo mashin: sb. tr. 4-y mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., 10–11 maya 2001 g.: V 2 t. / Pod obshch. red. A. G. Suslova. – Bryansk: BGTU. – 2001. – T. 2. – S. 74–77.
7. Vasilenko, Yu.V. Progressivnaya tekhnologicheskaya osnastka dlya podachi SOTS pri abrazivnoy obrabotke / Yu.V. Vasilenko // Izvestiya OrelGTU, seriya «Mashinostroyeniye. Priborostroyeniye». – Orel: OrelGTU. – 2003. – № 1–2. – S. 12–14.
8. Tyukhta, A.V. Prakticheskoye primeneniye kombinatornogo sposoba podachi SOZH / A.V. Tyukhta // Fundamental'nyye i prikladnyye problemy modernizatsii sovremennogo mashinostroyeniya i metallurgii: sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 50-letiyu kafedry tekhnologii mashinostroyeniya LGTU. – 2012. – CH. 2. – S. 24–29.
9. Vasilenko, O.A. Teoreticheskoye obosnovaniye razvitiya kombinirovannoy tekhniki podachi SOZH pri ploskom shlifovanii periferiyey kruga / O.A. Vasilenko, V.G. Semenov, A.V. Tyukhta, Yu.V. Vasilenko // Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2014. – № 5. – S. 72–78.
10. Postanovleniye Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 30.04.2003 №76 (red. ot 16.09.2013) "O vvedenii v deystviye GN 2.2.5.1313–03" (vmeste s "GN 2.2.5.1313–03. Khimicheskkiye faktory proizvodstvennoy sredy. Predel'no dopustimyye kontsentratsii (PDK) vrednykh veshchestv v vozdukhke rabochey zony. Gigiyenicheskkiye normativy", utv. Glavnym gosudarstvennym sanitarnym vrachom RF 27.04.2003) (Zaregistrirvano v Minyuste Rossii 19.05.2003 №4568).
11. Polyanskov, Yu.V. Povysheniye effektivnosti operatsiy shlifovaniya putem stabilizatsii svoystv SOZH: Avtoref. diss. ... d-ra tekhn. nauk. – M.: Mosk. stankoinstrument. in-t, 1989. – 34 s.

Vasilenko Olga Arkadievna

FGBOU VPO «State University – ESPC», Orel
graduate student, teacher of "Machineering technology,
automation and electrical»
E-mail: ringingbell@yandex.ru

Tyukhta Anton Vladimirovich

FGBOU VPO «State University – ESPC», Orel
Ph.D., Lecturer, Department of "Computer Science and
Information Technology"
E-mail: antoha_84@mail.ru

Semenov Victor Gennadievich

FGBOU VPO «State University – ESPC», Orel
student
E-mail: semjonov-viktor@rambler.ru

Vasilenko Yuri Valerievich

FGBOU VPO «State University – ESPC», Orel
Ph.D., Associate Professor,
Director of the Institute of Technology
of N.N. Polikarpov
E-mail: vyuv-post@yandex.ru

МАШИНЫ, АППАРАТЫ, ТЕХНОЛОГИИ **ЛЕГКОЙ И ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

УДК 331.344.2– 027.31:613.646

М.В. РОДИЧЕВА, А.В. АБРАМОВ, П.А. КАНАТНИКОВА

ИННОВАЦИОННАЯ ЗАЩИТНАЯ ОДЕЖДА С ИЗМЕНЯЕМЫМ УРОВНЕМ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ

Динамика теплового состояния человека, а также гигиенические и, в частности, теплозащитные свойства спецодежды в ряде случаев могут противоречить друг другу. Решение противоречия может быть найдено на основе проектирования спецодежды с изменяемым уровнем теплозащитных и гигиенических показателей.

Ключевые слова: теплозащитная спецодежда, биоинженерные системы, биотехническая концепция эргодизайна, биотехническая система «человек – одежда – окружающая среда».

Условия работы в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства часто сопряжены с воздействием на организм человека температурных стрессов. В этом случае возможно, как уменьшение, так и увеличение теплоотдачи организма, что может приводить к повышению заболеваемости и травматизма, в том числе, даже летального от холодовых или тепловых воздействий. В Российской Федерации из ряда климатических факторов особенно неблагоприятное воздействие на организм оказывает холод.

Как известно, человек не располагает достаточно эффективными механизмами приспособления к холоду [2]. Поэтому использование средств индивидуальной защиты – одна из основных мер в профилактике переохлаждения организма и обеспечении безопасных условий труда. Анализ летального травматизма при переохлаждении работников, позволяет выявить четкую зависимость между эффективностью защитного снаряжения и количеством несчастных случаев [6].

Разработка эффективной теплозащитной одежды является сложной медико-технической задачей. Во многом это объясняется различными физиологическими ответами на охлаждающие воздействия различной интенсивности. В ряде случаев теплозащитные свойства специальной одежды являются дополнительными (например, одежда для защиты от нефтепродуктов в условиях умеренного холода).

Проблема разработки таких вариантов спецодежды осложняется необходимостью реализации многочисленных и порой противоречивых требований. Например, одежда для защиты в условиях субнормальных температур должна обладать высокой воздухопроницаемостью [2]. Однако субнормальные температуры нередко сопровождаются жидкими осадками, для защиты от которых применяются ткани с нулевой воздухопроницаемостью.

Современный подход к решению этой задачи заключается в проектировании элементов, позволяющих изменять теплозащитные свойства. Так, зарубежными исследователями разрабатываются «интеллектуальные» ткани (smart fabrics), свойства которых заданы на микро- или нано-уровне. Например, в структуру тканей Gore-Tex введен воздухонепроницаемый слой с микро-перфорациями, которые непреодолимы для капель дождя, но достаточны для обеспечения воздухопроницаемости. Однако образцы теплозащитной одежды с использованием таких тканей основаны на традиционных конструктивных решениях специальной одежды [1]. Поэтому, вследствие относительно быстрой потери «умными» тканями заявленных показателей, эффективность спецодежды снижается, достигая показателей, характерных для традиционных изделий. Восстановление исходных свойств требует применения сложных процедур, что делает малоэффективным использование таких образцов специальной одежды в условиях Российской экономики и, особенно, сельского хозяйства.

Поэтому спецодежда с нетрадиционными конструктивными элементами, в ряде случаев может быть признана более эффективной. Однако, при проектировании таких элементов, необходимо учитывать результаты экспериментальных исследований, что в значительной степени усложняет процесс разработки. Широкомасштабное внедрение одежды с нетрадиционными конструктивными элементами, по мнению Ai Hua Mao и др. возможно на основе инновационной биотехнической концепции эргодизайна: разработка и использование биоинженерных систем автоматизированного проектирования (САПР), которые сочетают математические модели тепломассообмена в системе «человек – одежда – окружающая среда» с традиционными методами конструирования [7].

Однако современные биоинженерные САПР позволяют решить лишь отдельные задачи проектирования. Например, система «Computational Bioengineering System for Thermal Functional Design of Textile Products» проводит численную оценку температурного поля на поверхности одежды с учетом показателей гомеостаза человека, параметров окружающей среды и показателей пакета одежды [7]. На рисунке 1 представлено модельное исследование динамики температурного поля по толщине пакета одежды на различных участках для «среднего» человека при росте 171 см и весе 61 кг, одетого в двухслойный пакет одежды при нормальных условиях окружающей среды ($t=24^{\circ}\text{C}$; $\phi=54\%$; $v=0,3$ м/с).

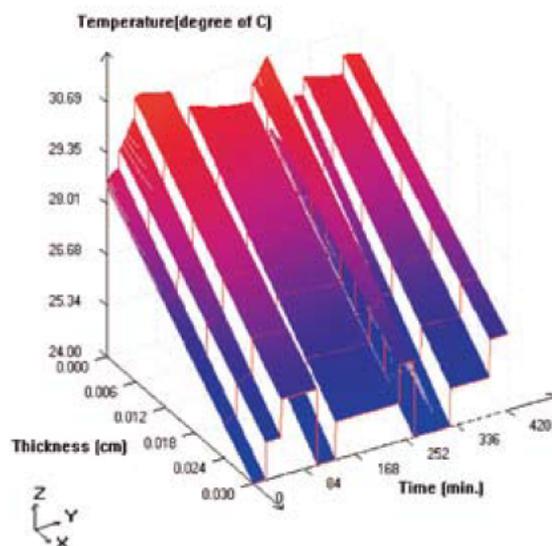


Рисунок 1 – Модельное распределение температурного поля на поверхности одежды

Полученные решения имеют ограниченную информативность, потому что количественная оценка процессов тепло- и массообмена в биотехнической системе «человек – одежда – окружающая среда» проводится с использованием тепловых потоков и значения их плотности. Для проведения подобных исследований авторами статьи предложен научно-исследовательский комплекс процессов тепло- и массообмена в биотехнической системе «человек – спецодежда – окружающая среда» (рисунок 2) [5].

В состав комплекса входят биотехнический эмулятор, который является тепловой моделью тела человека и набор технических устройств, моделирующих интегральные воздействия ветра, солнечного излучения и атмосферных осадков [1].

Оригинальные экспериментальные методики позволяют изучать интенсивность процессов переноса тепла и влаги как в структуре пакета спецодежды (распределение полей температуры и влагосодержания); так и при внешней теплоотдачи путем излучения, конвекции и фазовых превращений [4, 5]. На их основе проведены исследования составляющих теплообмена в замкнутых и открытых воздушных прослойках, теплоотдачи элемента тела человека в условиях ветра.

Например, на рисунке 3 представлены результаты исследований плотности потока с поверхности эмулятора в воздушную прослойку при разности температур между рабочей поверхностью эмулятора и окружающей средой 20°C . Эти результаты могут быть использованы при совершенствовании биоинженерных САПР.

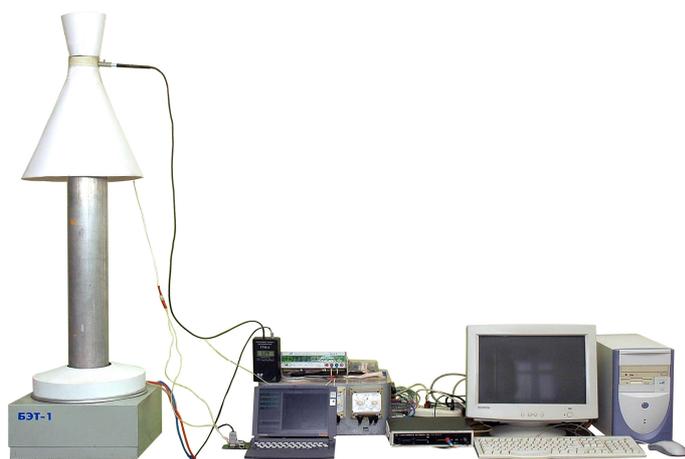


Рисунок 2 – Научно-исследовательский комплекс для исследования процессов тепло и массообмена в биотехнической системе «человек – одежда – окружающая среда»

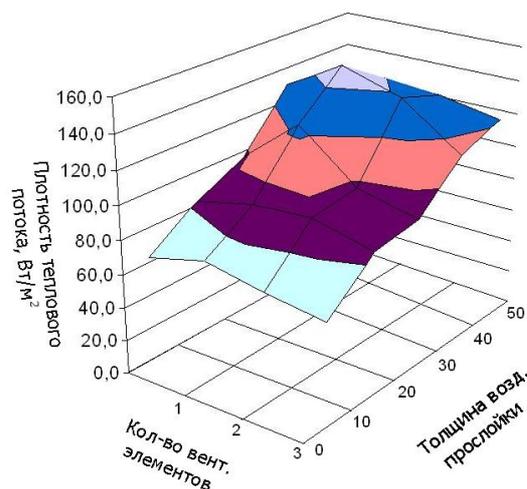


Рисунок 3 – Теплоотдача в воздушную прослойку

Результаты исследований позволили авторам разработать конструкцию конических вентиляционных элементов, которые позволяют регулировать интенсивность процессов теплообмена [3]. На основе этих элементов, а также стабилизированных воздушных слоев, разработана конструкция теплозащитной одежды для условий субнормальных температур (рисунок 4).



Рисунок 4 – Спецдежда для защиты в условиях субнормальных температур. Внешний вид
а – брюк; б – комплекта спереди; в – комплекта сбоку

Стабилизированная воздушная прослойка между утепляющим и верхним слоями пакета одежды обеспечивается за счет жестких каркасных элементов в области плеч и талии. Воздухозаборные элементы в области плеч, талии и на спине позволяют организовать регулируемый воздухозабор под одежду, что позволяет обеспечивать противоречивые требования защиты пододежного пространства от попадания капель воды и обеспечения требуемой вентиляции.

Сравнительные полевые испытания разработанного образца спецдежды и традиционной теплозащитной одежды в условиях морозящего дождя, показывают высокую эффективность авторского решения. Так, на рисунке 5 представлена динамика средних по 11 точ-

кам температуры и скорости движения воздуха под одеждой для следующих условий окружающей среды: $t=8,6 \div 9,8^{\circ}\text{C}$; $v=0 \div 2,5 \text{ м/с}$; $\varphi=98 \div 100\%$.

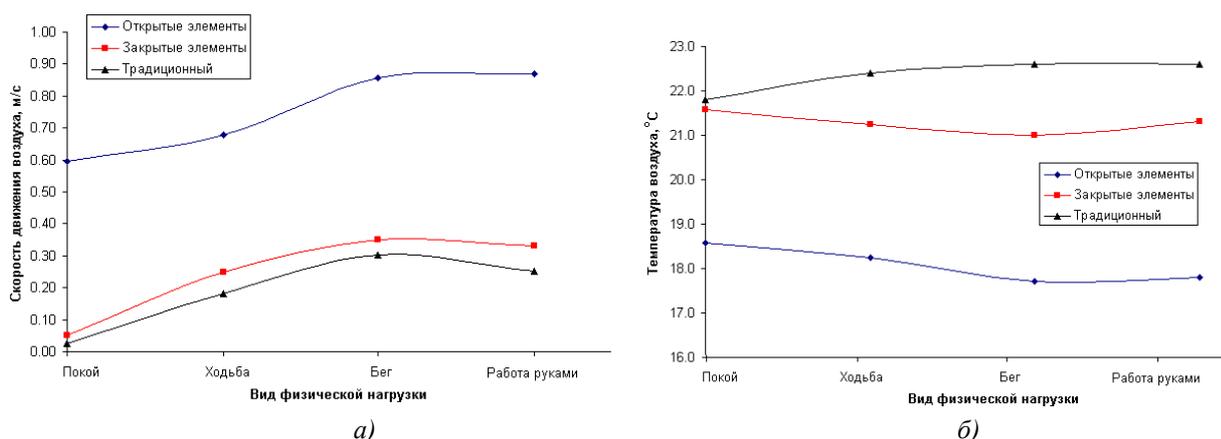


Рисунок 5 – Результаты измерения скорости движения воздуха под одеждой:
 а – динамика скорости движения воздуха под одеждой;
 б – динамика температуры воздуха под одеждой

При проведении исследований, авторами использовался термоанемометр–термометр, чувствительный элемент которого мал и помехоустойчив, что позволяет размещать его под одеждой. Как следует из полученных результатов, температура и скорость движения воздуха в пододежном пространстве авторского образца теплозащитной одежды определяется состоянием воздухозаборных элементов. Когда они закрыты – термодинамические параметры воздуха близки к аналогичным параметрам под традиционной теплозащитной одеждой. При открывании вентиляционных элементов, скорость движения воздуха в пододежном пространстве возрастает в 5 – 6 раз, а температура воздуха под одеждой снижается на 2,5 – 3°C.

Как видно, вентиляционные элементы позволяют изменять теплозащитные свойства спецодежды в широких пределах. Поэтому можно ожидать, что применение теплозащитной одежды с изменяемыми защитными свойствами позволит снизить уровень холодового травматизма работающих на открытом воздухе в холодные и переходные периоды года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов, А.В. Проектирование специальной одежды для защиты от дождя с системой организации и регулирования естественной вентиляции пододежного пространства: дисс. ... канд. техн. наук: 05.19.04: защищена 28.05.2007; утв. 9.11.2007 / Абрамов Антон Вячеславович. – Орел, 2007. – 186 с.
2. Кошечев, В.С. Физиология и гигиена индивидуальной защиты человека от холода / В.С. Кошечев. - М.: Медицина, 1981. – 188 с.
3. Пат. 2340267 РФ, МПК А 41 В 27/28 Устройство для обеспечения регулируемой вентиляции под одеждой / М.В. Родичева, А.В. Уваров, А.В. Абрамов, Ю.Н. Некрасов; заявитель ОрелГТУ. – № 2007112697/12; заявл. 06.04.2007; опубл. 10.12.2008. – 5 с.
4. Уваров, А.В. Проблемы исследования естественной конвекции под одеждой / А.В. Уваров, Ю.Н. Некрасов, М.В. Родичева, А.В. Абрамов // Рабочая одежда и средства индивидуальной защиты. – 2006. – № 1 (32). – С. 24– 26.
5. Родичева, М.В. Моделирование процессов тепломассообмена в биотехнической системе «человек – одежда – окружающая среда» / М.В. Родичева, А.В. Абрамов, А.В. Уваров // Швейная промышленность, 2009. – № 6. – С. 38– 40.
6. Уваров, А. В. Улучшение условий и охраны труда работников АПК путем разработки и внедрения спецодежды для защиты от переохлаждения и перегрева: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01: защищена 19.05.2000; утв. 06.10.2000 / Уваров Александр Васильевич. – Орел, 2000. – 186 с.
7. Computational Bioengineering System for Thermal Functional Design of Textile Products / Ai– Hua Mao, Yi Li, Ruo– Mei Wang, Xiao–Nan Luo, Yue–Ping Guo // Journal of Fiber Bioengineering and Informatics. – 2008. – № 2. – vol. 1. – pp. 107– 116.

Родичева Маргарита Всеволодовна
Госуниверситет – УНПК, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология и конструирование швейных изделий»
Телефон (4862) 55– 11– 20
E– mail tikshi@ostu.ru

Абрамов Антон Вячеславович
Госуниверситет – УНПК, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Охрана труда и окружающей среды»
Телефон (4862) 76– 14– 39
E– mail bgdgtu@mail.ru

Канатникова Полина Андреевна
Госуниверситет – УНПК, г. Орел
Аспирант, кафедра «Информационные технологии»
Телефон (4862) 55– 11– 20
E– mail polka190@yandex.ru

M.V. RODICHEVA, A.V. ABRAMOV, P.A. KANATNIKOVA

INNOVATIVE PROTECTIVE CLOTH WITH CHANGEABLE LEVEL OF HEAT–SHIELDING PROPERTIES

Dynamics of a thermal condition of the person, and also hygienic and, in particular, heat–shielding properties of overalls in some cases can contradict each other. The solution of a contradiction can be found on the basis of design of overalls with variable level of heat– shielding and hygienic indicators.

Keywords: *heat – shielding overalls, bioengineering systems, the biotechnical concept of ergonomic design, biotechnical system «the person – clothes – environment».*

BIBLIOGRAPHY

1. Abramov, A.V. *Proyektirovaniye spetsial'noy odezhdy dlya zashchity ot dozhdy s sistemoy organizatsii i regulirovaniya yestestvennoy ventilyatsii pododezhnogo prostranstva: diss. ... kand. tekhn. nauk: 05.19.04: zashchishchena 28.05.2007: utv. 9.11.2007 / Abramov Anton Vyacheslavovich. – Orel, 2007. – 186 s.*
2. Koshcheyev, V.S. *Fiziologiya i gigiyena individual'noy zashchity cheloveka ot kholoda / V.S. Koshcheyev. – M.: Meditsina, 1981. – 188 s.*
3. Pat. 2340267 RF, MPK A 41 V 27/28 *Ustroystvo dlya obespecheniya reguliruyemoy ventilyatsii pod odezhdoy / M.V. Rodicheva, A.V. Uvarov, A.V. Abramov, Yu.N. Nekrasov; zayavitel' OrelGTU. – № 2007112697/12; zayavl. 06.04.2007; opubl. 10.12.2008. – 5 s.*
4. Uvarov, A.V. *Problemy issledovaniya yestestvennoy konveksii pod odezhdoy / A.V. Uvarov, YU.N. Nekrasov, M.V. Rodicheva, A.V. Abramov // Rabochaya odezhda i sredstva individual'noy zashchity. – 2006. – № 1 (32). – S. 24– 26.*
5. Rodicheva, M.V. *Modelirovaniye protsessov teplomassoobmena v biotekhnicheskoy sisteme «chelovek – odezhda – okruzhayushchaya sreda» / M.V. Rodicheva, A.V. Abramov, A.V. Uvarov // Shveynaya promyshlennost. – 2009. – № 6. – S. 38– 40.*
6. Uvarov, A. V. *Uluchsheniye usloviy i okhrany truda rabotnikov APK putem razrabotki i vnedreniya spetsodezhdy dlya zashchity ot pereokhlazhdeniya i peregreva: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.26.01: zashchishchena 19.05.2000: utv. 06.10.2000 / Uvarov Aleksandr Vasil'yevich. – Orel, 2000. – 186 s.*
7. *Computational Bioengineering System for Thermal Functional Design of Textile Products / Ai– Hua Mao, Yi Li, Ruo– Mei Wang, Xiao–Nan Luo, Yue–Ping Guo // Journal of Fiber Bioengineering and Informatics. – 2008. – № 2. – vol. 1. – pp. 107– 116.*

Rodicheva Margarita Vsevolodovna
State university – ESPC. Orel
Cand. tech. sci., senior lecturer, head of the department «Technology and designing of garments»
Phone (4862) 55– 11– 20
E– mail tikshi@ostu.ru

Abramov Anton Vyacheslavovich
State university – ESPC. Orel
Cand. tech. sci., senior lecturer, department «Labor and environmental protection»
Phone (4862) 76– 14– 39
E– mail bgdgtu@mail.ru

Kanatnikona Polina Andreevna
State university – ESPC. Orel
Graduate Student department «Information technologies»
Phone (4862) 55– 11– 20
E– mail polka190@yandex.ru

Т.В. КВАСКОВА, О.В. ГОРСКАЯ

РАСЧЕТ МАТЕРИАЛОЕМКОСТИ ИЗДЕЛИЯ ИЗ ТКАНЕЙ С РИСУНКОМ В КЛЕТКУ НА ЭТАПЕ ЭСКИЗНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Разработана модель платья женского из ткани с рисунком в клетку. Спрогнозирован расход ткани на единицу изделия на этапе эскизного проектирования.

Ключевые слова: ткань в клетку, раскладка, долевая нить, эскизное проектирование, промышленная коллекция, площадь лекал, материалоемкость.

Информация о расходах материалов, из которых изготавливается изделие, является основной информацией, необходимой для оценки прибыли и рентабельности в условиях массового производства. Известно, доля материальных затрат в структуре себестоимости одежды составляет от 80 до 90 %, в связи с чем рациональному использованию материалов в швейной промышленности уделяют особое внимание. Возможность прогнозирования и анализа экономических показателей на этапе разработки эскиза дает возможность ускорить выпуск не только модных, но и экономичных моделей. Если на этапе разработки эскиза определить значение расхода материала верха на единицу изделия, то вероятность повышения уровня рентабельности производства на последующих его стадиях многократно возрастает, т.к. чем выше уровень рентабельности, тем меньше себестоимость швейного изделия, которая, прежде всего, определяется стоимостью входящих в это изделие материалов. В этой связи, снижение материалоемкости является одним из основных факторов повышения рентабельности при условии сохранения качественных показателей.

Материалоемкость моделей и рациональность раскладки в массовом производстве, определяют путем сравнения фактического процента межлекальных потерь с отраслевым нормативом, которые желательно проводить на самых ранних этапах проектирования. Известно, что ошибки, допущенные на этапах проектирования, очень сложно, а иногда и невозможно исправить на более поздних этапах производства, поэтому возникает необходимость дать экономическую оценку моделей одежды на самых ранних этапах проектирования, например, на этапе разработки эскиза [4].

Проектирование изделий из тканей в клетку всегда позиционируется с трудностями выпуска высококачественных изделий в виду необходимости обеспечения совпадения на деталях поперечного рисунка клетки. При создании модели следует учитывать, что расход клетчатой ткани на изделие будет больше, чем гладкокрашеной, причем, тем больше, чем крупнее рисунок клеток. Ткани с несимметричным рисунком клеток также требуется на изделие больше, чем ткани с симметричным рисунком (исключение составляют ткани с мелким рисунком клеток). Это вызвано необходимостью при раскрое ткани подгонять рисунок клеток на парных деталях и швах. Важную роль играет, в каком направлении (долевом, поперечном, косом, полукосом) лучше использовать рисунок ткани для данного размеророста и в каких комбинациях лучше всего сочетаются между собой клетки ткани по форме и цвету. Для достижения симметричности рисунка, на частях различных деталей, дают припуск на подгонку рисунка, который составляет по ширине $3/4$ раппорта, а по длине 1 см. В раскладке детали одношовных рукавов, верхних частей двухшовных рукавов, рукавов реглан со средним швом, манжеты и некоторых др. деталях необходимо располагать по одной уточной нити. Основные детали на тканях с рисунком клетки раскладывают без отклонений нити основы. Таким расположением деталей обеспечивается лучший вид и качество одежды из клетчатых тканей. В этой связи, потери материалов в процессе изготовления одежды из тканей с рисунком в клетку достигают иногда 20 и более процентов.

Всякая модель одежды характеризуется конструктивно–модельными параметрами (лабильными и стабильными). Платья, в целом, относятся к лабильным ассортиментным группам, т.е. такая одежда имеет сильно выраженную тенденцию к изменению модных элементов, соответственно чему возрастает число факторов, которые необходимо учитывать при априорной экономической оценке.

Нами рассмотрена возможность прогнозирования средних значений таких экономических показателей, как расхода материала на одно изделие, на этапе эскизного проектирова-

ния. Предложена модель женского платья из ткани одинаковой ширины с симметричным мелким рисунком в клетку (рисунок 1).

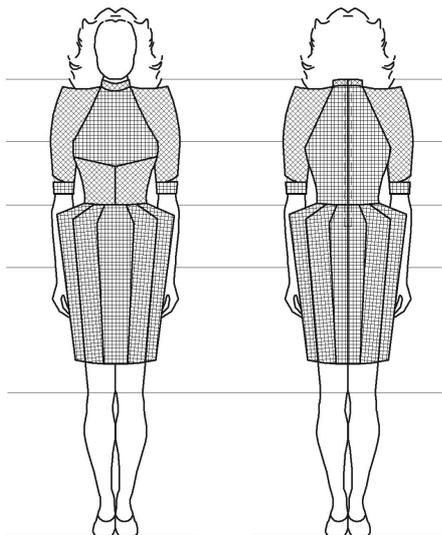


Рисунок 1 – Внешний вид исследуемого женского платья из клетчатой ткани

Изделия из ткани в мелкую клетку (гленчек) пользуются повышенным спросом у потребителей в этом сезоне. В области плеча, верхних частях рукава реглан, имеются вытачки, средний шов отсутствует. Рукав, являясь важнейшим элементом композиции, диктует форму платья в целом. Композиция лифа платья основана на сложных формах членения и сочетании двух направлений рисунка. Вытачки переведены в горизонтальную линию соединения частей лифа. Линия талии передней юбки оформлена так же складками.

Для исследования проведен сопоставительный анализ проектируемой модели по показателям материалоемкости и влиянию на них отдельных факторов с применением метода поискового прогнозирования с использованием регрессионных уравнений, т.е. математических моделей, описывающих связь зависимой переменной, например, количества

межлекальных отходов с независимыми т.к., покроем рукава, силуэтом изделия, видом и рисунком материала. Этот метод носит вероятностный характер и позволяет получить предсказание состояния объекта исследования при наблюдательных тенденциях. При большом числе факторов в качестве первого приближения рассмотрено линейное уравнение регрессии вида:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (1)$$

где y – исследуемая функция (процент межлекальных потерь);

$X_1 \dots X_n$ – независимые факторы, влияющие на функцию;

β_0 – свободный член уравнения, учитывающий усредненное значение неучтенных факторов;

$\beta_1 \dots \beta_n$ – коэффициенты усредненного уравнения.

Для оценки показателей использован шаговый регрессионный метод с одновременным отбором значимых конструктивных факторов, которые максимально описывают композиционно–конструктивное решение модели. Факторы, характеризующие объективно меняющиеся параметры для данной ассортиментной группы (т.к. ширину ткани, размерные параметры изделия), не рассматривали. Их усредненное влияние учитывает свободный член уравнения. Коэффициенты $\beta_1 \dots \beta_n$ вычисляются по средствам соответствующих методов регрессионного анализа.

Эскиз модели женского платья характеризуется следующими значениями факторов: доля мелких деталей (X_1), доля площади деталей раскраиваемых по косой (X_2); рукав реглан (X_4); силуэт полуприлегающий (X_7), площадь клетки (X_8), мелкая клетка (X_9), обхват груди (X_{13}), ширина рамки раскладки (X_{15}), настиление «лицом вниз» (X_{16}), отрезное по линии талии (X_{19}).

В качестве факторов уравнения выбраны только лабильные факторы, которые изменяются в каждом сезоне в зависимости от направления моды, а статические факторы обычно слабо влияют на экономические показатели моды, поэтому в уравнении ими можно пренебречь. Вид регрессионного уравнения по расчёту межлекальных отходов зависит от ассортимента изделий. Для плательного ассортимента оно имеет вид:

$$a = 21,5 - 4,1x_1 + 0,11x_2 - 1,7x_3 - 1,3x_4 + 1,9x_5 + 1,6x_7 + 0,04x_8 + 2,5x_9 + 0,88x_{10} + 0,5x_{11} - 0,039x_{13} - 0,012x_{15} + 1x_{16} - 2,1x_{19} + 0,5x_{21} + 0,03x_{23} - 0,8x_{24} - 0,6x_{25} + 0,4x_{30} \quad (2)$$

Рациональность раскладок определяют путем сравнения фактического процента межлекальных потерь с отраслевым нормативом. Использованы данные среднеотраслевых межлекальных отходов, для женского платья $a_{\min} = 7\%$ и $a_{\max} = 25\%$.

При оценке материалоемкости по методу поискового прогнозирования с использованием регрессионных уравнений, полученные данные составили 15%.

Разработанная модель женского платья по показателю межлекальных потерь не превышает установленные отраслевые нормативы, поэтому может использоваться для дальнейшей разработки, с целью внедрения в массовое производство.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что данный метод позволяет оценить степень экономичности модели в целом и наиболее значимые конструктивные факторы, влияющие на показатели экономичности, а так же выявить неэкономичные модели еще на стадии эскизного проектирования и предложить способы целенаправленного улучшения их экономических показателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галынкер, И.И. Справочник по подготовке и раскрою материалов при производстве одежды / И.И. Галынкер, К.Г. Гущина, И.В. Сафронова. - М.: Легкая индустрия, 1980. – 240 с.
2. Кокеткин, П.П. Одежда: технология – техника, процессы – качество / П.П. Кокеткин. М.: МГУДТ, 2001. – 560 с.
3. Литвина, Л.М. Моделирование одежды из клетчатых тканей. / Л.М. Литвина. - М.: Лёгкая индустрия, 1976. – 96 с.
4. Попандопуло, В.Н. Анализ экономичности моделей одежды / В.Н. Попандопуло. М.: Легпромбытиздат, 1989. – 96 с.
5. Шаньгина, В.Ф. Производство одежды из клетчатых тканей / В.Ф. Шаньгина, И.И. Клабанова. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. – 112 с.
6. Радзивильчук, Л.И. Оценка экономичности моделей одежды / Л.И. Радзивильчук. Благовещенск: Амурский государственный университет, 2006. – 146 с.

Кваскова Тамара Викторовна
ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры ТикШИ
Тел. (4862) 55–11–20
E-mail: tikshi@ostu.ru

Горская Ольга Владимировна
ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», г. Орел
Магистрант кафедры ТикШИ
Тел. (4862) 55–11–20
E-mail: tikshi@ostu.ru

T. V. KVASKOVA, O. V. GORSKAYA

CALCULATION OF MATERIALS CONSUMPTION PRODUCT AT THE STAGE OF SCHEMATIC DESIGN FROM THE FABRIC TARTAN

Developed a model of women's dresses from fabric tartan. Is predicted consumption of fabric per unit of product at the stage of schematic design.

Keywords: fabric tartan, pattern lay, grain of fabric, schematic design, industrial collection, square outline frame, materials consumption.

BIBLIOGRAPHY

1. Galynker, I.I. Spravochnik po podgotovke i raskrovy materialov pri proizvodstve odezhdy / I.I. Galynker, K.G. Gushchina, I.V. Safronova // M.: Legkaya industriya, 1980. 240 s.
2. Koketkin, P.P. Odezhda: tekhnologiya – tekhnika, protsessy – kachestvo / P.P. Koketkin. M.: MGUDT, 2001. – 560 s.
3. Litvina, L.M. Modelirovaniye odezhdy iz kletchatykh tkaney. / L.M. Litvina. M.: Logkaya industriya, 1976. – 96 s.
4. Popandopulo, V.N. Analiz ekonomichnosti modeley odezhdy / V.N. Popandopulo. M.: Legprombytizdat, 1989. – 96 s.
5. Shan'gina? V.F. Proizvodstvo odezhdy iz kletchatykh tkaney / V.F. Shan'gina, I.I. Klabanova. M.: Legkaya i pishchevaya promyshlennost', 1983. – 112 s.
6. Radzivil'chuk, L.I. Otsenka ekonomichnosti modeley odezhdy / L.I. Radzivil'chuk. Blagoveshchensk: Amurskiy gosudarstvennyy universitet, 2006. 146 s.

Kvaskova Tamara Viktorovna
«State University – ESPC» Orel
Ph.D., assistant professor of Tiksha
Tel. (4862) 55–11–20
E-mail: tikshi@ostu.ru

Gorskaya Olga Vladimirovna
«State University – ESPC» Orel
Master of the department Tiksha
Tel. (4862) 55–11–20
E-mail: tikshi@ostu.ru

Е.Л. МОСЬКИНА, Е.В. ПРОКОПОВА, А.А. МОСЬКИН, Н.В. ДЮЖИКОВ

ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА В СИСТЕМЕ «ШКИВ–НОЖ–НАСТИЛ»

В статье рассматриваются физико–механические свойства текстильных полотен, оказывающие различное влияние на процесс настиланья и технологию раскроя.

Ключевые слова: настиланье, раскрой, жесткость, осыпаемость, сопротивление.

Одним из перспективных направлений комплексной автоматизации процесса изготовления одежды является внедрение новых видов тканей, содержащих синтетические волокна таких как лайкра. Такие ткани имеют актуальность в своем применении.

Мода неумолимо бежит вперед и параллельно развивается вместе с наукой, которая предлагает новые высокие технологии и ставит перед текстильной промышленностью очередные задачи. Развитие новых тканей коснулось и спортивной одежды. Технологии в производстве спортивной одежды могут принести значительную пользу только тем, что позволяют полностью контролировать физическую активность спортсмена, учитывая индивидуальные особенности конкретного человека. Производитель спортивной одежды Under Armour в преддверии Олимпийских игр в Сочи презентовал костюм для спидскейтинга, который заявлен как средство достижения новых мировых рекордов. Костюм разработан в сотрудничестве с известными экспертами в области скорости и аэродинамики.

Костюмы, изобретённые компанией Speedo в сотрудничестве с НАСА, стали настолько эффективным способом увеличения показателей в плавании, что неоднократно вставал вопрос о запрещении использования новой технологии.

Сделанная из смеси нейлона и эластана, и содержащая водоотталкивающую отделку ткань уменьшает сопротивление воды и позволяет пловцу двигаться быстрее. Ткань, которую назвали «кожа акулы», сегодня используется не только в производстве экипировки для профессиональных спортсменов. На достижение новых рекордов играет роль не только качество самого материала, но и точность посадки изделия на теле человека, позволяющей увеличить скорость движения и создающего комфорт.

Учитывая, что качество изделия закладывается уже на этапе раскроя текстильных материалов на детали и данный процесс составляет около 30% общих трудозатрат при изготовлении изделия. Раскрой текстильных материалов связан с рядом трудностей и недостатков, которые заключаются в быстром затуплении режущего инструмента, вызванного трением и налипанием на рабочую часть продуктов деструкции материала, в большом количестве брака по линии реза из–за относительного смещения слоев настила и вибрации раскройного оборудования. Интенсивное затупление режущей части инструмента, связанное с большим количеством переточек и быстрым его выходом из строя, ведет к увеличению времени обработки.

Существующий технологический процесс раскроя не удовлетворяет современным требованиям обеспечения качества и точности кроя. Особенно это заметно при выкраивании из тканей, содержащий направленный рисунок, полоску, клетку, где приходится проводить контрольную подрезку по лекалам для соблюдения общего рисунка или при выкраивании делить настил на две части для более точного выполнения кроя. Все эти затраты также увеличивают трудоемкость изготовления.

Повышение требований к качеству деталей кроя вызвано также внедрением автоматизированных швейных машин, эффективность работы которых в значительной степени определяется точностью и чистотой срезов деталей.

Режущим инструментом стационарной раскройной машины является замкнутая стальная лента, натянутая на шкивы. Натяжение ленты создается натяжным устройством одного из шкивов. Колебания шкивов часто приводят к недопустимо большим поперечным колебаниям ветвей передачи, которые часто рассматриваются как вынужденные, в то время их

следует рассматривать, как параметрические. Динамические процессы различных типов раскройных ленточных машин можно считать идентичными. Для этого была рассмотрена математическая модель «шкивы–нож–настил», которая позволила провести анализ движения режущего инструмента и вывести зависимость отклонения размера от натяжения ножа и высоты настила. При раскрое на прямых участках основная нагрузка от сил резания и подачи на материал направлена на лезвие ножа. При вырезании криволинейного участка нож должен быть ориентирован по касательной к контуру. Однако, происходит отгиб и деформация настила в результате действия на кромку ножа со стороны настила с лекалом (при вырезании вогнутого контура) или со стороны отрезаемой части (при вырезании выпуклого контура) боковой силы. Учитывая действие данной силы на отклонение от размера лекала как более важной, была рассмотрена математическая модель «шкивы–нож–настил».

Для решения поставленной задачи, математическая модель «шкивы–нож–настил» была представлена в переменных как передача с гибкой связью. С учетом малой жесткости ленточного ножа, его можно было рассматривать как струну. Данный метод расчета справедлив для узкого диапазона скоростей – от 5 до 25 м/с (скорость движения ленточного ножа, в среднем, составляет 20 м/с). Схема движения режущего инструмента стационарной раскройной машины представлена на рисунке 1.

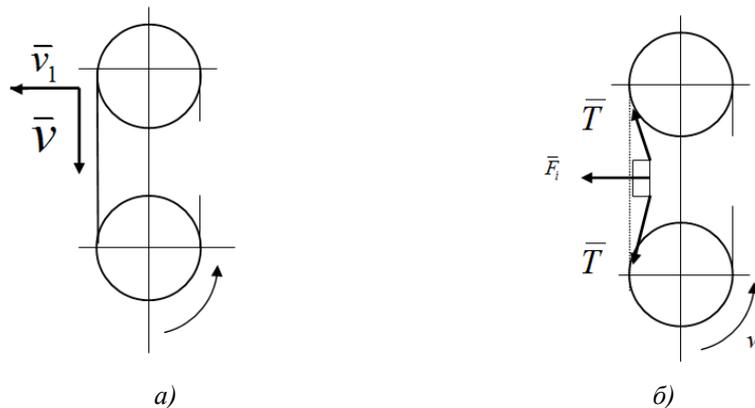


Рисунок 1 – Схема движения режущего инструмента – ножа раскройной машины:
 а) Схема действия скоростей, б) схема действия силы инерции ножа и сил натяжения

Рассматривая ленточный нож стационарной раскройной машины, как струну, можно решить ряд задач.

Одна из поставленных задач – это вывести дифференцированное уравнение малых поперечных колебаний ленточного ножа и определить частоту колебаний.

Вторая – определить величину погрешности, выявленную в результате амплитудных колебаний ленточного ножа при выкраивании из заготовки. Для определения значений параметров движения ленточного ножа выведем дифференцированное уравнение в частных производных, описывающее малые поперечные колебания ветви с гибкой нитью (ленточного ножа) и определим частоту колебаний.

Вывод уравнения малых колебаний движущейся ветви передачи проведем с помощью переменных Эйлера.

Нерастяжимый нож, показанный на рисунке 1, имеет продольное движение ветви с гибкой связью (ножа) со скоростью v и переносное движение со скоростью v_1 , тогда полная скорость элемента стержня составляет:

$$\bar{V} = \bar{v} + \bar{v}_1 \tag{1}$$

Допускаем, что рассматриваемый стержень нерастяжим, v зависит и от координаты перемещения элемента стержня s и от времени t . Для описания движения достаточно знать положение стержня во времени и координату участка стержня (ножа), которая выражается функцией $x = fx(s(t), t)$.

Скорость ножа представляет собой полную производную координат точек осевой линии ножа по времени и выражаем формулой:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dx(S(t), t)}{dt} = \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial x}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial x}{\partial s} v \tag{2}$$

где: $\frac{\partial s}{\partial t} = v$;

$\frac{\partial x}{\partial t}$ – величина, характеризует изменение координат сечения во времени при фиксированном S (местная производная),

$\frac{\partial x}{\partial s} v$ – величина, характеризует изменение координат точек осевой линии ножа при его движении (переносная или конвективно–переносная).

Компоненты абсолютного ускорения определяем, как вторую производную от x и выражаем формулой:

$$\frac{\partial^2 x(s(t), t)}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 x}{\partial s \partial t} \frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial^2 x}{\partial s \partial t} v + \frac{\partial^2 x}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial t} v = \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + 2v \frac{\partial^2 x}{\partial s \partial t} + v^2 \frac{\partial^2 x}{\partial s^2} \quad (3)$$

Учитывая силы инерции ножа и принимая $Fi = \frac{\partial m_0 \partial^2 x}{\partial t^2}$, уравнение колебания принимает вид:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + 2v \frac{\partial^2 x}{\partial s \partial t} - \left(\frac{T}{m_0} - v^2 \right) \frac{\partial^2 x}{\partial s^2} = 0 \quad (4)$$

Решение данного уравнения определяется как функция гармонических колебаний:

$$x = x_1(s) e^{ipt}, \quad (5)$$

где:

$$e^{ipt} = \cos pt + i \sin pt, \quad i = \sqrt{-1} \quad (6)$$

При подстановки уравнения (5) в уравнение (4) получим уравнение относительно функции $x(s)$:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial s^2} - \frac{2vp i}{\left(\frac{T}{m_0} - v^2 \right)} \frac{\partial x}{\partial s} + \frac{p^2}{\left(\frac{T}{m_0} - v^2 \right)} x = 0 \quad (7)$$

Функция x должна удовлетворять краевым условиям:

$$s = 0, x = 1; \quad s = l, x = 0, \quad (8)$$

где: l – исследуемая часть ножа.

Примем:

$$a_1 = \frac{2vp}{\left(\frac{T}{m_0} - v^2 \right)}, \quad a_2 = \frac{p}{\left(\frac{T}{m_0} - v^2 \right)}, \quad \frac{\partial^2 x}{\partial s^2} = \lambda^2, \quad \frac{\partial x}{\partial s} = \lambda \quad (9)$$

Тогда характеристическое уравнение (7) принимает вид многочлена второй степени:

$$\lambda^2 - a_1 i \lambda + a_2 = 0 \quad (10)$$

Определяем корни квадратного уравнения:

$$\lambda_{1,2} = i \frac{a_1 \pm \sqrt{a_1^2 + 4a_2}}{2} \quad (11)$$

Тогда уравнение (7) можно представить в виде:

$$x = C e^{\lambda_1 s} + C^2 e^{\lambda_2 s} \quad (12)$$

Решение (12) должно удовлетворять однородным краевым условиям, что позволяет получить следующее условие:

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ e^{\lambda_1 \ell} & e^{\lambda_2 \ell} \end{vmatrix} = 0 \quad \text{или} \quad e^{(\lambda_2 - \lambda_1) \ell} = 1 \quad (13)$$

Это условие выполняется при:

$$(\lambda_2 - \lambda_1) \ell = 2\pi n i \quad \text{или} \quad \sqrt{a_1^2 + 4a_2} \ell = 2\pi n \quad (14)$$

Тогда, после преобразований, получаем значение частот колебаний с учетом приведенной массы ножа (m_0):

$$P_n = \frac{\pi m}{\ell} \sqrt{\frac{T}{m_0} \left(1 - \frac{m_0 v^2}{T}\right)} \quad (15)$$

Данная формула позволяет рассчитать различные формы колебаний в зависимости от параметров системы « шкив – нож – настил» при оценке их влияния на точность края.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базюк, Г.П. Резание и режущий инструмент в швейном производстве / Г.П. Базюк. М.: Легкая индустрия, 1980. – 187 с.
2. Моськина, Е.Л. Влияние вынужденных вибраций корпуса раскройной машины на технологию изготовления швейных изделий / Е.Л. Моськина, Н.А. Демидова // Известия ОрелГТУ. Сер. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – № 6/278(577). – 2009. – С. 76–80.
3. Голубкова, В.Т. Подготовительно–раскройное производство швейных предприятий / В.Т. Голубкова, Р.Н. Филимонова, М.А. Шайдоров. Мн.: Высш. школа, 2002. – 206 с.

Моськина Елена Леонидовна

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры ТиКШИ
Тел. (4862) 55 – 11 – 20
E-mail: flptikshi@gmail.com

Моськин Артем Александрович

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел
Студент
Тел. (4862) 77–97–20
E-mail: topich94@mail.ru

Проконова Елена Владимировна

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры ТиКШИ
Тел. (4862) 55 – 11 – 20
E-mail: flptikshi@gmail.com

Дюжиков Никита Владимирович

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел
Студент
Тел. (4862) 77–97–20
E-mail: topich94@mail.ru

E.L. MOSKINA, E.V. PROKOPOVA, A.A. MOSKIN, N.V. DYGIKOV

FEATURES CUTTING TOOL IN THE SYSTEM «PULLEY–KNIFE–PRESENT»

Physicomechanical properties of textile cloths make various impact on process of a flooring and technology of cutting.

Keywords: *flooring, open, rigidity, flow–ability, resisance.*

BIBLIOGRAPHY

1. Bazyuk, G.P. Rezaniye i rezhushchiy instrument v shveynom proizvodstve / G.P. Bazyuk. – M.: Legkaya in–dustriya, 1980. – 187 s.
2. Mos'kina, Ye.L. Vliyaniye vynuzhdennykh vibratsiy korpusa raskroynoy mashiny na tekhnologiyu izgotovleniya shveynykh izdeliy / Ye.L. Mos'kina, N.A. Demidova // Izvestiya OreIGTU. Ser. Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – № 6/278(577). – 2009. – S. 76–80
3. Golubkova, V.T. Podgotovitel'no–raskroynoye proizvodstvo shveynykh predpriyatiy / V.T. Golubkova, R.N. Filimonenkova, M.A. Shaydorov. Mn.: Vyssh. Shkola, 2002. – 206 s.

Moskina Elena Leonidovna

«State University – UNPK», Orel
Candidate of technical sciences,
associate Professor TiKSI
Phone (4862) 55 – 11–20
E-mail: flptikshi@gmail.com

Moskin Artem Aleksandrovich

«State University – UNPK», Orel
Student
Phone (4862) 77–97–20
E-mail: topich94@mail.ru

Prokopova Elena Vladimirovna

«State University – UNPK», Orel
Candidate of technical sciences,
associate Professor TiKSI
Phone (4862) 55 – 11–20
E-mail: flptikshi@gmail.com

Dugikov Nikita Vladimirovich

«State University – UNPK», Orel
Student
Phone (4862) 77–97–20
E-mail: topich94@mail.ru

ИННОВАЦИИ И КАДРЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 378.1

М.И. АБАШИН, Е.В. ВИНОКУРОВА, А.Л. ГАЛИНОВСКИЙ, В.Б. ТИМОФЕЕВ

АНАЛИЗ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СОТРУДНИЧЕСТВА УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ РОССИИ И КИТАЯ В НАУЧНО–ТЕХНИЧЕСКОЙ СФЕРЕ НА ОСНОВЕ МАКРОЭКОНОМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

В статье исследуется вопрос необходимости поиска взаимовыгодных направлений и тематик научных исследований для повышения эффективности сотрудничества инженерных вузов России и Китая. Анализ проводится с учетом выявленных приоритетных направлений развития экономики Китая. Рассматриваются исторические аспекты взаимодействия двух стран в вопросах научно–технического сотрудничества. Дается оценка перспективам их развития на ближайшую перспективу. Сделаны выводы, что развитию отношений в научно–инновационной сфере способствует обмен студентами и их обучение в университетах обеих стран. Для иллюстрации представлены некоторые статистические данные развития экономики и научно–технической сферы.

Ключевые слова: Китай, Россия, международное сотрудничество, приоритетные направления, взаимодействие, инженерные вузы.

Одним из актуальных вопросов развития научно–технических связей между вузами России и Китая является поиск взаимовыгодных направлений сотрудничества соответствующих приоритетным направлениям науки и техники. На уровне государственной политики двух стран эти направления выработаны и являются основой для развития экономики. Если в нашей стране они общеизвестны, то в отношении Китая их необходимо выявить в результате аналитических исследований. Несомненно, что вузы двух стран будут развивать свое сотрудничество, придерживаясь своих внутренних и государственных интересов, поэтому целесообразно провести сопоставительный анализ приоритетных направлений, определяя общие точки соприкосновения, оценивая свои возможности и потенциал.

Сотрудничество России и Китая имеет давнюю историю и активно развивается в последние десятилетия. И если в 50–е годы для него была характерна односторонняя помощь со стороны СССР, то сегодня оно стало равноправным [1, 2]. В 90–х годах прошлого столетия было провозглашено стратегическое взаимодействие России и Китая. Пекинская декларация РФ и КНР (В.В. Путин – Цзян Цзэминь, 18 июля 2000 г.) подтверждает актуальность выдвинутых ранее инициатив и подписанных документов, ориентируя на курс закрепления добрососедства и сотрудничества. Середина 90–х гг. характеризуется как период интенсивного развития научно–технической сферы в Китае. Ориентация на инновационное развитие и теорию технического прогресса была заложена Дэн Сяопином (речь на Национальной научной конференции 1978 г.), который сформулировал три тезиса: наука и технологии – важнейшая производительная сила, работники интеллектуального труда принадлежат к рабочему классу и их таланты должны вознаграждаться, реформа систем управления наукой и технологией направлена на либерализацию производительных сил. [3]

Уже в 80–х годах Китай начал наращивать свой научно–технический потенциал путем развития высоких технологий и совершенствования системы образования. Приоритетными направлениями развития приняты: биоинженерия, космос, информационные технологии, лазерная техника, энергетика, новые материалы, технологии освоения Мирового океана [4].

В 1992 году на XIV съезде Коммунистической партии Китая было заявлено, что наука и техника составляют главную производственную силу и являются ключевым ресурсом подъема экономики Китая в перспективе. С учетом этого руководство страны взяло курс на активизацию научно–исследовательской деятельности и был принят «Десятилетний план развития науки и техники», вступил в силу «Закон о научно–техническом прогрессе». В 1992 г. Правительство КНР приняло «Государственную средне– и долгосрочную программу развития науки и техники на 2000–2020 гг.». Именно в ней содержался перечень основных направлений развития высокотехнологичных отраслей. Согласно принятым документам с целью эффективной реализации

намеченных планов была разработана трехуровневая модель развития: акцентирование внимания на фундаментальные исследования, научные исследования инновационного характера, развитие высоких технологий и создание индустрии высоких и новых технологий [5, 6].

С 1995 года в Китае отмечается рост наукоемкости ВВП благодаря активизации инвестиций со стороны частного сектора экономики–предпринимателей. Оформляются законодательно и расширяются возможности по коммерциализации новых технологий для государственных вузов. Развиваются новые формы государственного финансирования инноваций, внедряются льготы для высокотехнологичных производств.

16 июля 2001 г. Был подписан «российско–китайский договор о добрососедстве, дружбе и сотрудничестве», в содержании которого говорилось и необходимости продолжения курса на развитие взаимовыгодного сотрудничества в таких областях как: торгово–экономическая, военно–техническая, научно–техническая, транспортная, а также в сфере информационных технологий.

Начиная с 2001 года товарооборот между КНР и РФ постоянно растет. В 2011 году он достиг 79,2 млрд. долларов (прирост составляет 40% от 2001 года). В 2011 году было реализовано 27 крупных российско–китайских проекта в 19 регионах РФ на общую сумму в 10 млрд. долларов [7, 8].

В совместном заявлении руководителей двух стран 2 декабря 2002 года (В.В. Путин – Цзян Цзэминь) были сформулированы три направления развития российско–китайских взаимоотношений и партнерства: политические контакты, торгово–экономическое сотрудничество, взаимная поддержка в международных вопросах. Кроме того наши страны договорились о создании благоприятных условий для развития приграничного и межрегионального торгово–экономического сотрудничества. [8]

Таким образом, в начале 21 века Китай для России превратился в генерального партнера в Азиатском регионе. В 2009 году исполнился шестидесятилетний юбилей с момента установления российско–китайских отношений.

Сотрудничество на региональном уровне становится более системным. Отмечается уход от исключительного торговых отношений в сферу всестороннего развития в таких сферах как высокие технологии, финансы, энергетика, авиация, космос и другие.

Активность регионального развития при этом зависит от кумулятивного действия и использования новых типов товаров, связанных с НИОКР.

Совместная декларация Российской Федерации и Китайской народной Республики (21 марта 2006 г.) говорит о выходе двух стран на «траекторию ускоренного роста». Возможным потенциалом для наращивания взаимодействия являются инвестиционное сотрудничество, машиностроительная и высокотехнологические сферы.

Подтверждением развития взаимного сотрудничества между нашими странами являются статистические данные, согласно которым с 2007 года в сфере промышленности высоких технологий Россия осуществляла в Китае 156 проектов: 63 – освоение естественных ресурсов, 53 – медицина и биоинженерия, 17 – производство и освоение новых материалов, 23 – сельское хозяйство и охрана окружающей среды. Соглашение о реализации данных проектов подписано в Пекине в рамках российско–китайского форума по торгово–экономическим вопросам [6].

Следует подчеркнуть, что в период с 2000 по 2009 г. В Китае увеличился бюджет на фундаментальную науку и НИОКР (с 1,03% от ВВП в 2000 г. До 1,8% от ВВП в 2009 г.). В этот период также увеличилась численность специалистов занятых исследованиями и разработками (с 98,2 на 10 тысяч занятых в экономике до 465,2 в 2009 г.) [4].

Россия также приняла ряд важнейших документов, в том числе Концепция долгосрочного социально–экономического развития РФ на период до 2020 года и Послание Федеральному собранию российской Федерации (12 ноября 2009 г.) в которых выделено пять стратегических векторов развития: энергетика и новые виды топлива, ядерные, информационные и медицинские технологии, космические исследования.

Ориентирами инновационной политики Китая до 2020 года являются: усиление инновационной восприимчивости для увеличения использования возможностей науки и технологии, обеспечение осуществления фундаментальных исследований и разработок, продуцирование научных результатов мирового уровня [7–9]. Китай, реформируя свою экономику, отдает приоритет трем направлениям: создание свободных экономических зон, финансирование передовых отраслей и инвестирование инноваций. [10, 11].

К 2020 году минимальный уровень затрат на исследования и разработки в целом по экономике страны должен составить 2,5 % ВВП. Планируется также, что Китай войдет в пятерку стран лидеров по созданию научного знания, оформленного в виде патентов и статей [12].

В 2005 году Китай уже вошел в пятерку стран с высокой патентной активностью. Основными областями, где Китай внес вклад в копилку формализованных знаний стали такие области как: электрооборудование и энергетика (3%), телекоммуникации (4%), цифровые коммуникации (5,4%), медицинские технологии и оборудование (4,3%), биотехнологии (5,1%), фармацевтика (7,7%), химия исходного сырья (11,7%), металлургия (7,5%), экология и природоохрана (4,7%), пищевая химия (11,7%) и др.

Дополнительными целями Китая до 2020 г. являются: усиление инновационной восприимчивости с целью использования новых результатов в науке и технологиях для социально-экономического развития страны и обеспечения безопасности; обеспечение возможности проводить фундаментальные исследования и продуцировать научные результаты мирового уровня.

Не смотря на значительные затраты на НИОКР в современном Китае есть и проблемы, связанные с нехваткой кадров высшей квалификации. В этом отношении Китай уступает другим развитым странам. Так в 2005 году на 10 тыс. человек занятых в экономике КНР приходится лишь 10 ученых и инженеров. Тем не менее, Национальный центр развития науки и технологий Китая в 2005 году опубликовал прогноз, что к 2050 году Китай станет мировым лидером в сфере науки и технологий. Было сделано заключение, что принцип «рынок в обмен на технологии» практически исчерпан [3, 4, 13].

Для освоения высоких технологий Китаю требуются высококвалифицированные кадры в которых страна испытывает дефицит. Решить эту проблему планируется с помощью образовательных программ: «863», «искра», «Факел», «972» и др. [4]

Именно благодаря этим программам удалось создать с нуля более 60% новых технологий в таких отраслях как аэрокосмическая и электроэнергетическая. Параллельно с этими программами в Китае выдвинута программа «221», целью которой является создание в 100 университетах специализированных центров преподавания групп специальных дисциплин. Реализация программы позволит улучшить качество преподавания и повысит эффективность управления научными исследованиями. Кроме того, вокруг вузов создаются инновационные зоны – технопарки и бизнес инкубаторы. Размещение этих зон территориально совпадает с расположением специальных экономических зон. Результатом этого являются создаваемые возможности коммуникаций, научно-технического обмена и сотрудничества ученых с представителями зарубежного бизнеса. По некоторым оценкам до 17 тысяч предприятий в технопарках занимаются научно-исследовательской деятельностью, внедрением ее результатов.

Надо отметить, что направления исследований определяются на уровне государства и широко финансируются им: микроэлектроника, телекоммуникации, биотехнологии, геновая инженерия, новые материалы. Традиционные производства также модернизируются. Здесь акцент делается на их техническое перевооружение, автоматизацию.

На сегодняшний день в Китае уже разработаны долгосрочные программы развития. Ключевая их идея состоит в необходимости сочетания традиционных и новых технологий, импорте новой техники и создание собственного научного продукта в результате НИОКР, сочетании базовых отраслей с обрабатывающими, входением на мировые рынки и стимулирование внутреннего [5].

В КНР санкции и ограничения со стороны экспортного контроля США стали стимулом и катализатором развития собственного производства и создания импортозамещения в высокотехнологичных отраслях экономики. Этот опыт будет весьма полезен для изучения и использования в российской экономике [14].

Безусловно, что во взаимно сотрудничества российских и китайских университетов на первый план выйдет тематика так или иначе связанная с наукоемкими инновационными технологиями.

Очевидно, что интерес для совместного сотрудничества представляет инновационная сфера, которая, как известно, имеет важное значение для конкурентоспособности и роста экономики. Зачастую генератором инноваций являются университеты, в которых сосредоточен научно-инновационный потенциал.

Развитию отношений в научно-инновационной сфере способствует обмен студентами и их обучение в университетах обеих стран. Так, по данным Посольства РФ в КНР в январе 2009 года в китайских вузах обучалось 7261 студент, а в вузах России обучается около 20 тысяч студентов.

Китай видит перспективным развитие двусторонних отношений в в области технологий и оборудования для производства потребительских товаров, средств связи и коммуникации, продуктов сельскохозяйственного назначения, электронных приборов гражданского

назначения. При этом КНР небезосновательно считает, что в этих областях имеет свое преимущество как в технологии, так и в рыночной сфере [15].

В заключении сделаем следующие выводы:

1. Китай и Россия имеет исторические связи, которые укрепляются на протяжении последних десятилетий. Данная тенденция очевидно будет продолжена, однако приходится учитывать достаточно масштабные государственные интересы двух стран.

2. Перечни приоритетных технологий двух стран во многом схожи и могут быть основой для развития сотрудничества, но вместе с тем требуется находить более локальные точки соприкосновения интересов и переходить на формирование узкой специализации и детализировать содержание перспективных направлений совместных исследований.

3. Высокая потребность в инновациях предприятий Китая может открывать новые горизонты в их взаимодействии с отечественными университетами без посредников, например путем участия российских вузов в выставках, форумах и других коллективных мероприятиях организуемых как в Китае, так и в нашей стране.

4. Учитывая высокую патентную активность китайских ученых, поддерживаемую государством можно говорить о хороших перспективах получения совместных патентов международного уровня.

5. Необходим анализ уже установившихся связей отечественных и китайских университетов для оценки результатов совместной деятельности, передачи опыта и расширения сотрудничества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чжан, Х. Вузовская наука – инновационный потенциал модернизации китайской экономики / Х. Чжан // Сборник статей VIII Международной научно–практической конференции: «Инновационные процессы в управлении предприятиями и организациями». – Пенза. – 2009. – С. 71–72.
2. Каменская, Г.В. Становление нового миропорядка / Г.В. Каменская. – М.: Логос. – 2007. – С. 532.
3. Домнич, Е.Л. Оценка капитальных вложений в научно–технологическое развитие Китая в 1985–2005 гг.: автореферат дисс. ... канд. экономических наук: 08.00.14 / Домнич Егор Леонидович. – Хабаровск, 2011. – 25 с.
4. Развитие международного сотрудничества России и Китая на уровне национальных инновационных систем: автореферат дисс. ... канд. экономических наук: 08.00.14 / Гришина Ирина Андреевна. – Москва, 2011. – 21 с.
5. Гао, Ин Формирование научно–технического потенциала Китая / Ин Гао // Вестник РУДН, сер. «Экономика». – 2007. – № 3–4. – С. 66–80.
6. Гао, Ин Россия и Китай: опыт реформирования и перспективы развития экономики / Ин Гао // «Современная экономическая теория и реформирование экономики России». Материалы научно–практической конференции, посвященной памяти В.Ф. Станиса. – М.: Изд–во «Экономика». – 2006. – С. 538–544.
7. Полозюкова, О.Е. Особенности экономики Китая на современном этапе и перспективы ее развития: автореферат дисс. ... канд. экономических наук: 08.00.14 / Полозюкова Ольга Евгеньевна. – М., 2012. – 27 с.
8. Полозюкова, О.Е. торговое и инвестиционное сотрудничество между Россией и Китаем / О.Е. Полозюкова // Международный научно–практический журнал «международная экономика». – 2011. – Выпуск № 6. – С. 6–11.
9. Rongping, V. Technology Foresight towards 2020 in China: the Practice and its Impacts/ V. Rongping, R. Zhongbao // Technology Analysis and Strategic Management. – 2008. – Vol. 20. – issue 3. – pp. 287–307.
10. Шарко, С.В. Россия и Китай: возможности и развитие региональной интеграции: автореферат дисс. ... канд. политических наук: 23.00.02 / Шарко Сергей Владимирович. – М., 2010. – 27 с.
11. Шарко, С.В. Россия и Китай: возможности и развитие региональной интеграции / С.В. Шарко. – М.: «Ин–квадро», 2010. – 265 с.
12. Institutional landscape of Social sciences and Humanities (SSH) in China // INTAS, 2007. – 12 p.
13. Rongping, M. Technology Foresight towards 2020 in China: the Practice and its Impacts / M. Rongping, R. Zhongbao // Technology Analysis & Strategic Management. – 2008. – Vol. 20. – issue 3. – pp. 287–307.
14. Степанова, Е.Ю. Экспортные ограничения США и ЕС как стимул к развитию наукоемких и высокотехнологичных секторов экономики / Е.Ю. Степанова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. – № 3. – С. 96–103.
15. Чжан, Юнган Стратегии групп интересов в политическом процессе Китая / Юнган Чжан // Гуманитарная версия Вестника ЛЭТИ. – 2007. – № 1. – С. 25–32.

Галиновский Андрей Леонидович
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
д.т.н., д.п.н., профессор кафедры «Технологии ракетно–космического машиностроения»
Тел. +79161580064
E–mail: galcomputer@mail.ru

Абашин Михаил Иванович
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
К.т.н., доцент кафедры «Технологии ракетно–космического машиностроения»
Тел. +79167524269
E–mail: abashin@bmstu.ru

Винокурова Евгения Вячеславовна
МГТУ им. Н.Э. Баумана
НМЦ «Инженерное образование»
Тел.: +74992636212
E–mail: mgtu@rambler.ru

Тимофеев Виктор Борисович
МГТУ им. Н.Э. Баумана
НМЦ «Инженерное образование»
Тел.: +71965280592
E–mail: timofeev@bmstu.ru

ANALYSIS OF RUSSIA AND CHINA EDUCATIONAL INSTITUTIONS PRIORITY DIRECTIONS OF COOPERATION IN THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL SPHERE BASED ON THE MACROECONOMIC FACTORS

This article considers the investigation of mutually beneficial research areas and topics, which can improve cooperation efficiency for engineering universities in Russia and China. Analysis is performed based on the identified development priorities of the Chinese economy. Historical aspects of cooperation between the two countries in the scientific and technical cooperation are also taken into account. Assesses their prospects for the near future. It is concluded that training exchange students promotes the relations development in the sphere of science and innovation for both countries. To illustrate this, some statistics of economic and scientific-technical sphere are presented.

Keywords: China, Russia, international cooperation, priorities, interaction, engineering universities.

BIBLIOGRAPHY

1. Chzhan, K.H. Vuzovskaya nauka – innovatsionnyy potentsial modernizatsii kitayskoy ekonomiki / Kh. Chzhan // Sbornik statey VIII Mezhdunarodnoy nauchno–prakticheskoy konferentsii: «Innovatsionnyye protsessy v upravlenii predpriyatiyami i organizatsiyami». – Penza. – 2009. – S. 71–72.
2. Kamenskaya, G.V. Stanovleniye novogo miroporiyadka / G.V. Kamenskaya. – M.: Logos. – 2007. – S. 532.
3. Domnich, Ye.L. Otsenka kapital'nykh vlozheniy v nauchno–tehnologicheskoye razvitiye Kitaya v 1985–2005 gg.: avtoreferat diss... kand. ekonomicheskikh nauk: 08.00.14 / Domnich Yegor Leonidovich. – Khabarovsk, 2011. – 25 s.
4. Razvitiye mezhdunarodnogo sotrudnichestva Rossii i Kitaya na urovne natsional'nykh innovatsionnykh sistem : avtoreferat diss... kand. ekonomicheskikh nauk: 08.00.14/ Grishina Irina Andreyevna. – Moskva, 2011. – 21 s.
5. Gao, In Formirovaniye nauchno–tehnicheskogo potentsiala Kitaya / In Gao // Vestnik RUDN, ser. «Ekonomika». – 2007. – № 3–4. – S. 66–80.
6. Gao, In Rossiya i Kitay: opyt reformirovaniya i perspektivy razvitiya ekonomiki / In Gao // «Sovremennaya ekonomicheskaya teoriya i reformirovaniye ekonomiki Rossii». Materialy nauchno–prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati V.F. Stanisa. – M.: Izd-vo «Ekonomika». – 2006. – S. 538–544.
7. Polozyukova, O.Ye. Osobennosti ekonomiki Kitaya na sovremennom etape i perspektivy yeye razvitiya: avtoreferat diss... kand. ekonomicheskikh nauk: 08.00.14 / Polozyukova Ol'ga Yevgen'yevna. – M., 2012. – 27 s.
8. Polozyukova, O.Ye. torgovoye i investitsionnoye sotrudnichestvo mezhdru Rossiyey i Kitayem / O.Ye. Polozyukova // Mezhdunarodnyy nauchno–prakticheskyy zhurnal «mezhdunarodnaya ekonomika». – 2011. – Vypusk № 6. – S. 6–11.
9. Rongping, V. Technology Foresign towards 2020 in China: the Practice and its Impacts/ V. Rongping, R. Zhongbao // Technology Analysis and Strategic Management. – 2008. – Vol. 20. – issue 3. – pp. 287–307.
10. Sharko, S.V. Rossiya i Kitay: vozmozhnosti i razvitiye regional'noy integratsii: avtoreferat diss... kand. politicheskikh nauk: 23.00.02 / Sharko Sergey Vladimirovich. – M., 2010. – 27 s.
11. Sharko, S.V. Rossiya i Kitay: vozmozhnosti i razvitiye regional'noy integratsii / S.V. Sharko. – M.: «Inkvadro», 2010. – 265 s.
12. Institutional landscape of Social sciences and Humanities (SSH) in China // INTAS, 2007. – 12 p.
13. Rongping, M. Technology Foresight towards 2020 in China: the Practice and its Impacts / M. Rongping, R. Zhongbao // Technology Analysis&Strategic Management. – 2008. – Vol. 20. – issue 3. – pp. 287–307.
14. Stepanova, Ye.Yu. Eksportnyye ogranicheniya SSHA i YES kak stimul k razvitiyu naukoemkikh i vysoko–tehnologichnykh sektorov ekonomiki / Ye.Yu. Stepanova // Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2014. – № 3. – S. 96–103.
15. Chzhan, Yungan Strategii grupp interesov v politicheskom protsesse Kitaya / Yungan Chzhan // Gumani-tarnaya versiya Vestnika LETI. – 2007. – № 1. – S. 25–32.

**Galinovsky Andrey
Leonidovich**

Moscow State Technical University named after N.E Bauman, D.Sc., Ph.D., professor of "Rocket and Space Technology of mechanical engineering"
105005, Moscow, 2nd Bauman, 5
Phone. +7(916)1580064
E-mail: galcomputer@mail.ru

**Mikhail Ivanovich
Abashin**

Moscow State Technical University named after N.E Bauman, Ph.D., associate professor of the Department "Technology of Rocket and Space Engineering"
105005, Moscow, 2nd Bauman, 5
Phone. +7(916)752–42–69
E-mail: abashin@bmstu.ru

**Evgeniya Vyacheslavovna
Vinokurova**

Moscow State Technical University named after N.E Bauman, SMC HMIQ "Engineering education"
Тел.: +74992636212
E-mail: mgtu@rambler.ru

**Viktor Borisovich
Timofeev**

Moscow State Technical University named after N.E Bauman, SMC HMIQ "Engineering education"
Тел.: +71965280592
E-mail:timofeev@bmstu.ru

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.3.084.2; 621.3.082.1

Р.Р. АБДРАХИМОВ, С.Б. САПОЖНИКОВ, А.А. ДЬЯКОНОВ

ВЛИЯНИЕ ЧАСТИЦ УГЛЕРОДА НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕНСОРОВ НА ОСНОВЕ УНТ И ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ

В работе разработан и опробован процесс изготовления сенсоров на основе эпоксидной смолы, углеродных нанотрубок (УНТ) типа «Таунит–МД» и технического углерода в небольшой массовой доле до 6% (значительно меньше перколяционного порога). Проведены испытания при действии деформации и получены зависимости сопротивления датчиков от наполнения техническим углеродом. Также определены коэффициенты тензочувствительности сенсоров в виде нити при действии деформации.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, электрическое сопротивление, эпоксидная смола, сенсор, деформация.

Существующие тензодатчики зачастую требуют использование дополнительных устройств усиливающих сигнал, из-за недостатка чувствительности, что усложняет использование датчика, и ограничивает минимальные габаритные размеры.

Использование углеродных нанотрубок (УНТ) в качестве токопроводящих элементов в полимерном композите позволит изготавливать датчики в широком диапазоне габаритных размеров (от нескольких микрон до нескольких сантиметров), высокой чувствительностью, а также возможностью использовать один тип сенсора для измерения температуры, давления и деформаций без применения дополнительных устройств. В настоящее время разработано несколько типов сенсоров на основе УНТ [1,2], разработаны сенсоры давления и деформации типа «искусственная кожа» на основе гибких пленок из углеродных нанотрубок [3].

Ранее были рассмотрены проблемы диспергирования УНТ в вязкой среде [4], изготовлены и испытаны датчики на основе углеродных нанотрубок и эпоксидной смолы при действии температуры и давления [5]. В данной работе будет рассмотрено влияние небольшого массового содержания технического углерода (2, 4 и 6%, что значительно ниже перколяционного порога [6]) на свойства датчиков такого типа, для возможного уменьшения концентрации УНТ и улучшения чувствительности. Технический углерод был выбран для исследования, как материал легкодоступный и в настоящее время широко используемый в качестве наполнителя для увеличения проводимости полимерных материалов [7].

В данной работе был использован материал ТАУНИТ–МД, который представляет собой нитевидные образования поликристаллического графита в виде сыпучего порошка из агломератов черного цвета. Агломераты микрометрических размеров имеют структуру спутанных пучков многостенных трубок [8]. Параметры материала, предоставленные производителем, перечислены в таблице 1.

Таблица 1 – Общая характеристика УНМ «Таунит–МД» по данным [8]

Параметры	"Таунит–МД"
Наружный диаметр, нм	8–15
Внутренний диаметр, нм	4–8
Длина, мкм	2 и более
Общий объем примесей, % (после очистки)	до 5(до 1)
Насыпная плотность, г/см ³	0,03–0,05
Удельная геометрическая поверхность, м ² /г	300–320 и более
Термостабильность, °С	до 600

Для изготовления датчиков была использована капроновая нить (50 текс), которую покрывали заранее подготовленной суспензией (способ подготовки описан в статье [4]), состоящей из эпоксидной смолы, УНТ массовой долей 1%, 2% и 3%, и технического углерода массовой долей 2%, 4% и 6%. Для качественной пропитки и ориентирования нанотрубок нить многократно протягивалась между двух плоскостей (рисунок 1).

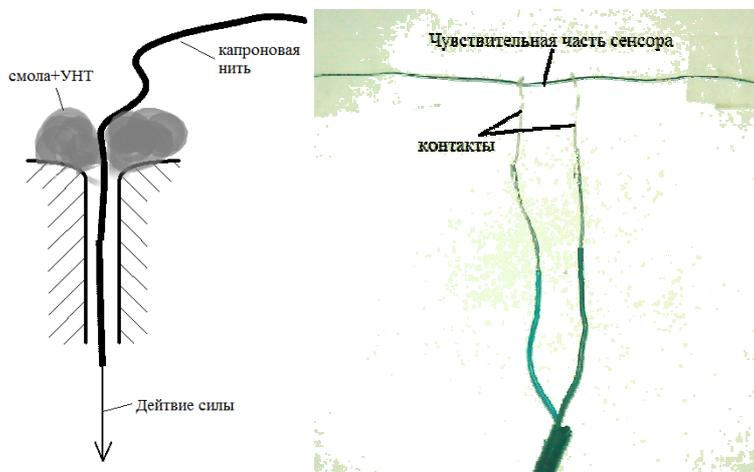


Рисунок 1 – Схема изготовления образцов и датчик для испытания

Испытания при действии деформации были проведены на машине Instron 5942. [9]

Измерения электрических свойств проводили на базе 10 мм. Образец зажимали в захваты и нагружали усилием до 5N, так как при большей нагрузке в образце возникали трещины, уменьшающие проводимость датчика.

Измерение сопротивления проведено с помощью прибора LCR-78101G компании GwInstek, при постоянном токе и напряжении 2В.

Результаты измерений для 3% УНТ представлены на рисунке 2 и таблице 2, для 1% и 2% полученные зависимости аналогичны.

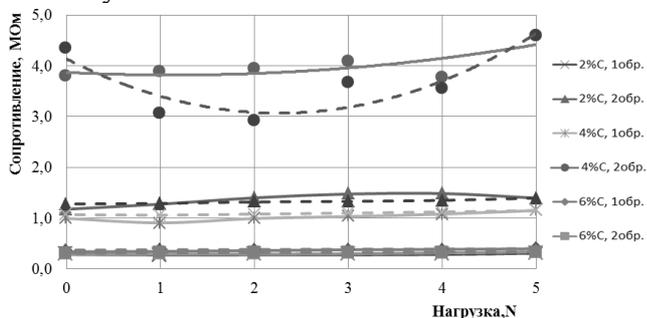


Рисунок 2 – Сопротивление образцов с содержанием УНТ 3% (сплошной линией указана нагрузка, разгрузка – штриховой)

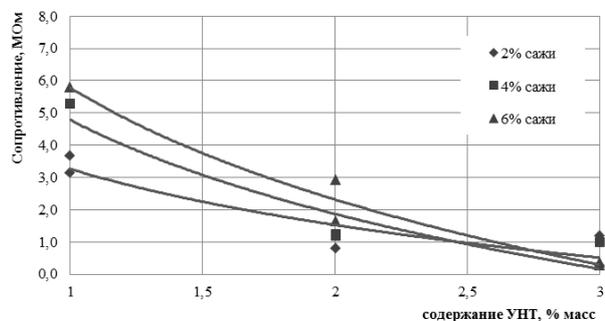


Рисунок 3 – Зависимость сопротивления датчиков от массового содержания токопроводящих наполнителей

Таблица 2 – Значения удельного сопротивления сенсоров.

Удельное сопротивление, Ом·м						
Содержание УНТ, % масс	1%		2%		3%	
	1 обр.	2 обр.	1 обр.	2 обр.	1 обр.	2 обр.
2%	4,44	5,20	1,16	36,6	0,41	1,67
4%	7,48	21,9	1,66	1,76	1,41	5,40
6%	–	8,24	4,17	2,31	0,48	0,40

У большинства образцов наблюдается близкое к линейному изменение сопротивления при нагрузке и разгрузке. Но у некоторых образцов эта зависимость носит ярко выраженный нелинейный характер вследствие возникших дефектов при изготовлении. Также при нагруз-

ке 3N в образцах 1% УНТ, 2% С (2 обр.) и 2% УНТ, 2%С (1 обр.) возникла трещина, увеличившая сопротивление датчика.

На рисунке 3 представлены зависимости сопротивления датчиков от массового содержания УНТ 1, 2, 3% при содержании сажи 2, 4, 6%.

Как видно из представленных графиков при наполнении образцов техническим углеродом проводимость датчиков ухудшается. Это может быть вызвано тем, что частицы углерода в небольшом количестве препятствуют возникновению туннельного эффекта между УНТ.

Значения коэффициентов тензочувствительности для сенсоров представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Значения коэффициентов тензочувствительности.

Коэффициенты тензочувствительности						
Содержание УНТ, % масс	1%		2%		3%	
	1 обр.	2 обр.	1 обр.	2 обр.	1 обр.	2 обр.
2%	26,1	52,0	1,71	–	0,31	4,21
4%	–	0,68	1,23	0,84	5,80	4,34
6%	–	–	1,83	1,10	3,32	1,66

Как видно из представленной таблицы наибольшей тензочувствительностью обладают датчики с меньшим содержанием УНТ, но при этом они являются нестабильными, так как содержание УНТ находится на грани перколяционного порога. Содержание технического углерода при этом не оказывает явного влияния на коэффициент тензочувствительности.

В ходе работы был разработан и опробован процесс изготовления сенсоров в виде нити, на основе эпоксидной смолы и углеродных нанотрубок. Полученные зависимости сопротивления датчиков от наполнения углеродом показали, что проводимость сенсоров уменьшается при увеличении концентрации токопроводящих частиц и явного влияния на тензочувствительность не наблюдается.

В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что сенсоры на основе УНТ обладают высокой чувствительностью к изменению давления, температуры и деформаций, что делает их весьма перспективным материалом для применения во многих областях. Также на проводимость сенсора оказывает влияние влажность окружающей среды, от которой следует защитить сенсор, для более точных показаний.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ МК–873.2014.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Investigation on Sensitivity of a Polymer Carbon Nanotube Composite Strain Sensor/ N. Hu, Y. Karube, M. Arai, T. Watanabe, C. Yan, Y. Li, Y. Liu, H. Fukunaga // Carbon. – 2010. – № 48. – pp. 680–687.
2. Li, C. Sensors and Actuators Based on Carbon Nanotubes and Their Composites: a Review/ C. Li, E.T. Thostenson, T.–W. Chou// Composites Science and Technology. – 2008. – № 68. – pp. 1227–1249.
3. Skin-like Pressure and Strain Sensors Based on Transparent Elastic Films of Carbon Nanotubes/ J. Darren, M. Vosgueritchian, B. Tee, S. Hellstrom, J. Lee, C. Fox, Z. Ba// Nature Nanotechnology. – 2011. – № 6. – pp. 788–792.
4. Абдрахимов, Р.Р. Исследование реологии суспензий для эффективного диспергирования многостенных углеродных нанотрубок в эпоксидной смоле / Р.Р. Абдрахимов, С.Б. Сапожников, В.В. Сеницин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2012. – № 34. – С. 68–75.
5. Абдрахимов, Р.Р. Сенсоры давления и температуры на основе суспензии эпоксидной смолы и углеродных нанотрубок / Р.Р. Абдрахимов, С.Б. Сапожников, В.В. Сеницин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. – № 4. – С. 16–23.
6. Москалюк, О.А. Электропроводность полипропиленовых волокон с дисперсными углеродными наполнителями / О.А. Москалюк, А.Н. Алешин, Е.С. Цобкалло, А.В. Крестинин, В.Е. Юдин // Физика твердого тела. – 2012. – Т. 54. – вып. 10. – С. 1993–1998.
7. Гуль, В.Е. Электропроводящие полимерные композиции / В.Е. Гуль, Л.З. Шенфиль. – М.: Химия, 1984. – 240 с.
8. Углеродный наноматериал «Таунит МД» [Электронный ресурс] Режим доступа: http://nanotc.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=8&Itemid=34.
9. Сапожников, С.Б. Использование композитных материалов на основе поликарбоната в защитных структурах / С.Б. Сапожников, А.А. Левинский // Вестник Южно- Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2012. – № 12(271). – С. 187–193.

Абдрахимов Руслан Рамильевич

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск
Аспирант, кафедра прикладной механики, динамики и прочности машин
454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, 76
Тел.: +7-951-781-99-77
E-mail: Ryslan90@gmail.com

Сапожников Сергей Борисович

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск
Доктор технических наук, профессор, кафедра прикладной механики, динамики и прочности машин
454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, 76
Тел.: +7(351) 267-91-19
E-mail: ssb@susu.ac.ru

Дьяконов Александр Анатольевич

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск
Доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения
454080, г. Челябинск, пр-т Ленина 76
Тел. раб.: +7(351) 248-34-14
E-mail: sigma-80@mail.ru

R.R. ABDRAHIMOV, S.B. SAPOZHNIKOV, A.A. DYAKONOV

EFFECT CARBON PARTICLES ON THE ELECTRICAL PROPERTIES OF SENSORS BASED ON CNTS AND EPOXY RESIN

This paper has been developed and tested process of manufacturing sensors, based on of epoxy resin, carbon nanotubes (CNT) type "Town MD" and carbon black in a small proportion of up to 6 mass% (significantly lower percolation threshold). Tested the action of deformation and obtained resistance sensors depending on the content of carbon black. Are also defined coefficients tensosensitivity sensors in a filament under the action of deformation.

Keywords: carbon nanotubes, electrical resistance, epoxy resin, sensor, deformation.

BIBLIOGRAPHY

1. Investigation on Sensitivity of a Polymer Carbon Nanotube Composite Strain Sensor/ N. Hu, Y. Karube, M. Arai, T. Watanabe, C. Yan, Y. Li, Y. Liu, H. Fukunaga // Carbon. – 2010. – № 48. – pp. 680–687.
2. Li. S. Sensors and Actuators Based on Carbon Nanotubes and Their Composites: a Review/ C. Li, E. T. Thostenson, T.–W. Chou// Composites Science and Technology. – 2008. – № 68. – pp. 1227–1249.
3. Skin-like Pressure and Strain Sensors Based on Transparent Elastic Films of Carbon Nanotubes/ J. Darren, M. Vosgueritchian, B. Tee, S. Hellstrom, J. Lee, C. Fox, Z. Ba// Nature Nanotechnology. – 2011. – № 6. – pp. 788–792.
4. Abdrakhimov. R.R. Issledovanie reologii suspenziv dlva effektivnogo dispergirovaniya mnogosten–nykh uglerodnykh nanotrubok v epoksidny smole / R.R. Abdrakhimov, S.B. Sapozhnikov, V.V. Sinitsin // Vestnik YUUrGU. Seriya «Matematika. Mekhanika. Fizika». – 2012. – № 34. – S. 68–75.
5. Abdrakhimov, R.R. Sensory davleniya i temperatury na osnove suspenzii epoksidny smoly i ugle–rodnykh nanotrubok / R.R. Abdrakhimov, S.B. Sapozhnikov, V.V. Sinitsin // Vestnik YUUrGU. Seriya «Komp'yu–ternyye tekhnologii, upravleniye, radioelektronika». – 2013. – № 4. – S. 16–23.
6. Moskaljuk, O.A. Elektroprovodnost' polipropilenovykh volokov s dispersnyimi uglerodnymi napolnitelyami / O.A. Moskaljuk, A.N. Aleshin, Ye.S. Tsobkallo, A.V. Krestinin, V.Ye. Yudin // Fizika tverdogo tela. – 2012. – T. 54. – vyp. 10. – S. 1993–1998.
7. Gul', V.Ye. Elektroprovodnyye polimernyye kompozitsii / V.Ye. Gul', L.Z. Shenfil'. – M.: Khimiya. 1984. – 240 s.
8. Uglerodnyy nanomaterial «Taunit MD» [Elektronnyy resurs] Rezhim dostupa: http://nanotc.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=8&Itemid=34.
9. Sapozhnikov, S.B. Ispol'zovaniye kompozitnykh materialov na osnove polikarbonata v zashchitnykh strukturakh / S.B. Sapozhnikov, A.A. Levinskiy // Vestnik Yuzhno–Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroyeniye. – 2012. – № 12(271). – S. 187–193.

Abdrakhimov Ruslan Ramilievich

South Ural State University, Chelyabinsk
Graduate student, Department of Applied Mechanics,
Dynamics and strength of machines, Faculty of Physics
454080, Chelyabinsk, Lenin Prospect, 76
Tel. mob.: +7-951-781-99-77
E-mail: Ryslan90@gmail.com

Sapozhnikov Sergei Borisovich

South Ural State University, Chelyabinsk
Dr. Tech. Sc., Professor of Applied Mechanics,
Dynamics and Strength of Machines department, Faculty of Physic
454080, Chelyabinsk, Lenin Prospect 76
Tel. slave.: +7 (351) 267-91-19
E-mail: ssb@susu.ac.ru

Dyakonov Aleksandr Anatolyevich

South Ural State University, Chelyabinsk
Dr. Tech. Sc., Professor of Mechanical Engineering department, Faculty Mechanical Engineering
454080, Chelyabinsk, Lenin prospect, 76
Phone: (351) 248-34-14
E-mail: sigma-80@mail.ru

А.И. ЯКУШЕВА, А.В. ДУНАЕВ, К.В. ПОДМАСТЕРЬЕВ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ МЕЛАНИНА
В ОПТИЧЕСКОЙ ТКАНЕВОЙ ОКСИМЕТРИИ**

Данная работа посвящена анализу влияния меланина в коже на регистрируемые сигналы в оптической тканевой оксиметрии (ОТО). В статье приведена методика эксперимента, а также представлены результаты проведенных исследований. Полученные результаты статистической обработки зарегистрированных сигналов и расчетных медико-биологических параметров в ОТО позволили сделать вывод о необходимости учёта содержания меланина при диагностическом исследовании пациентов с различным уровнем содержания меланина в коже.

Ключевые слова: оптическая тканевая оксиметрия, тканевая сатурация, объемное кровенаполнение, меланин, калибровка.

Преимущество метода оптической тканевой оксиметрии (ОТО), основанного на абсорбционной спектрофотометрии, заключается в возможности *in vivo* оценивать динамику транспорта и потребления кислорода в системе микроциркуляции крови [1]. В настоящее время всё большее применение находит данная технология в функциональной диагностике микроциркуляторно-тканевых систем (МТС) организма человека, а также для оценки эффективности лечения различных заболеваний, связанных с нарушением МТС (синдром Рейно, сахарный диабет, онкология и др.). Существует ряд конструктивных и методологических преимуществ для использования метода ОТО, таких как достаточный диагностический объём биоткани, возможность расположения компактной оптической головки с излучателями и фотоприёмником на теле пациента в лёгком контакте с исследуемой биотканью, а также высокая чувствительность метода ОТО, что объективно показывают различные функциональные (нагрузочные) тесты и пробы (дыхательная, тепловая, холодовая, окклюзионная и др.) [2]. Однако, для корректного построения математических моделей ОТО, адекватно описывающих процессы оксигенации ткани, необходимо определять и оценивать влияние наибольшего количества оптико-физических параметров биологических тканей и ее компонентов на результат диагностики.

В ходе исследований методом ОТО оценивается доставка и потребление кислорода в микроциркуляторном русле [3]. В основе метода ОТО лежит различное поглощение света разными фракциями гемоглобина в видимом и ИК-диапазоне. Оптические свойства практически всех форм гемоглобина в той или иной степени различны. Спектры поглощения оксигемоглобина (HbO_2) и дезоксигемоглобина (Hb) для крови в видимом и ближнем ИК-диапазоне спектра достаточно изучены. Спектры поглощения данных фракций гемоглобина, воды и меланина представлены на рисунке 1 [4]. Как видно из рисунка 1, на длине волны около 530 нм при зондировании биоткани поглощение света этими формами гемоглобина практически одинаково, т. е. образуется так называемая изобестическая точка, которую выгодно использовать в качестве опорной при исследовании, когда возникает необходимость исключить разницу в измерениях, связанных с неодинаковым пропусканием света венозной и артериальной кровью. Также удобно использовать и те точки, где поглощение максимально различно, например, при зондировании биоткани красным светом с длиной волны около 630 нм или инфракрасным с 780 нм [5]. Однако существует хромофор, который носит индивидуальный характер поглощения, так как его концентрация может сильно отличаться для разных людей и в зависимости от места измерения, что может приводить к некорректным результатам диагностики. Им является один из сильно поглощающих пигментов кожи – меланин.

В общем виде модель, описывающая процессы в ОТО, представляет собой систему, состоящую из двух линейных алгебраических уравнений, которая при экспериментально измеренных коэффициентах поглощения и известных из литературы коэффициентах экстинкции решается относительно двух неизвестных концентраций SNb и $SNbO_2$, что позволяет определить основные медико-биологические параметры (МБП) в ОТО, к которым относят, главным образом, тканевую сатурацию оксигемоглобина в смешанной крови микроциркуляторного русла (тканевая сатурация – S_tO_2) и относительный объём всех фракций гемоглобина (объём крови) в тестируемом объёме биоткани (объёмное кровенаполнение – V_b) как функции времени [6].

Тканевая сатурация (S_tO_2) определяется, как процентное содержание оксигемоглобина на фоне суммы всех форм гемоглобина по формуле (1), а объёмное кровенаполнение определяет в процентах долю фракции крови в диагностическом объёме биоткани и рассчитывается по формуле (2):

$$S_t O_2 = \frac{C_{HbO_2}}{C_{HbO_2} + C_{Hb}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $S_t O_2$ – тканевая сатурация;

C_{HbO_2} – молярная концентрация оксигемоглобина;

C_{Hb} – молярная концентрация дезоксигемоглобина.

$$V_b = \frac{C_{HbO_2} + C_{Hb}}{C_{HbO_2} + C_{Hb} + C_{other}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где V_b – объемное кровенаполнение;

C_{other} – молярная концентрация всех остальных (других, то есть сторонних) оптических поглотителей в ткани.

Считается, что кожа состоит из эпидермиса и дермы. Падающее излучение сначала проходит через эпидермис, где наибольший коэффициент поглощения имеет меланин, поэтому оптические свойства эпидермиса считаются равными свойствам меланина. Пройдя часть, попадает в дерму, где поглощается преимущественно гемоглобином, присутствующим в поверхностном слое дермы [7]. Таким образом, на расчет МБП в ОТО оказывает существенное влияние меланин кожи, так как в диапазоне длин волн зондирующего излучения меланин является одним из сильно поглощающих пигментов кожи.

Содержание меланина у людей, принадлежащих к разным этническим группам, значительно отличается. Так, например, у европейского (белого) типа кожи содержание меланина находится в диапазоне от 1,5 до 5 %, а у африканского типа кожи концентрация может достигать до 43 % [7], что в конечном счете может приводить к недостоверным результатам. Таким образом, возникает проблема корректного определения концентрации оксигемоглобина в методе ОТО у людей, принадлежащих к разным этническим группам, так как не учитываются различия оптических свойств кожи этих людей. Целью данной работы явился анализ влияния меланина кожи на регистрируемые сигналы и расчетные МБП в методе ОТО при зондировании излучением зеленого и красного лазеров.

Экспериментальные исследования осуществлялись на многофункциональном лазерном неинвазивном диагностическом комплексе (МЛНДК) «ЛАКК-М» (ООО НПП «ЛАЗ-МА», г. Москва), внешний вид которого представлен на рисунке 2 [8].

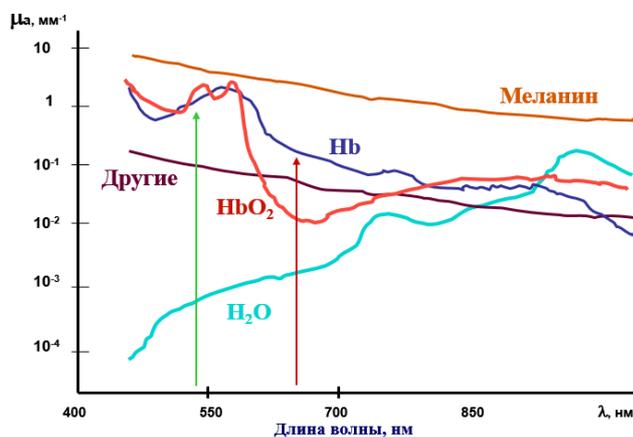


Рисунок 1 – Спектры поглощения оксигемоглобина (HbO_2), дезоксигемоглобина (Hb), воды (H_2O) и меланина

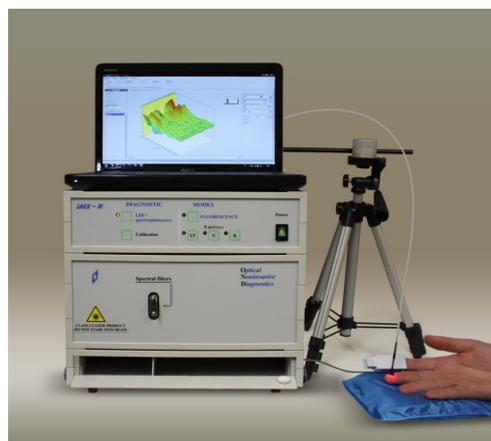


Рисунок 2 – МЛНДК «ЛАКК-М»

Комплекс предназначен для исследования состояния биологической ткани путем одновременного использования методов пульсоксиметрии, лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ), ОТО и флуоресцентной спектроскопии [9]. Однако, данная модификация МЛНДК не предназначена для контроля уровня меланина в тканях пациента и калибрована для кожи среднего европейца с его минимальным содержанием (без загара). Поэтому, при практическом проведении диагностических обследований данное ограничение необходимо учитывать [10].

Экспериментальные исследования производились с использованием только канала ОТО, реализованного на двух длинах волн зондирования биоткани – 530 и 630 нм соответственно.

В ходе выполнения работы произведены серии тестовых экспериментов, в которых приняли участие 4 группы условно здоровых добровольцев, отличающихся по этническому типу кожи: белые европейцы (7 человек), арабы (1 человек), индийцы (1 человек) и африкан-

цы (3 человека). Исследования проводились днем, примерно в одно и тоже время, в условиях психического и физического покоя. Базовые тесты ОТО–грамм (длительностью 3 мин) проводились последовательно на двух различных участках – на коже подушечки (волярная поверхность) среднего пальца, которая богата вегетативными и сенсорными нервными волокнами, артериоло–венулярными анастомозами (АВА) и часто используется для оценки нейрососудистой функции, а также в так называемой зоне Захарьина – Геда («точке сердца») на предплечье, расположенной по срединной линии на 4 см выше шиловидных отростков локтевой и лучевой костей. Данная область бедна АВА (кожа без АВА) и характеризует в большей степени нутритивный кровоток [9]. Выбор данных участков исследований связан также с существенной разницей в уровне меланина в этих зонах, что наглядно демонстрирует различие цвета кожи. Кроме того, производилось измерение напряжений с двух фотодиодов, регистрирующих вторичные излучения из биоткани при зондировании красным и зеленым лазерным излучением.

Примеры типовых записей S_tO_2 и V_b –грамм для европейского и африканского типов кожи (область на предплечье) представлены на рисунке 3,а и 3,б соответственно. Параметр тканевой сатурации для европейского типа кожи в данной области исследований равен среднестатистическому, так как в норме данный параметр примерно находится в диапазоне 60–80%. Однако на представленной ОТО–грамме для африканского типа кожи тканевая сатурация равна 39%, что наглядно демонстрирует некорректность проведения исследований на людях с повышенным содержанием меланина кожи.

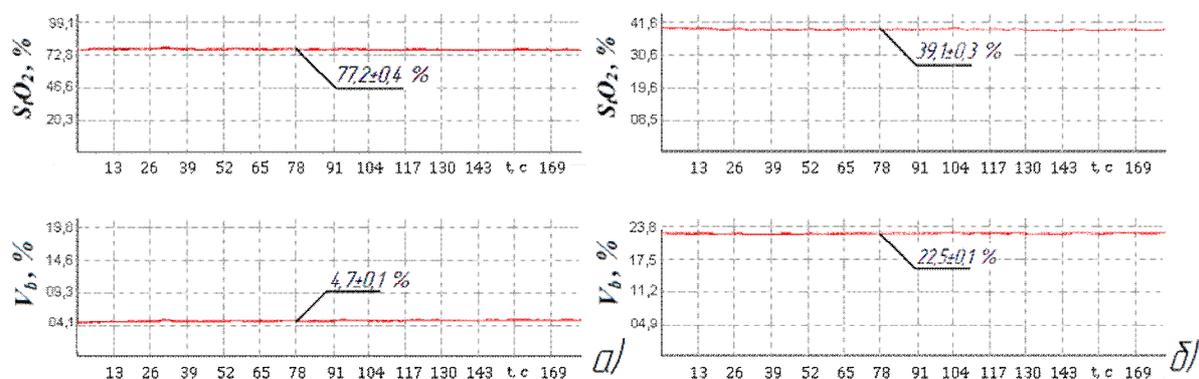


Рисунок 3 – Типовые S_tO_2 и V_b –граммы, зарегистрированные на предплечье для европейского (а) и африканского (б) типов кожи

Полученные значения зарегистрированных в ОТО сигналов (напряжений и расчётных МБП) в ходе проведения исследований были статистически обработаны по критерию Манна–Уитни. Выбор данного критерия связан с тем, что он является непараметрическим и, как следствие, может использоваться для сравнения двух независимых (несвязанных) групп, вид распределения которых не анализировался [11]. В результате анализа обнаружено статистическое различие значений напряжений, зарегистрированных при измерениях на коже в области с АВА (на мякисе пальца), у этнических групп с повышенным содержанием меланина по отношению к белому европейскому типу кожи ($p < 0,05$). Результаты измерений напряжений и значения МБП (S_tO_2 , V_b) в области с АВА представлены в таблице 1, где n – количество измерений в группах условно здоровых добровольцев, отличающихся по этническому типу кожи.

Таблица 1 – Результаты измерений напряжений и значения МБП (S_tO_2 , V_b) в области с АВА

Параметры	Этнический тип кожи			
	Европейцы ($n=82$)	Индийцы ($n=16$)	Арабы ($n=8$)	Африканцы ($n=3$)
Напряжение, В ($\lambda=530$ нм)	1,8±0,2	1,3±0,1*	1,3±0,1*	1,4±0,3**
Напряжение, В ($\lambda=630$ нм)	1,2±0,2	0,8±0,1*	0,9±0,1*	0,7±0,3*
S_tO_2 , %	81,2±8,5	73,8±3,4*	68,1±4,7*	68,9±7,8*
V_b , %	8,6±2,0	12,2±1,8*	11,5±1,2*	14,3±2,2*

* различия значений параметров по отношению к европейскому типу кожи значимы при доверительной вероятности 95 % ($p < 0,05$) по критерию Манна–Уитни.

** различия значения параметра по отношению к европейскому типу кожи значимо при доверительной вероятности 94,2 % ($p < 0,058$) по критерию Манна–Уитни.

В то же время полученные данные в области без АВА (на предплечье) показывают ещё большее статистически значимое различие этнических типов кожи с повышенным содержанием меланина по отношению к коже белых европейцев ($p < 0,05$). Результаты измерений напряжений и значения расчётных МБП (S_tO_2 , V_b) в области без АВА представлены в таблице 2.

Так, например, значение напряжения при зондировании зеленым лазером европейского типа кожи составило $1,8 \pm 0,2$ В, в то время как для африканского – всего $0,3 \pm 0,1$ В. Значительное отличие наблюдается и при зондировании красным лазером, т.е. если для европейского типа кожи уровень напряжения составил $1,7 \pm 0,3$ В, то для африканского – всего лишь около $0,1 \pm 0,1$ В. В результате и расчётные МБП являются различными и могут достигать разницы в два раза.

Таблица 2 – Результаты измерений напряжений и значения МБП (S_tO_2 , V_b) в области без АВА

Параметры	Этнический тип кожи			
	Европейцы ($n=82$)	Индийцы ($n=16$)	Арабы ($n=8$)	Африканцы ($n=3$)
Напряжение, В ($\lambda=530$ нм)	$1,8 \pm 0,2$	$1,2 \pm 0,1^*$	$0,9 \pm 0,1^*$	$0,3 \pm 0,1^*$
Напряжение, В ($\lambda=630$ нм)	$1,7 \pm 0,3$	$0,9 \pm 0,2^*$	$0,6 \pm 0,1^*$	$0,1 \pm 0,1^*$
S_tO_2 , %	$69,1 \pm 8,5$	$63,0 \pm 4,9^*$	$55,9 \pm 3,5^*$	$36,0 \pm 2,2^*$
V_b , %	$5,9 \pm 1,4$	$10,8 \pm 1,8^*$	$15,4 \pm 1,3^*$	$28,3 \pm 4,3^*$

* различия значений анализируемых параметров по отношению к европейскому типу кожи значимы при доверительной вероятности 95 % ($p < 0,05$) по критерию Манна–Уитни.

Таким образом, полученные экспериментальные данные являются яркой иллюстрацией того, что уровень регистрируемых в ОТО сигналов при зондировании кожи излучением зеленого и красного лазеров для групп людей с различными этническими типами кожи существенно различен. И, как следствие, расчётные значения МБП (S_tO_2 , V_b) являются некорректными для этнических типов кожи, имеющих повышенный уровень содержания меланина в отличие от европейского типа, под который и осуществляется калибровка текущей приборной реализации канала ОТО. Следовательно, можно сделать вывод о необходимости индивидуального учета оптических параметров кожи человека, а именно вклада в общее поглощение меланина в коже, как при создании математических моделей для данной диагностической технологии, так и для ее приборной реализации за счёт создания калибровочного фантома, учитывающего различную концентрацию меланина в коже.

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК» (№ 310) и внутривузовского гранта Государственного университета – УНПК (ВК–3–2013) с использованием оборудования регионального центра коллективного пользования контрольно-измерительным оборудованием ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров, Д.С. Физиологический разброс индивидуальных параметров микроциркуляции крови как источник ошибок в неинвазивной медицинской спектрофотометрии / Д.С. Макаров, Д.А. Рогаткин // Труды IX Международной конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии». – 2010. – С. 78–82.
2. Дунаев, А.В. К вопросу о возможности использования методов неинвазивной спектрофотометрии для контроля эффективности низкоинтенсивной лазерной терапии / А.В. Дунаев, Д.А. Рогаткин // Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – 2009. – № 3/275(561). – С. 110–115.
3. Рогаткин, Д.А. Базовые принципы организации системного программного обеспечения многофункциональных неинвазивных спектрофотометрических диагностических приборов и комплексов / Д.А. Рогаткин // Медицинская техника. – № 2. – 2004. – С. 8–12.
4. Тучин, В.В. Оптическая медицинская диагностика: в 2 т. – М.: Физматлит. – 2007. – Т. 1. – 559 с.
5. Рогаткин, Д.А. Физические основы оптической оксиметрии. Лекция / Д.А. Рогаткин // Медицинская физика. – 2012. – № 2. – С. 97–114.
6. Подмастерьев, К.В. Метрологическое обеспечение биомедицинских приборов и технологий для функциональной диагностики / К.В. Подмастерьев, А.В. Дунаев, А.В. Козюра, Е.А. Жеребцов // Биотехносфера. – 2012. – № 5–6(23–24). – С. 101–105.
7. Пушкарёва, А.Е. Методы математического моделирования в оптике биоткани: учебное пособие / А.Е. Пушкарёва. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 103 с.
8. Rogatkin, D.A Multifunctional laser noninvasive spectroscopic system for medical diagnostics and some metrological provisions for that / D.A Rogatkin, L.G. Lapaeva, E. N. Petritskaya et al. // Proc. SPLE. 2009. Vol. 7368. 73681Y.
9. Дунаев, А.В. Анализ физиологического разброса параметров микроциркуляторно–тканевых систем / А.В. Дунаев, И.Н. Новикова, А.И. Жеребцова, А.И. Крупаткин, С.Г. Соколовский, Э.У. Рафаилов // Биотехносфера. – 2013. – № 5(29). – С. 44–53.

10. Свешникова, А.И., Анализ регистрируемых сигналов в абсорбционной спектрофотометрии тканей при различных уровнях содержания меланина в коже [Электронный ресурс] / А.И. Свешникова, А.В. Дунаев // Сетевое СМИ Режим доступа: <http://youconf.ru/itnop2014/materials/manager/view/1996>.

11. Реброва, О.Ю. Статистический анализ медицинских данных. Применение пакета прикладных программ STATISTICA / О.Ю. Реброва. – М: Медиа Сфера, 2002. – 312 с.

Якушева Алена Игоревна
ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», г. Орёл.
Студент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
Тел.: +7 953-623-73-57
E-mail: alenka_sveshniko@mail.ru

Дунаев Андрей Валерьевич
ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», г. Орёл.
Ведущий научный сотрудник научно-образовательного центра «Биомедицинская инженерия», к.т.н., доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
Тел.: +7 919-261-99-06
E-mail: dunaev@bmecenter.ru

Подмастерьев Константин Валентинович
ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», г. Орёл.
Д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Приборостроение, метрология и сертификация», директор учебно-научно-исследовательского института информационных технологий
Тел. (4862)41-98-21;
E-mail: pms35@ostu.ru

A.I. YAKUSHEVA, A.V. DUNAEV, K.V. PODMASTERYEV

STUDY OF INFLUENCE OF MELANIN CONTENT IN TISSUE REFLECTANCE OXIMETRY

This work is devoted to analysis of the influence of skin melanin on the registered signals in the tissue reflectance oximetry (TRO). The article presents the experimental method and the results of the research. The obtained results of statistical processing of registered signals and calculated medical-biological parameters in the TRO led to the conclusion about the necessity accounting melanin content during the diagnostic study of patients with different levels of skin melanin.

Keywords: tissue reflectance oximetry, tissue oxygen saturation, blood volume, melanin, calibration.

BIBLIOGRAPHY

1. Makarov, D.S. Fiziologicheskiy razbros individual'nykh parametrov mikrotsirkulyatsii krovi kak istochnik oshibok v neinvazivnoy meditsinskoy spektrofotometrii / D.S. Makarov, D.A. Rogatkin // Trudy IX Mezhdunarodnoy konferentsii «Fizika i radioelektronika v meditsine i ekologii». – 2010. – S. 78–82.
2. Dunayev, A.V. K voprosu o vozmozhnosti ispol'zovaniya metodov neinvazivnoy spektrofotometrii dlya kontrolya effektivnosti nizkointensivnoy lazernoy terapii / A.V. Dunayev, D.A. Rogatkin // Izvestiya OrelGTU. Seriya «Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii». – 2009. – № 3/275(561). – S. 110–115.
3. Rogatkin, D.A. Bazyovnyye printsipy organizatsii sistemnogo programmnoy obespecheniya mnogofunktsional'nykh neinvazivnykh spektrofotometricheskikh diagnosticheskikh priborov i kompleksov / D.A. Rogatkin // Meditsinskaya tekhnika. – № 2. – 2004. – S. 8–12.
4. Tuchin, V.V. Opticheskaya meditsinskaya diagnostika: v 2 t. – М.: Fizmatlit. – 2007. – Т. 1. – 559 s.
5. Rogatkin, D.A. Fizicheskiye osnovy opticheskoy oksimetrii. Lektsiya / D.A. Rogatkin // Meditsinskaya fizika. – 2012. – № 2. – S. 97–114.
6. Podmaster'ev, K.V. Metrologicheskiye obespecheniya biomeditsinskikh priborov i tekhnologiy dlya funktsional'noy diagnostiki / K.V. Podmaster'ev, A.V. Dunayev, A.V. Kozyura, Ye.A. Zherebtsov // Biotekhnosfera. – 2012. – № 5–6(23–24). – S. 101–105.
7. Pushkarova, A.Ye. Metod matematicheskogo modelirovaniya v optike biotkani: uchebnoye posobiye / A.Ye. Pushkarova. – SPb: SPbGU ITMO. 2008. – 103 s.
8. Rogatkin, D.A. Multifunctional laser noninvasive spectroscopic system for medical diagnostics and some metrological provisions for that / D.A. Rogatkin, L.G. Lapaeva, E. N. Petritskaya et al. // Proc. SPLE. 2009. Vol. 7368. 73681Y.
9. Dunayev, A.V. Analiz fiziologicheskogo razbrosa parametrov mikrotsirkulyatorno-tkaneynykh sistem / A.V. Dunayev, I.N. Novikova, A.I. Zherebtsova, A.I. Krupatkin, S.G. Sokolovskiy, E.U. Rafailov // Biotekhnosfera. – 2013. – № 5(29). – S. 44–53.
10. Sveshnikova, A.I. Analiz registriruemyykh signalov v absorbtionnoy spektrofotometrii tkaney pri razlichnykh urovnnykh soderzhaniva melanina v kozhe [Elektronnyy resurs] / A.I. Sveshnikova, A.V. Dunayev // Setevoye SMI Rezhim dostupa: <http://youconf.ru/itnop2014/materials/manager/view/1996>
11. Rebrova, O.Yu. Statisticheskiy analiz meditsinskikh dannykh. Primeneniye paketa prikladnykh programm STATISTICA / O.Yu. Rebrova. – М: Медиа Сфера, 2002. – 312 с.

Yakusheva Alena Igorevna
FGBOU VPO "State University – ESPC", Orel,
Student of the Department "Instrument making, metrology and certification"
Tel.: +7 953-623-73-57
E-mail: alenka_sveshniko@mail.ru

Dunayev Andrey Valerievich
FGBOU VPO "State University – UNPK" Orel,
Associate Professor of "Instrument making, metrology and certification"
Tel.: +7 919-261-99-06
E-mail: dunaev@bmecenter.ru

Podmasteriev Konstantin Valentinovich
VPO "State University – ESPC" Orel
Professor, Head of the Chair "Instrument making, metrology and certification", the director of training and research institute of information technology
Tel. (4862) 41-98-21;
E-mail: pms35@ostu.ru

А.Д. ЕЛИСЕЕВ

СИНТЕЗ КОРРЕКЦИИ СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ДВУНАПРАВЛЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ЛИНЕАРИЗОВАННОЙ НЕПРЕРЫВНОЙ МОДЕЛИ

Рассматривается задача разработки эффективных алгоритмов управления двунаправленными преобразователями с ёмкостными накопителями для систем электроприводов. На базе полученной линеаризованной модели обосновывается применение автогенераторной обратной связи по току с целью улучшения динамических и статических характеристик. Результаты аналитических расчетов подтверждаются численным экспериментом на имитационной модели, выполненной в пакете PowerSystems среды Matlab–Simulink.

Ключевые слова: электропривод, энергоэффективность, двунаправленный преобразователь напряжения, математическое моделирование.

В настоящее время одной из тенденций развития современного регулируемого электропривода является внедрение энергосберегающих технологий [1, 2].

С этой целью в системах электроприводов получают распространение ёмкостные накопители электрической энергии (ЕНЭ) с двунаправленными импульсными преобразователями. Задача повторного использования энергии рекуперативного торможения решается таким способом, например, в тяговых электроприводах [3, 4]. Интенсивно развивается схемотехника преобразователей, передающих энергию между накопителем и системой питания [3–6]. В этой связи задача разработки эффективных алгоритмов управления двунаправленными преобразователями энергии представляется актуальной.

Решение данной задачи требует построения математической модели с учетом импульсных свойств преобразователя и характеристик накопителя.

Характерными чертами двунаправленного преобразователя с ЕНЭ являются:

- изменение соотношения напряжения во входной цепи u_C к напряжению накопителя $u_{Cн}$ в широком диапазоне;
- наличие существенных значений последовательного сопротивления ЕНЭ R_n ;
- выполняется соотношение емкостей, такое, что емкость накопителя намного больше емкости во входной цепи $C_n \gg C$;
- стабилизируется напряжение во входной цепи.

Следовательно, известные модели импульсных стабилизаторов напряжения (ИСН) понижающего и повышающего типов [5], полученные на основе линеаризации исходных импульсных систем методом переменных состояния требуют уточнения.

Рассмотрим двунаправленный преобразователь, силовая часть которого имеет два переключающих транзистора (рисунок 1).

Регулируемой величиной является напряжение на конденсаторе звена постоянного тока u_C , возмущением – переменный ток i , представляющий собой, как правило, сумму токов источника энергии и потребителей, например, электропривода, что позволяет сформировать вектор переменных состояния x и входных сигналов u как для режима накопления, так и возврата энергии в следующем виде:

$$x = [i_L \quad u_{Cн} \quad u_C] \quad u = [i], \quad (1)$$

где i_L – ток дросселя.

Полученные на базе дифференциальных уравнений для интервалов импульса и паузы, линеаризованные непрерывные модели двунаправленного преобразователя в режиме непрерывных токов имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{i}_L}{dt} = -\frac{R_n}{L}\tilde{i}_L - \frac{1}{L}\tilde{u}_{Cn} + \frac{D}{L}\tilde{u}_C + \frac{u_{C0}}{L}\tilde{d} \\ \frac{d\tilde{u}_C}{dt} = -\frac{D}{C}\tilde{i}_L + \frac{1}{C}\tilde{i} - \frac{i_{L0}}{C}\tilde{d} \\ \frac{d\tilde{u}_{Cn}}{dt} = \frac{1}{C_n}\tilde{i}_L \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{i}_L}{dt} = -\frac{R_n}{L}\tilde{i}_L + \frac{1}{L}\tilde{u}_{Cn} - \frac{1-D}{L}\tilde{u}_C + \frac{u_{C0}}{L}\tilde{d} \\ \frac{d\tilde{u}_C}{dt} = \frac{1-D}{C}\tilde{i}_L + \frac{1}{C}\tilde{i} + \frac{i_{L0}}{C}\tilde{d} \\ \frac{d\tilde{u}_{Cn}}{dt} = -\frac{1}{C_n}\tilde{i}_L \end{cases} \quad (3)$$

где \tilde{d} – коэффициент заполнения преобразователя;

знак «~» показывает бесконечно малое изменение переменной относительно установившегося режима, в котором проводится линейризация;

индекс «0» указывает на величину переменной в установившемся режиме, в котором преобразователь работает с коэффициентом заполнения D .

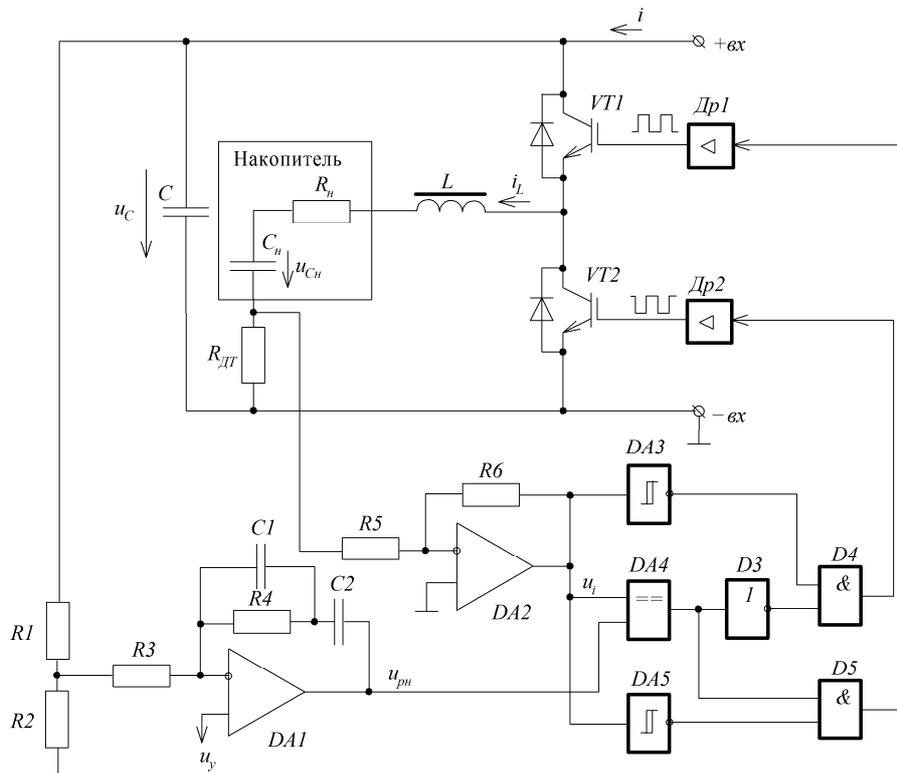


Рисунок 1 – Функциональная схема двунаправленного преобразователя с регулятором тока:
Др – драйвер, $R_{дт}$ – сопротивление датчика тока

Система (2) относится к режиму понижения напряжения, система (3) – к режиму повышения.

Из систем (2,3) можно получить передаточные функции по управляющему воздействию соответственно для двух режимов:

$$W_d(p) = \frac{\tilde{u}_C}{\tilde{d}} = -\frac{1}{C_n p} \cdot \frac{i_{L0}(LC_n p^2 + R_n C_n p + 1) + u_{C0} D C_n p}{LC p^2 + R_n C p + D^2 + \frac{C}{C_n}} \quad (4)$$

$$W_d(p) = \frac{\tilde{u}_c}{\tilde{d}} = \frac{1}{C_n p} \cdot \frac{-i_{L0}(LC_n p^2 + R_n C_n p + 1) + u_{c0}(1-D)C_n p}{LCp^2 + R_n Cp + (1-D)^2 + \frac{C}{C_n}} \quad (5)$$

Принимая коэффициент заполнения двунаправленного преобразователя $D'=D$ для режима понижения напряжения (4) и $D'=D-1$ для режима повышения напряжения (5) получаем структурную схему двунаправленного преобразователя и его частотные характеристики в зависимости от величины D' , изображенные на рисунке 2.

Если установившееся значение тока дросселя $i_{L0}=0$, то уравнения (4, 5) приводятся к виду:

$$W_d(p) = \frac{D' u_{c0}}{a \left(\frac{LC}{a} p^2 + \frac{R_n C}{a} p + 1 \right)} \quad (6)$$

$$a = D'^2 + \frac{C}{C_n}$$

При малых D коэффициент a можно принять равным C/C_n . Тогда:

$$W_d^0(p) \approx \frac{D' u_{c0}}{LC_n p^2 + R_n C_n p + 1} \quad (7)$$

$$\xi = \frac{R_n}{2} \sqrt{\frac{C_n}{L}}$$

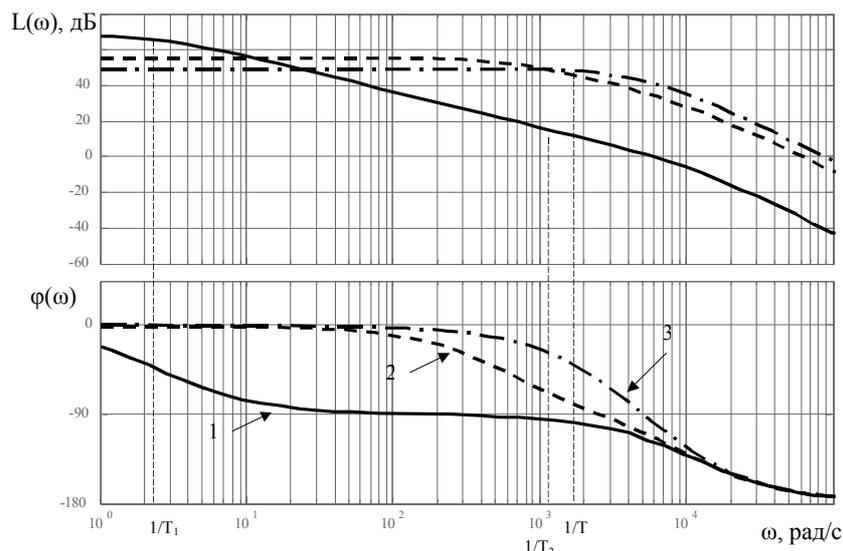


Рисунок 2 – ЛАФЧХ неизменяемой части преобразователя:

$C_n=1.486\Phi$, $C=1470\text{мк}\Phi$, $R_n=0.294\text{Ом}$, $L=300\text{мк}\text{Гн}$, $i_{L0}=0$, $T_1=0.4359\text{с}$, $T_2=0.0010\text{с}$, $T=6.64 \cdot 10^{-4}\text{с}$
 $1-D'=0.01$, $2-D'=0.5$, $3-D'=1$, $\xi=10.34$.

Передаточная функция (7) соответствует аperiодическому звену второго порядка, которое может быть представлено в виде последовательного соединения двух аperiодических звеньев с постоянными времени:

$$T_1 = \frac{R_n C_n}{2} + \sqrt{\frac{(R_n C_n)^2}{4} - LC_n} \quad (8)$$

$$T_2 = \frac{R_n C_n}{2} - \sqrt{\frac{(R_n C_n)^2}{4} - LC_n}$$

В случае $D=1$ можно пренебречь слагаемым C/C_n , поскольку $C_n \gg C$. Тогда $a \approx 1$:

$$W_d^1(p) \approx \frac{u_{c0}}{LCp^2 + R_n Cp + 1} \quad (9)$$

$$\xi = \frac{R_n}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$$

$\xi = 0,3254$. Т. е., передаточная функция (9) соответствует колебательному звену второго порядка с постоянной времени T :

$$T = \sqrt{LC} \quad (10)$$

Таким образом, частотная характеристика объекта управления имеет в диапазоне частот $100 \dots 1000$ Гц фазовое запаздывание при малых D' около 90° . Полученная в результате преобразований систем уравнений (2), (3) модель (рисунок 3) служит основой для синтеза алгоритмов и устройства управления.

Двунаправленный преобразователь представляет собой импульсный стабилизатор понижающего типа в режиме накопления энергии и импульсный стабилизатор повышающего типа в режиме возврата энергии. В общем случае преобразователи с целью обеспечения требуемых характеристик должны иметь для режимов накопления и возврата энергии соответственно отдельные каналы управления, включающие в себя усилитель сигнала ошибки рассогласования, широтно-импульсный модулятор, корректирующие звенья, учитывающие различный вид передаточных функций по управляющему и возмущающему воздействиям. Задача построения единого устройства управления двунаправленными преобразователями в зависимости от требований к качеству управления имеет несколько решений. Предлагается, например, формирование пороговых напряжений на конденсаторе C , определяющих интервалы режимов аккумуляирования и возврата энергии [5], либо вычисление требуемых коэффициентов заполнения исходя из соотношения напряжений U_C к $U_{Cн}$ [6].

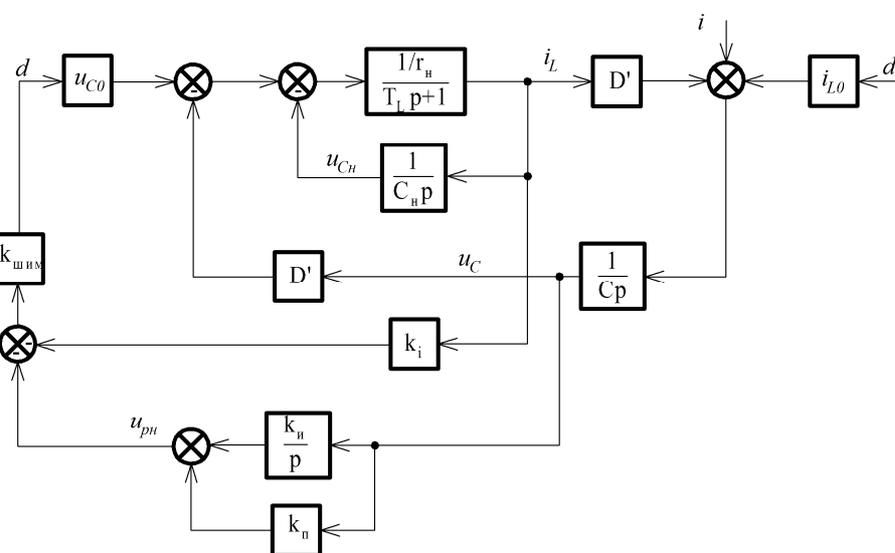


Рисунок 3 – Структурная схема линеаризованной модели двунаправленного преобразователя с регулятором тока

В связи с наличием датчика тока, необходимого для контроля режимов работы элементов ЭНЭ, представляется целесообразным с целью повышения запаса устойчивости и обеспечения высокого качества управления применение структуры подчиненного регулирования, использования наряду с регулятором напряжения U_C регулятора тока дросселя i_L . Преобразователи с пропорциональными (изодромными и более сложными) регуляторами тока дросселя выполняются со структурами на базе генератора пилообразного напряжения или с автогенераторной связью по току [8, 9].

Как видно из анализа частотных характеристик (рисунки 4 – 5), а также результатов моделирования переходных процессов на линеаризованной модели (рисунок 3) в диапазоне изменения $D' = 0.3 \dots 0.7$ использование обратной связи по току дросселя улучшает качество регулирования.

Регулятор напряжения при этом имеет астатизм первого порядка. Однако при малых ($<0,1$) значениях D' в диапазоне частот $100 \dots 1000$ рад/с запас устойчивости уменьшается (рисунок 2). Система останется устойчивой при ограничении, в соответствии с выводами [9] диапазона изменения коэффициента заполнения, например за счет автогенераторной связи по току. Другим эффективным, с точки зрения управления, решением было бы создание не-

четкого (нейросетевого) регулятора учитывающего изменение частотных свойств неизменяемой части системы при изменении D' .

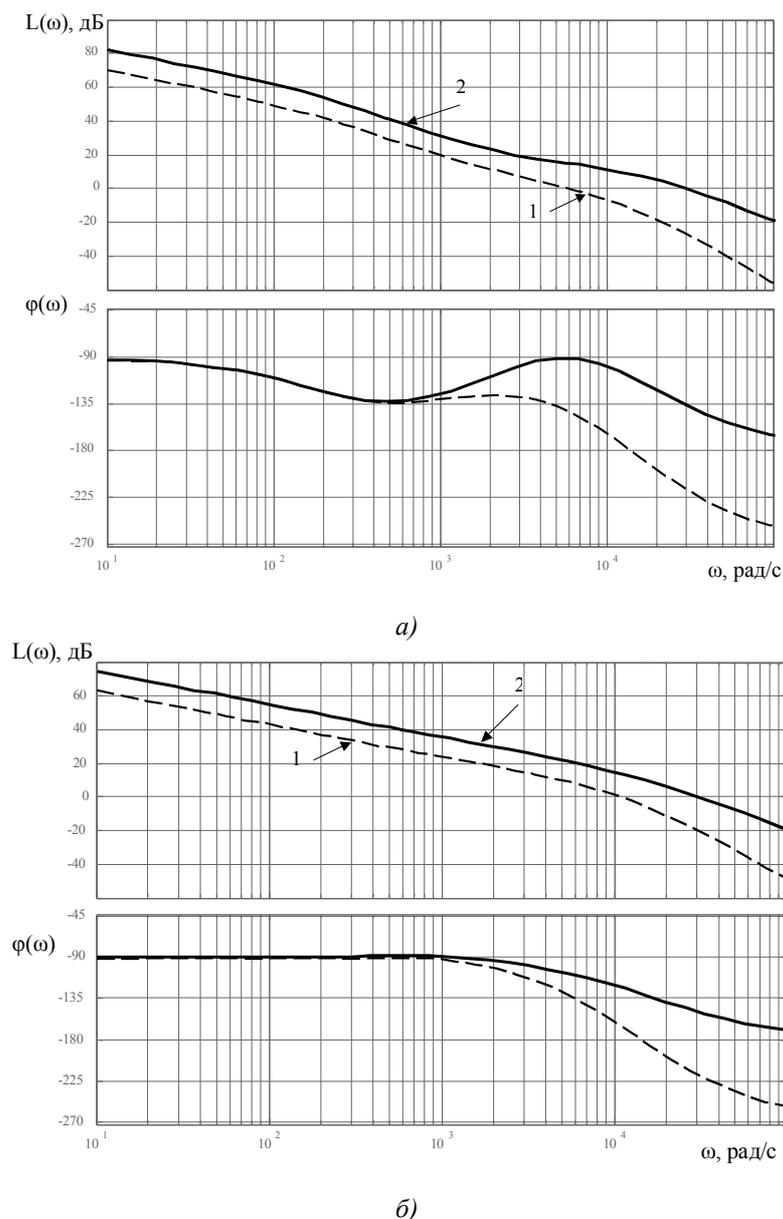


Рисунок 4 – ЛАФЧХ двунаправленного преобразователя

а) $D'=0.3$, б) $D'=0.7$:

1 – с изодромом в цепи обратной связи по напряжению $k_u=10000$, $k_n=10$, $k_{шим}=0.0034$, $u_{c0}=290B$; 2 – с обратной связью по току $k_u=40000$, $k_n=40$, $k_{шим}=0.0034$, $k_i=0.005$, $u_{c0}=290B$

Устройство управления двунаправленным преобразователем (рисунок1), выполненное по данной схеме коррекции содержит изодромный регулятор напряжения (DA1), усилитель сигнала тока (DA2), компаратор ШИМ (DA4), сравнивающий сигнал задания тока (выход регулятора напряжения) u_{rn} и усиленный сигнал тока u_i , пороговые элементы DA3, DA5, запрещающие одновременную работу в режимах понижения и повышения напряжения. Особенностью данной реализации, в отличие от схем с генератором пилообразного напряжения, является:

- переменная частота напряжения ШИМ, определяемая обратной связью по току дросселя;
- простота реализации широтно– импульсного модулятора и режима ограничения максимального тока.

Результаты имитационного моделирования схемы, изображенной на рисунке 1 в пакете PowerSystems среды Matlab–Simulink показывает хорошее совпадение с данными, полученными с помощью линеаризованной модели. Так, на рисунке 5 приведены переходные процессы в преобразователе при набросе – сбросе знакопеременной нагрузки во входной цепи $i = \pm 15 \text{ A}$, что характеризует нагрузку в электроприводе. Динамическая ошибка регулирования в линеаризованной модели не превышает 0,62% от регулируемой величины, в имитационной – 1,03%.

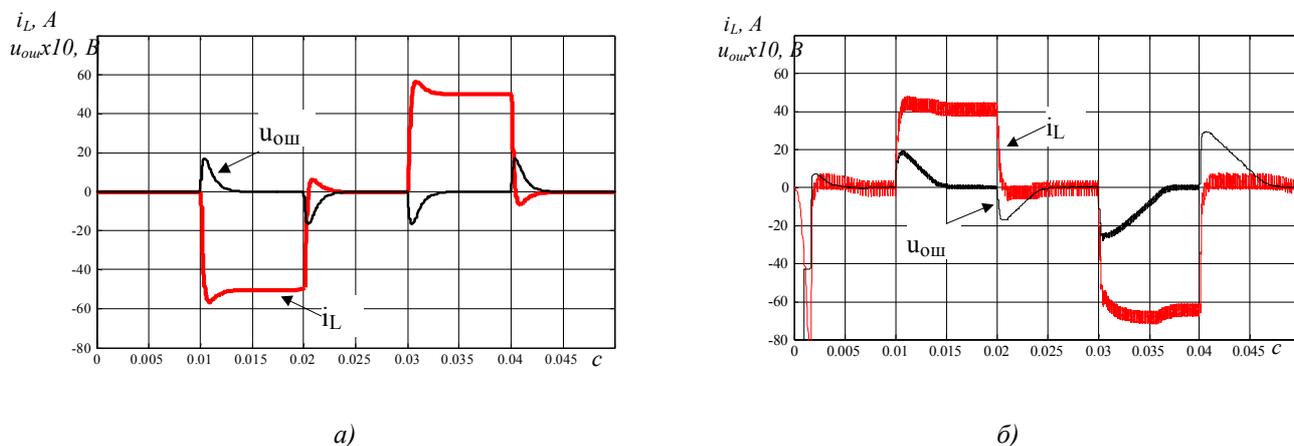


Рисунок 5 – Переходный процесс в двунаправленном преобразователе при сбросе–набросе нагрузки

а) линеаризованная модель $D' = 0.3$, б) имитационная модель $D' = 0.3529$ на интервале 10...20мс и $D' = 0.2444$ на интервале 30...40мс $u_{ош}$ – ошибка регулирования.

Отличия, наблюдаемые в картинах переходных процессов в линеаризованной и имитационной моделях объясняются тем, что в последней учитывается КПД схемы и соответственно изменяется установившееся значение коэффициента заполнения в зависимости от увеличения (в режиме понижающего ИСН) или уменьшения (в режиме повышающего ИСН) напряжения $u_{сн}$.

Выводы:

1. Получена линеаризованная модель двунаправленного преобразователя с ЕНЭ.
2. Обоснована коррекция двунаправленного преобразователя методом автогенераторной обратной связи по току.
3. Имитационное моделирование двунаправленного преобразователя с ЕНЭ в электроприводе с помощью пакета программы PowerSystems среды Matlab–Simulink показывает достоверность и полноту линеаризованной модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Краснов, Д.В. Оценка потребности в высоковольтных регулируемых электроприводах переменного тока / Д.В. Краснов // Приводная техника. – 2008. – № 6. – С. 3–13.
2. Стариков, А.Н. Системный подход к проведению испытаний энергоэффективного автономного электромеханического привода с роликвинтовым исполнительным механизмом / А.Н. Стариков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 3(287). – С. 70–75.
3. Бродский, Ю.А. Стационарная система аккумулирования энергии рекуперации электроподвижного состава метрополитена на базе ёмкостных накопителей энергии / Ю.А. Бродский, А.И. Подаруев, В.Н. Пупынин, М.В. Шевлюгин // Электротехника. – 2008. – № 7. – С. 38–41.
4. Зотов, Л.Г. Двухуровневая система обмена электрической энергией постоянного тока на основе структур с переключаемыми конденсаторами для автономных энергосистем / Л.Г. Зотов // Электротехника. – 2011. – № 7. – С. 52–57.
5. Пат. 2476978 Российская Федерация, МПК H02M3/158, H02J7/34. Двунаправленный преобразователь постоянного тока в постоянный для управления накопителем энергии при отводе энергии / Себергер Стивен Дж; заявитель и патентообладатель Фишер Контролз Интернешнел ЛЛС (US). – № 2009146880/07; заявл. 13.06.08; опубл. 27.02.13. – 6 с.
6. Пат. 2393618 Российская Федерация, МПК H02M3/155. Двунаправленный промежуточный вольтодобавочный преобразователь постоянного тока, система управления приводом железнодорожного вагона

и система фидера питания контактной сети / Китанака Хидетоси; заявитель и патентообладатель Мицубиси Денки Кабусики Кайся (Jp). – № 2008141777/09; заявл. 22.03.2006; опубл. 27.06.10. – 5 с.

7. Мелешин, В.И. Транзисторная преобразовательная техника / В.И. Мелешин. М.: Техносфера, 2005. – 632 с.

8. Белов, Г.А. Импульсные модели и устойчивость токовых контуров импульсных преобразователей с ПИ–регулятором тока дросселя / Г.А. Белов // Практическая силовая электроника. – 2006. – № 22. – С. 36–43.

9. Коржавин, О.А. Моделирование и анализ устойчивости импульсных стабилизаторов напряжения в режиме большого сигнала возмущения / О.А. Коржавин, О.М. Артамонова, А.А. Вороной // Практическая силовая электроника. – 2005. – № 18. – С. 12–43.

Елисеев Алексей Дмитриевич

ОАО «ВНИИ «Сигнал», г. Ковров

кандидат техн. наук, ведущий инженер–исследователь

телефон: 8(904)257–85–13

E–mail: alelsign@yandex.ru

A.D. YELISEYEV

SYNTHESIS OF STABILIZED BI–DIRECTIONAL VOLTAGE CONVERTER ADJUSTMENT BASED ON LINEARIZED CONTINUOUS MODEL

The paper considers development of efficient control algorithms for bi–directional voltage converters having capacitive storages designed for electric drive systems. The application of self–oscillator current feedback for improvement in static and dynamic drive system performance is justified using a derived linearized model. Analytic computational results are supported by a numeric experiment on a simulation model developed within the Matlab/Simulink environment using the Power Systems package.

Keywords: *electrical drive, power efficiency, bi–directional voltage converter, mathematic simulation.*

BIBLIOGRAPHY

1. Krasnov, D.V. Otsenka potrebnosti v vysokovol'tnykh reguliruyemykh elektroprivodakh peremennogo toka / D.V. Krasnov // Privodnaya tekhnika. – 2008. – № 6. – С. 3–13.

2. Starikov, A.N. Sistemnyy podkhod k provedeniyu ispytaniy energoeffektivnogo avtonomnogo elektromekhanicheskogo privoda s rolikovintovym ispolnitel'nyim mekhanizmom / A.N. Starikov // Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2011. – № 3(287). – С. 70–75.

3. Brodskiy, Yu.A. Statsionarnaya sistema akkumulirovaniya energii rekuperatsii elektropodvizhnogo sostava metropolitena na baze yomkostnykh nakopiteley energii / Yu.A. Brodskiy, A.I. Podaruyev, V.N. Pupyin, M.V. Shevlyugin // Elektrotekhnika. – 2008. – № 7. – С. 38–41.

4. Zotov, L.G. Dvukhurovnevaya sistema obmena elektricheskoy energiyey postoyannogo toka na osnove struktur s pereklyuchayemymi kondensatorami dlya avtonomnykh energosistem/ L.G. Zotov // Elektrotekhnika. – 2011. – № 7. – С. 52–57.

5. Pat. 2476978 Rossiyskaya Federatsiya. MPK H02M3/158. H02J7/34. Dvunapravlenyy preobrazovatel' postoyannogo toka v postoyannyy dlya upravleniya nakopitelem energii pri otvode energii / Seberger Sti–ven Dzh; zavavitel' i patentoobladatel' Fisher Kontrolz Interneshnel LLS (US). – № 2009146880/07; yayavl. 13.06.08; opubl. 27.02.13. – 6 s.

6. Pat. 2393618 Rossiyskaya Federatsiya. MPK H02M3/155. Dvunapravlenyy promezhutochnyy vol'to–dobavochnyy preobrazovatel' postoyannogo toka, sistema upravleniya privodom zheleznodorozhnogo vagona i sistema fidera pitaniya kontaktnoy seti / Kitanaка Khidetosi; zavavitel' i patentoobladatel' Mitsubisi Denki Kabusiki Kaysya (Jp). – № 2008141777/09; yayavl. 22.03.2006; opubl. 27.06.10. – 5 s.

7. Meleshin, V.I. Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika / V.I. Meleshin. М.: Tekhnosfera. 2005. – 632 s.

8. Belov, G.A. Impul'snyye modeli i ustoychivost' tokovykh konturov impul'snykh preobrazovateley s PI–regulyatorom toka drosselya / G.A. Belov // Prakticheskaya silovaya elektronika. – 2006. – № 22. – С. 36–43.

9. Korzhavin, O.A. Modelirovaniye i analiz ustoychivosti impul'snykh stabilizatorov napravleniya v rezhime bol'shogo signala vozmushcheniya / O.A. Korzhavin, O.M. Artamonova, A.A. Voronoy // Prakticheskaya silovaya elektronika. – 2005. – № 18. – С. 12–43.

Eliseev Alexey Dmitrievich

JSC "Institute «Signal», Kovrov

candidate tehn. Science, leading research engineer

phone: 8 (904) 257–85–13

E–mail: alelsign@yandex.ru

П.Н. ШКАТОВ, К.В. МЯКУШЕВ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВИХРЕТОКО–МАГНИТНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

Статья посвящена исследованию и математическому описанию магнитных свойств ферромагнитного металла, формирующих вихретоковый сигнал при одновременном воздействии постоянным полем намагничивания и слабым электромагнитным полем вихретокового преобразователя в процессе дефектоскопии комбинированным вихретоко–магнитным методом.

Ключевые слова: вихретоковый контроль, магнитный контроль, комбинированные методы, магнитные свойства металла.

Для неразрушающего контроля изделий из ферромагнитных сталей широко применяются магнитный и вихретоковый методы контроля. Каждый из этих методов обладает своими преимуществами и недостатками.

Магнитный метод контроля, основанный на регистрации потоков рассеяния, предполагает намагничивание объекта контроля (ОК) до состояния близкого к техническому насыщению. Это сопряжено с необходимостью применения довольно громоздких систем намагничивания, особенно при работе с массивными объектами контроля.

Метод вихревых токов лишен этого недостатка, однако не позволяет выявлять дефекты, залегающие на глубине, существенно превышающей глубину проникновения переменного магнитного поля в металл. Глубина проникновения увеличивается с уменьшением частоты возбуждающего электромагнитного поля, но, одновременно, снижается и абсолютная чувствительность вихретоковых преобразователей (ВТП), что приводит к необходимости увеличения числа витков измерительных катушек и, соответственно, к увеличению их габаритов до неприемлемых значений.

Существенно улучшить ситуацию позволяет активно развивающийся в последние годы [1–7] вихретоко–магнитный (ВТМ) метод, основанный на комбинации обоих методов. При реализации ВТМ метода в объекте контроля создается постоянное магнитное поле с помощью системы намагничивания и одновременно на намагниченном участке ОК с помощью ВТП возбуждаются вихревые токи.

Применение постоянного магнитного поля при вихретоковом контроле обычно применяется для стабилизации магнитных свойств материала и соответствующего уменьшения шумовой составляющей, а также для увеличения глубины проникновения вихревых токов [8]. При этом вихретоковый сигнал определяется не начальной магнитной проницаемостью металла, а магнитной проницаемостью частного несимметричного цикла перемагничивания.

Принципиальное преимущество ВТМ метода относительно вихретокового – возможность обнаружения дефектов, залегающих на глубинах, существенно превышающих глубину проникновения вихревых токов в ОК. При подмагничивании ОК постоянным магнитным полем в окрестностях дефекта происходит перераспределение магнитного потока, что из–за соответствующего изменения напряженности магнитного поля приводит к возникновению на поверхности металла магнитных пятен – зон с повышенной или пониженной магнитной проницаемостью. В зоне магнитного пятна рабочая точка ферромагнитного металла на основной кривой намагничивания сдвигается. Это приводит к изменению наклона частного цикла перемагничивания. Изменение магнитных свойств материала в зоне магнитного пятна приводит к соответствующему изменению вихретокового сигнала, несущему информацию о наличии и параметрах дефекта. Следует отметить, что для создания надежно регистрируемых магнитных пятен на поверхности требуются существенно меньшие значения напряженности магнитного поля, чем для выявления дефектов магнитным методом магнитных потоков рассеяния, регистрируемых над поверхностью дефектного участка. Более того, существует оптимальная величина напряженности намагничивающего поля, соответствующая максимуму вихретокового сигнала [3–5].

Выполненные экспериментальные исследования на образцах из различных марок стали показали, что полученные зависимости вихретокового сигнала от параметров дефектов и режимов контроля качественно согласуются с теоретическими. Однако количественные результаты достаточно чувствительны к вариации магнитных свойств образцов. Это приводит

к необходимости учитывать реальные магнитные свойства контролируемого металла. Цель представленной работы – разработка методики определения магнитных характеристик контролируемого металла, требуемых для расчета вихретокового сигнала при дефектоскопии ВМТ методом.

Эксперименты по исследованию свойств материала проводились на образцах из стали марки 20, широко применяемой в промышленности, например, для изготовления труб высокого давления для транспортировки нефтепродуктов. Аналогичными магнитными свойствами обладает сталь марки 20ГЛ, применяемая в машиностроении, в частности для изготовления литых деталей вагонных тележек и др. Контроль таких деталей затруднен традиционными методами по целому ряду причин, поэтому полученные экспериментальные данные могут иметь практическое значение при разработке приборов ВМТ контроля.

Для снятия магнитных характеристик стали в постоянных и медленно меняющихся магнитных полях использовался автоматизированный исследовательский комплекс REMA-GRAPH С производства компании Magnet-Physik Dr. Steingroever GmbH. В результате исследования образцов, были получены:

- кривые первоначального намагничивания;
- кривые предельного цикла перемагничивания (предельная петля гистерезиса);
- кривые частных циклов симметричного перемагничивания.

Наибольший интерес представляла совокупность частных несимметричных циклов перемагничивания полем малой амплитуды с вершинами, лежащими на кривой первоначального намагничивания (цикл AA', рисунок 1), а точнее зависимость угла наклона частного цикла от напряженности магнитного поля, в котором находится образец.

Поскольку амплитуда напряженности поля, создаваемого вихретоковым преобразователем, мала по сравнению с полем намагничивания, раскрытие цикла можно считать пренебрежимо малым и использовать для оценки угла наклона начало кривой размагничивания. По сути, этот угол наклона представляет собой магнитную проницаемость, формирующую вихретоковый сигнал. Такая магнитная проницаемость называется обратной – $\mu_{обр}$ [9, 10]. Величина $\mu_{обр}$ определялась как

$$\mu_{обр}(H) = \frac{dB(H)}{dH} \cdot \frac{1}{\mu_0}. \quad (1)$$

Дифференцирование проводилось численно по начальным точкам кривой размагничивания. Результаты расчета зависимости $\mu_{обр}(H)$ показаны на рисунке 2.

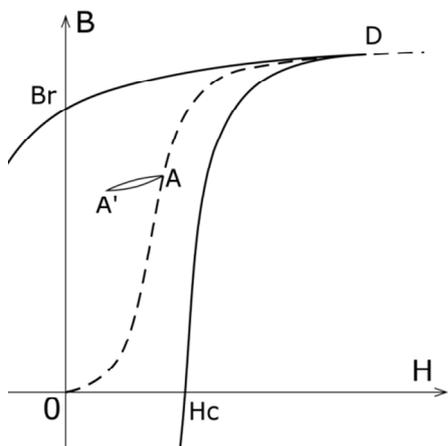


Рисунок 1 – Частный несимметричный цикл перемагничивания малым полем вихретокового преобразователя

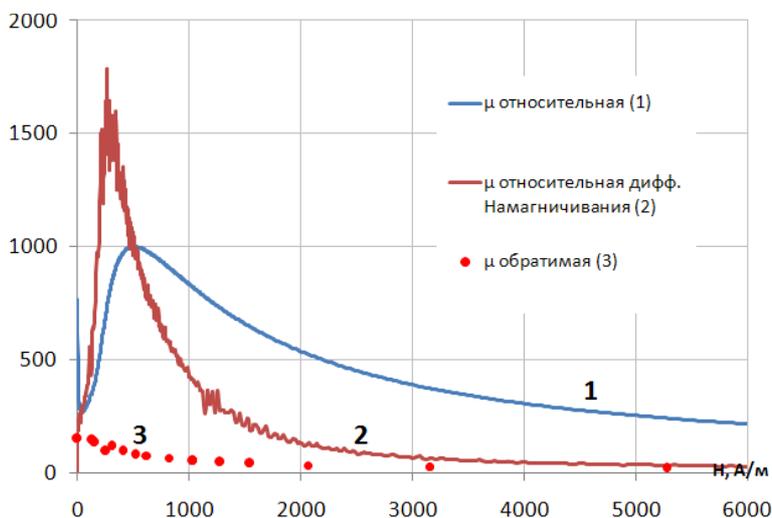


Рисунок 2 – Экспериментальные значения магнитных проницаемостей для Стали 20ГЛ

Для сравнения, на том же графике приведены зависимости относительной μ и дифференциальной $\mu_{дифф}$ магнитных проницаемостей. Примечательно, что $\mu_{обр}$ не имеет максимума, характерного для двух других зависимостей и существенно отличается по величине в меньшую сторону, что говорит о недопустимости использования μ и $\mu_{дифф}$ при расчете вихретокового сигнала применительно к ВМТ методу.

Для описания магнитных свойств материала при компьютерном моделировании целесообразно ввести аппроксимацию зависимости $\mu_{обр}(H)$. Для аналитической аппроксимации предлагается использовать следующую зависимость:

$$F(H) = \frac{k_2}{k_1 \cdot \mu_0 \cdot \left[1 + \left(\frac{H}{k_1} \right)^{k_3} \right]} + 1. \quad (2)$$

Зависимость (2) получена путем дифференцирования функции, аппроксимирующей кривую первоначального намагничивания, с использованием корректирующих коэффициентов, подбираемых опытным путем.

Результирующая аппроксимирующая зависимость показана на рисунке 3. Несоответствие с экспериментальными данными наблюдается в области малых значений напряженности магнитного поля ($H < 50$ А/м). Учитывая характер экспериментально полученной зависимости, в зоне несоответствия значение функции аппроксимации может быть заменено на значение начальной магнитной проницаемости, в данном случае равной 150.

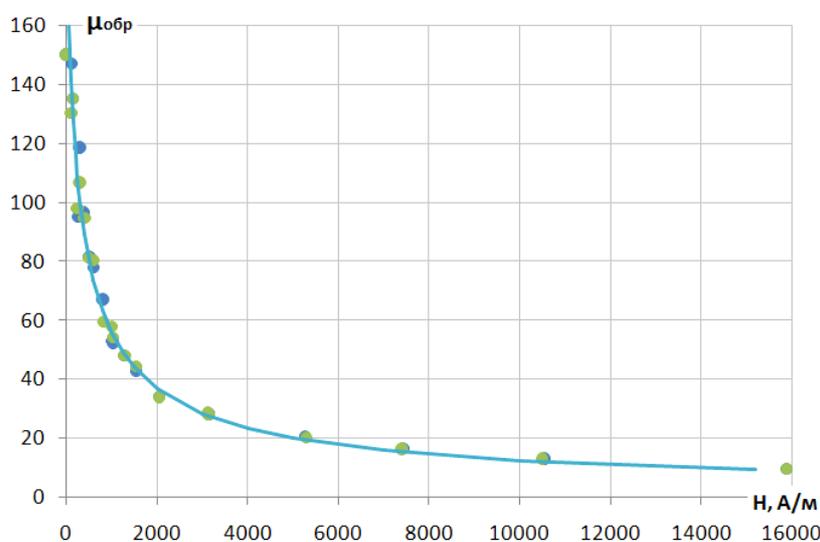


Рисунок 3 – Экспериментальные значения $\mu_{обр}$ для Сталей 20ГЛ и аппроксимирующая функция

Поскольку напряженность магнитного поля величина векторная, возникает необходимость определения степени анизотропии $\mu_{обр}$, как параметра, воспринимаемого вихретоковым преобразователем. С этой целью был проведен эксперимент, схема которого представлена на рисунке 4. В образце, представляющем из себя полосу из ферромагнитной стали, были просверлены 8 отверстий, через которые непосредственно на образец были намотаны две пары обмоток. В каждой паре одна из обмоток являлась обмоткой возбуждения (ОВ), а вторая – измерительной обмоткой (ОИ). Таким образом, каждая из пар обмоток представляла собой вихретоковый преобразователь трансформаторного типа с индуктивной связью, обеспечиваемой в основном через металл образца. Как видно из рисунка, ось одной пары обмоток была ориентирована вдоль длинной стороны образца, второй пары – поперек.

В образце с помощью приставного электромагнита создавалось магнитное поле с напряженностью \vec{H} , ориентированное вдоль его длинной стороны.

Поскольку индуктивная связь катушек в каждой паре обеспечивалась в основном через металл, управление током электромагнита позволяло оценить влияние степени намагниченности образца на индуктивную связь. Причем в первой паре катушек (ОВ1– ОИ1) направление \vec{H} совпадало с компонентой поля, фиксируемой измерительной обмоткой, а во второй паре катушек было ей перпендикулярно. Следует отметить, что в описываемой конфигурации поле обмоток возбуждения образует замкнутые контуры в пределах действия \vec{H} , поэтому для количественной оценки $\mu_{обр}$ такую конфигурацию использовать нельзя, однако для оценки степени анизотропии и характера поведения каждой из пространственных компонент магнитной проницаемости в зависимости от величины \vec{H} такая схема вполне подходит.

На рисунке 5 представлены результаты эксперимента, проведенного на частоте 10 кГц. Зависимость напряжения, наводимого на выводах измерительной обмотки, ось которой направлена вдоль поля (ОИ1) носит выраженный затухающий характер, аналогичный экспе-

риментальной зависимости $\mu_{обр}(H)$, представленной на рисунках 2 – 3. Напряжения на выводах второй измерительной обмотки, ось которой ориентирована ортогонально силовым линиям намагничивающего поля, слабо зависит от напряженности поля намагничивания. Аналогичные по характеру зависимости были получены и на других частотах.

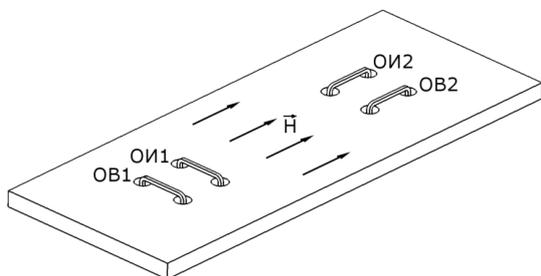


Рисунок 4 – Схема эксперимента для оценки анизотропии магнитных свойств

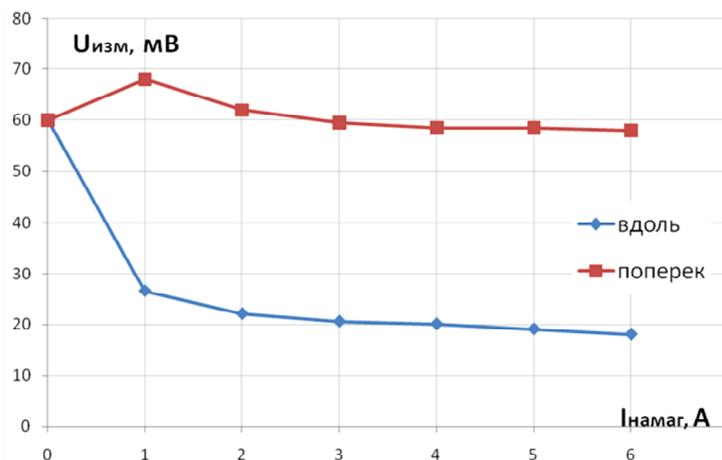


Рисунок 5 – Результаты эксперимента по исследованию анизотропии $\mu_{обр}$ частота 10 кГц

Результаты эксперимента позволяют сделать вывод, что магнитная проницаемость намагниченного образца с точки зрения взаимодействия с полем вихретокового преобразователя носит анизотропный характер. В направлении, совпадающем с \vec{H} она равна $\mu_{обр}$. В направлении, поперечном \vec{H} , магнитная проницаемость слабо меняется в зависимости от поля намагничивания и в рамках расчетных моделей может быть приравнена начальной проницаемости $\mu_{нач}$.

Полученные экспериментальные данные были использованы для описания свойств металла при проведении расчетов ВТМ устройств методом конечных элементов. Расчетная задача разделяется на два этапа. На первом этапе решается задача намагничивания образца с нелинейными магнитными свойствами постоянным магнитным полем. Свойства материала образца описываются кривой первоначального намагничивания $B(H)$. На втором этапе образец условно разбивается на участки, в пределах которых направление поля намагничивания можно считать постоянным. В предельном случае, размер такого участка может совпадать с размером конечного элемента. Далее, для каждого участка нелинейные магнитные свойства заменяются линейной ортотропной магнитной проницаемостью, значение которой в направлении поля вычисляется по формуле (1), а в поперечных направлениях приравнивается к $\mu_{нач}$. После формирования расчетной области с линейными свойствами материалов, проводится решение гармонической вихретоковой задачи, вычисление ЭДС, наводимой в измерительной обмотке и других необходимых параметров.

Верификация модели проводилась на макете внутритрубного дефектоскопа, созданного на базе лаборатории неразрушающего контроля ООО «ИНТРОН ПЛЮС». Макет представляет собой гантелеобразный магнитопровод с обмотками намагничивания, подключенными к регулируемому источнику постоянного тока. В центральной части магнитопровода между обмотками намагничивания в непосредственной близости от поверхности трубы расположен ВТП, состоящий из обмотки возбуждения и нескольких дифференциальных обмоток измерения. Схема макета представлена на рисунке 6.

На рисунке 7 приведены результаты расчета в виде годографов относительного вносимого напряжения $\underline{U}_{вн}^* = \underline{U}_{вн}/U_0$ измерительной обмотки ВТП. Нормировка проводилась по напряжению U_0 одной из дифференциальной включенных обмоток измерительной системы ВТП при его размещении на бездефектном образце.

Годографы получены путем сканирования зоны дефекта магнитной системой, совмещенной с ВТП. Дефект, имитирующий коррозионное поражение на внешней поверхности трубы, имел вид глухого отверстия глубиной 0,3Т и диаметром 3Т, где Т = 8 мм – толщина стенки трубы диаметром 114 мм.

Каждая кривая соответствует сканированию при разных значениях поля намагничивания. Поскольку годограф для дифференциального ВТП имеет симметричный вид, на рисунке показано по одной петле каждого годографа. Вторая петля имеет вид симметричного

отображения относительно начала координат. Из результатов видно, что максимум сигнала достигается при напряженности поля намагничивания $H = 4,4$ кА/м, что соответствует точке перегиба на кривой намагничивания. Дальнейшее увеличение поля намагничивания приводит к снижению уровня сигнала, вызванного «размыванием» магнитного пятна, воспринимаемого ВТП.

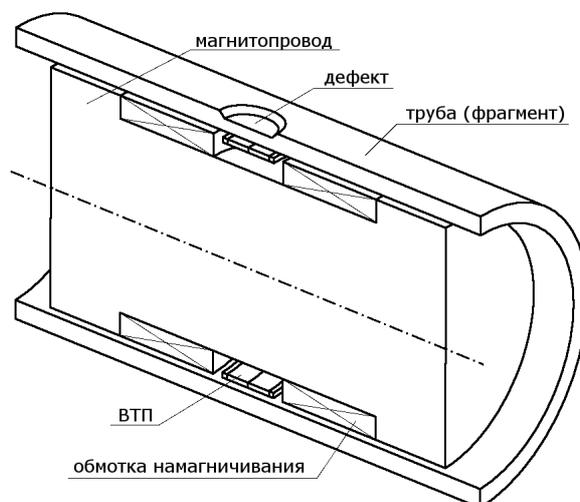


Рисунок 6 – Макет внутритрубного дефектоскопа для исследования влияния уровня намагничивания на выявляемость дефектов (разрез)

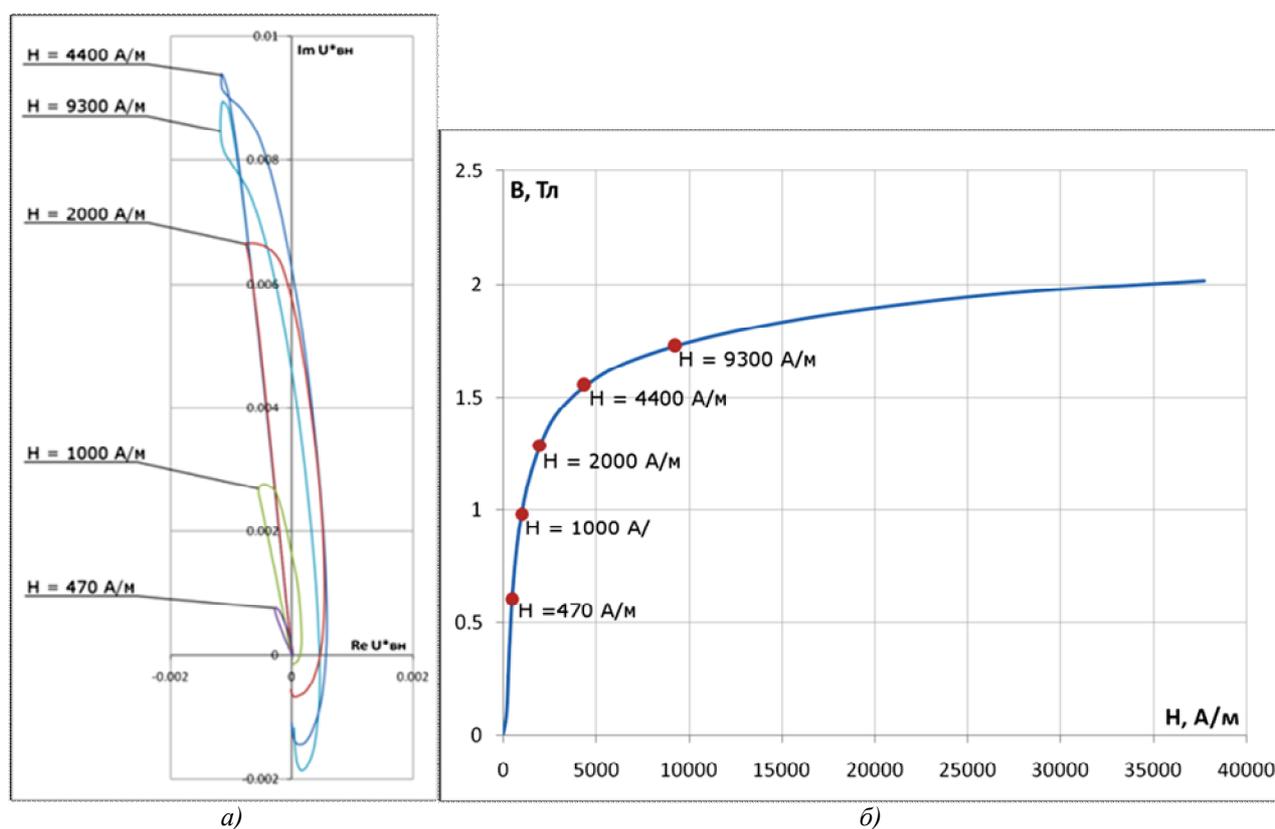


Рисунок 7 – Годографы относительного вносимого напряжения для разных значений поля намагничивания (а) и рабочие точки материала на кривой намагничивания, соответствующие этим значениям (б)

На рисунке 8 приведены расчетный и экспериментальный годографы для коррозионного поражения на внешней поверхности трубы. Конструкция ВТП не позволяет провести нормировку результатов, соответствующую расчету, однако явно прослеживается корреляция между расчетным и экспериментальным результатом по форме годографа. Шум экспериментального сигнала обусловлен, прежде всего, неоднородностью магнитных свойств трубы, определяемых технологией ее производства путем горячего катания.

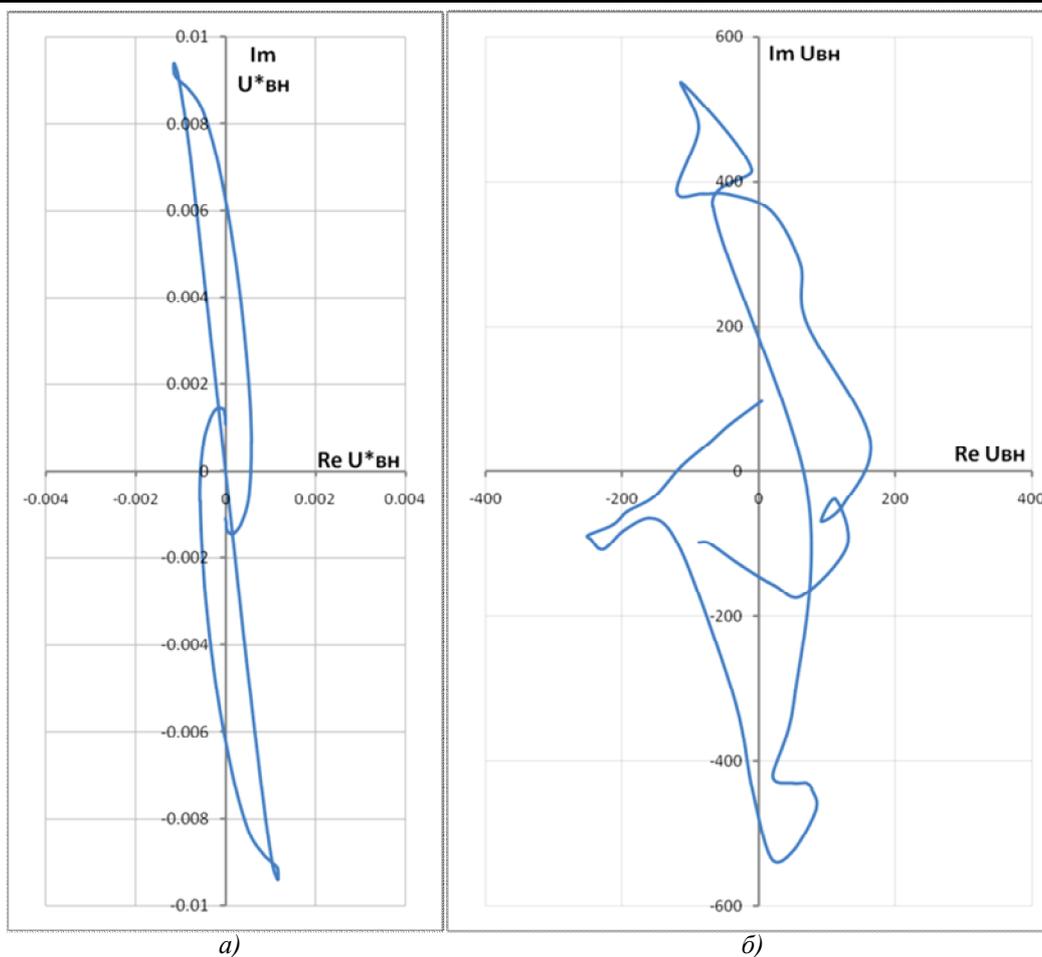


Рисунок 8 – Результат расчета (а) и эксперимента (б) для $H = 4400$ А/м

Выводы:

1. Вихретоковый сигнал при ВТМ зависит от обратимой магнитной проницаемости $\mu_{обр}$, определяемой по данным о частных циклах перемагничивания.
2. Выполненные эксперименты подтвердили наличие анизотропии $\mu_{обр}$ при намагничивании ферромагнитного ОК в заданном направлении, которая существенно изменяется в направлении намагничивания и практически не изменяется в ортогональном направлении.
3. Зависимость $\mu_{обр}(H)$ может быть с приемлемой для практики погрешностью аппроксимирована предложенной формулой (2), включающей два коэффициента, подбираемых по результатам измерений на образцах из металла контролируемого объекта.
4. Достоверность компьютерного моделирования методом конечных элементов процессов при ВТМ дефектоскопии подтверждается сравнением результатов расчета и эксперимента применительно к задаче дефектоскопии труб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dijkstra F.H., de Raad J.A., Bunisch A. Magnetic Flux and SLOFEC Inspection of Thick Walled Components // 15th World Conference on Non-Destructive Testing. – Roma, 2000.
2. Dijkstra F.H., de Raad J.A. NDT: Necessary evil or benefit? // Insight. – 2002. – vol. 44. – № 7. – pp. 446–451.
3. Ключев, С.В. Исследование возможности оценки коррозионного состояния толстостенных ферромагнитных объектов вихретоко–магнитным методом / С.В. Ключев, П.Н. Шкатов // Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – 2010. – № 1. – С. 17–22.
4. Ключев, С.В. Теоретическое исследование электромагнитных процессов при комбинированной вихретоко–магнитной дефектоскопии / С.В. Ключев, П.Н. Шкатов // Контроль, диагностика. – 2010. – № 3. – С. 32–37.
5. Shkatov, P. Combining eddy-current and magnetic methods for the defectoscopy of ferromagnetic materials // Nondestructive Testing and Evaluation. – 2013. – vol. 28. – Issue 2. – pp. 155–165.
6. Пат. 2442151 Российская Федерация, МПК G01N27/90. Способ выявления подповерхностных дефектов в ферромагнитных объектах / Ключев С.В., Шкатов П.Н.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО "Московский государственный университет приборостроения и информатики". № 2010107405/28; заявл. 01.03.2010; опубл. 10.02.2012, Бюл. № 4. – 3 с.
7. Пат. 2493561 Российская Федерация, МПК G01N27/90, G01N27/82. Вихретоково–магнитный способ дефектоскопии ферромагнитных объектов / Шкатов П.Н., Мякушев К.В.; заявитель и патентообладатель ГОУ

ВПО "Московский государственный университет приборостроения и информатики". № 2012118106/28; заявл. 04.05.2012; опубл. 20.09.2013, Бюл. № 26. – 4 с.

8. Sadek, H.M. NDE technologies for the examination of heat exchangers and boiler tubes – principles, advantages and limitations // *Insight*. – vol. 48. – № 3. – March 2006. – pp. 181–183.

9. ГОСТ 19693– 74. Материалы магнитные. Термины и определения. – Москва: Изд– во стандартов, 1986. – 32 с.

10. Преображенский, А.А. Магнитные материалы и элементы / А.А. Преображенский. М.: Высшая школа, 1976. – 336 с.

Шкатов Петр Николаевич

ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет приборостроения и информатики», г. Москва
Доктор технических наук, профессор
Тел. (495) 964–91–50
E– mail: petr_shkatov@mail.ru

Мякушев Константин Викторович

ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет приборостроения и информатики», г. Москва
Кандидат технических наук, докторант
Тел. (495) 964–91–50
E– mail: myakushev.k@yandex.ru

P.N. SHKATOV, K.V. MYAKUSHEV

**MATHEMATICAL DESCRIPTION OF MAGNETIC PROPERTIES
METAL FOR COMPUTER SIMULATION
PROCESSES IN THE VORTEX–CURRENT–MAGNETIC INSPECTION**

The article is devoted to investigation and mathematical description of ferromagnetic material properties causing an eddy–current transducer signal due to simultaneous impact of permanent magnetizing magnetic field and weak electromagnetic field of eddy current transducer in combined electromagnetic nondestructive testing action.

Keywords: eddy current testing, magnetic testing, combined method, the magnetic properties of the metal.

BIBLIOGRAPHY

1. Dijkstra F.H., de Raad J.A., Bunisch A. Magnetic Flux and SLOFEC Inspection of Thick Walled Components // 15th World Conference on Non– Destructive Testing. – Roma. – 2000.

2. Dijkstra F.H., de Raad J.A. NDT: Necessary evil or benefit? // *Insight*. – 2002. – vol. 44. – № 7. – pp. 446–451.

3. Klyuvev, C.V. Issledovanie vozmozhnosti otsenki korrozionnogo sostoyaniya tolstostennykh ferromagnitnykh ob"yektov vikhretoko– magnitnym metodom / C.V. Klyuvev, P.N. Shkatov // *Izvestiya OrelGTU. Seriya «Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii»*. – 2010. – № 1. – S. 17–22.

4. Klyuvev, C.V. Teoreticheskiye issledovanie elektromagnitnykh protsessov pri kombinirovannoy vikhretoko– magnitnoy defektoskopii / C.V. Klyuvev, P.N. Shkatov // *Kontrol', diagnostika*. – 2010. – № 3. – S. 32–37.

5. Shkatov, P. Combining eddy– current and magnetic methods for the defectoscopy of ferromagnetic materials // *Nondestructive Testing and Evaluation*. – 2013. – vol. 28. – Issue 2. – pp. 155–165.

6. Pat. 2442151 Rossiyskaya Federatsiya. MPK G01N27/90. Sposob vvvavleniya podpoverkhnostnykh defektov v ferromagnitnykh ob"yektakh / Klyuvev S.V., Shkatov P.N.; zavavitel' i patentoobladatel' GOU VPO "Moskovskiy gosudarstvennyy universitet priborostroyeniya i informatiki". – № 2010107405/28; zavavl. 01.03.2010; opubl. 10.02.2012, Byul. № 4. – 3 s.

7. Pat. 2493561 Rossiyskaya Federatsiya. MPK G01N27/90, G01N27/82. Vikhretokovo– magnitnyy sposob defektoskopii ferromagnitnykh ob"yektov / Shkatov P.N., Myakushev K.V.; zavavitel' i patentoobladatel' GOU VPO "Moskovskiy gosudarstvennyy universitet priborostroyeniya i informatiki". – № 2012118106/28; zavavl. 04.05.2012; opubl. 20.09.2013, Byul. № 26. – 4 s.

8. Sadek, H.M. NDE technologies for the examination of heat exchangers and boiler tubes – principles, advantages and limitations // *Insight*. – vol. 48. – № 3. – March 2006. – pp. 181–183.

9. ГОСТ 19693– 74. Материалы магнитные. Термины и определения. – Москва: Изд– во стандартов, 1986. – 32 с.

10. Преобразженский, А.А. Магнитные материалы и элементы / А.А. Преобразженский. М.: Vysshaya shkola. – 1976. – 336 с.

Skatov Petr Nikolaevich

Moscow State University of Instrument and Computer Science, Moscow
Doctor of technical Sciences, professor
Tel.: (495) 964–91–50
E– mail: petr_shkatov@mail.ru

Myakushev Konstantin Viktorovich

Moscow State University of Instrument and Computer Science, Moscow
Candidate of technical Sciences, doctoral student
Tel.: (495) 964–91–50
E– mail: myakushev.k@yandex.ru

КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ **И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ**

УДК 004.91

Ю.А. БАКУРОВА, М.А. ЗИБОРОВ

НАУЧНО–ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАБОЧЕГО МЕСТА МЕТРОЛОГА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

В работе освещены основные преимущества использования автоматизированного рабочего места (АРМ) метролога на предприятиях машиностроительного комплекса. Приведена оценка эффективности использования АРМ метролога с подробным анализом специального программного обеспечения предназначенного для автоматизации деятельности метрологической службы машиностроительных предприятий.

***Ключевые слова:** метрологическая служба, поверка и калибровка средств измерений, автоматизированное рабочее место метролога, специальное программное обеспечение.*

Обеспечение и поддержание необходимого уровня качества изделий машиностроения, а также и их конкурентоспособности на рынке, невозможно без систематического мониторинга и контроля входных и выходных параметров технологических процессов, что неизбежно связано с выполнением большого числа измерений. Перед специалистом в области машиностроения встают задачи организации измерительного эксперимента, обработки и представления результатов измерений в соответствии с принципами метрологии и действующими нормативными документами. Метрологическое обеспечение производства, основанное на практическом использовании положений метрологии, является составной частью системы управления качеством одной из основных предпосылок достижения требуемого качества выпускаемых изделий [1].

Чтобы быть конкурентоспособными, вести успешную экономическую деятельность и повышать уровень удовлетворенности потребителей, предприятиям необходимо использовать результативные системы качества. Данные системы, для достижения максимальной эффективности, должны функционировать в тесном взаимодействии со всеми организационными подразделениями, оказывающими влияние на качество продукции [2].

Важнейшим структурным элементом обеспечения качества на предприятии является метрологическая служба – служба, несущая ответственность за метрологическое обеспечение измерений при разработке, изготовлении, испытаниях и эксплуатации продукции и иной деятельности.

Профессия метролога связана с выполнением значительного объема рутинных операций по документированию всех действий, производимых над средствами измерений и их автоматизацией на всех этапах жизненного цикла. В связи с этим, в метрологических службах предприятий необходимо осуществлять внедрение современных методов и средств автоматизации, которые позволят уменьшить трудозатраты и увеличить производительность труда рабочих. Это касается предприятий нефтехимической, бумажной, энергетической, и особенно машиностроительной промышленности.

Научно–технические основы автоматизации метрологической деятельности предприятия в основном ведутся в трех направлениях. Первое направление заключается в разработке методов изучения закономерностей объектов управления, под которыми в данном случае следует понимать средства измерений, их динамики, устойчивости, зависимости поведения от воздействия внешних факторов. Второе направление – выбор экономически целесообразных методов управления, выбор наиболее эффективной зависимости между измеряемыми и

управляющими параметрами измерительного процесса. Эти действия направлены на достижение максимальной производительности процесса, стабилизации высокого качества выпускаемой продукции, наибольшего коэффициента использования топлива, сырья и оборудования, максимального объема реализованной продукции и снижении затрат на единицу изделия и др.

Третье направление заключается в создании инженерных методов наиболее простого, надежного и эффективного воплощения структуры и конструкции средств автоматизации, осуществляющих заданные функции измерения, обработки полученных результатов и управления.

Обеспечение высокого качества изделий связано с автоматизацией контроля на всех основных этапах производства. Субъективные оценки со стороны человека заменяются объективными показателями автоматических измерительных постов, связанных с центральными пунктами, где определяется источник брака и откуда направляются команды для предотвращения отклонений за пределы допусков. Особое значение приобретает автоматический контроль с применением ЭВМ позволяющего вести измерение значительного количества контролируемых параметров. Не менее важны и выпускные испытания готовых изделий. Автоматизированные измерительно-испытательные стенды позволяют быстро и идентично проверять технические и экономические характеристики изделий (продукции). Используемые средства измерений нуждаются в учете, обслуживании, оценки динамики их состояния и т.д. Как было отмечено выше, деятельность метрологической службы предприятия сопряжена с выполнением огромного количества операций, которые на современном этапе развития науки и техники в основном автоматизированы и рынке информационных услуг предлагается довольно большой спектр специального программного обеспечения, позволяющего автоматизировать деятельность метрологической службы предприятия.

Целью данной работы являлось исследование и анализ программных комплексов, предназначенных для автоматизации деятельности метрологической службы предприятия.

Для достижения поставленной цели было необходимо решение следующих задач: исследовать современные программные комплексы автоматизации метрологической службы; выполнить анализ специального программного обеспечения, предназначенного для автоматизации деятельности метрологической службы; выявить проблемы, связанные с использованием средств автоматизации; определить оптимальный программный комплекс автоматизации метрологической службы.

В ходе проведенного исследования современного программного обеспечения, используемого для автоматизации метрологических служб машиностроительных предприятий, выявлено достаточно большое количество программных продуктов, основными из которых являются следующие программные комплексы: АРМ «Метролог», «АРМ Метролога 5.0», АРМ метролога «Дельта-СИ». Ниже указаны достоинства каждой из исследованных программ.

Персональное обеспечение АРМ «Метролог» [3, 4] позволяет осуществлять учет наличия, движения и состояния приборов; планирование любых видов метрологического контроля и ремонта; контроль за проведением метрологического и технического обслуживания; анализ состояния и применения приборного парка; накопление и обработку статистики по метрологическим данным; формирование запросов по состоянию, применению и техническим характеристикам приборного парка; сочетание электронной картотеки паспортов с журнальными формами учета; формирование графиков поверки и калибровки по видам измерений, категориям приборов, производственным подразделениям.

Основные функциональные возможности программного комплекса «АРМ Метролога 5.0»: формирование баз данных по учету наличия, движения и состояния приборов и по учету информации о кадрах метрологического обеспечения; ввод средств измерений из справочника «Наименование и типы средств измерений» потоком; планирование и последующий контроль за проведением метрологического и технического обслуживания средств измерений; ведение большого числа справочников; возможность фильтрации данных; анализ состояния и применения средств измерений, находящихся в эксплуатации; обработка статистических данных по результатам поверок, ремонтам, поломкам, характеристикам приборов; фор-

мирование планов–графиков поверки и калибровки по видам измерений, категориям приборов, подразделениям; автоматизация проведения расчетов средств измерений по категориям, видам, срокам проверки; учет нормативной документации, формирование паспортных данных; возможность импорта данных из MS Excel; возможность экспорта данных в приложения MS Office; автоматизация расчетов объема поверок средств измерений на год, по квартально, по месяцам; быстрый поиск, фильтрация и навигация по базе данных; формирование отчетов различной структуры.

Отличительными чертами АРМ метролога «Дельта–СИ» [5] являются формирование и ведение полной базы данных (БД) средств измерений, средств автоматизации, технологических позиций и систем управления, эксплуатируемых на предприятии; ведение архива всех изменений (истории поверок, истории изменений паспорта, истории движения СИ, истории эксплуатации и ремонтов); автоматическое формирование графиков поверок и планово–предупредительных работ (ППР) согласно информации в БД; учет стоимости поверок и планирование будущих расходов на осуществление поверочной деятельности; информирование исполнителей о поставленных задачах по графикам поверок и ППР; автоматическая подготовка оперативной информации и статистических отчетов различной структуры по различным аспектам функционирования метрологической службы; совместимость с АИС «Метр-контроль»: передача отчетных данных и обновление справочников (функция предназначена для метрологических служб, аккредитованных на право поверки средств измерений); хранение произвольных файлов вместе с паспортами СИ позволяет вести дополнительное информационное сопровождение оборудования; учет стоимости поверок на основании внесения данных о тарифах включает в себя возможность составления отчетов о расходах, а также, планирование расходов на осуществление поверочной деятельности в будущем.

Однако, несмотря на достаточно обширный перечень программных продуктов, предназначенных для автоматизации метрологической деятельности машиностроительных предприятий, предлагаемых на рынке, выполненный анализ показал крайне низкий уровень распространения специального программного обеспечения, а иногда и полное отсутствие средств автоматизации. В некоторых случаях для учета средств измерений, анализа их состояния, создаются базы данных с использованием MS Office. Это отчасти облегчает работу метролога предприятия, но не автоматизирует работу МС. Вместе с тем, использование программных комплексов типа «АРМ Метролог», «Дельта–СИ» позволяет значительно уменьшить затраты времени на организацию деятельности метрологической службы, увеличить производительность труда, вести автоматизированный учет средств измерений, используемых на всех стадиях жизненного цикла продукции, что в конечном итоге обеспечивает повышение качества выпускаемой продукции.

По представленному выше перечню специального программного обеспечения можно отметить, что направление автоматизации метрологической деятельности развивается очень динамично. Развитие и совершенствование программных средств, предназначенных для автоматизации деятельности метрологической службы, в некоторых случаях опережает квалификацию специалистов, призванных использовать их в своей работе.

Одним из главных приоритетов развития в данном случае является тесная интеграция специального программного обеспечения, используемого для автоматизации деятельности метрологической службы предприятия с программами смежных направлений. Суть этого процесса заключается, например, во взаимосвязи между базами данным или использование единой базы данных средств измерений. Такая интеграция позволит автоматизировать в едином информационном пространстве все стадии производства и проектирования новых видов изделий, а также повысить эффективность труда на предприятии. Например, если при проектировании технологического процесса нового изделия использовать базы данных средств измерений, используемых на предприятии, то это позволит не только создать компьютерно–интегрированную среду, но и обеспечит возможность метрологической службе получать объективную информацию о потребности в конкретном виде средств измерений, интенсивности его эксплуатации. Техотделы, в свою очередь, будут получать информацию о состоянии конкретного СИ, общем фонде средств измерений и т.д. Это позволит организовать ра-

боту предприятия на более качественном уровне, снизить потери времени на поиск необходимого СИ, обеспечит стабильность показателей качества выпускаемой продукции, позволит более эффективно использовать средства производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правиков, Ю.М. Метрологическое обеспечение производства: учебное пособие / Ю.М. Правиков, Г.Р. Муслина. - М.: КНОРУС, 2009. – 240 с.
2. Молодой ученый [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.moluch.ru> (дата обращения 25.02.2014).
3. Автоматизированное рабочее место метролога [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.metrob.ru/HTML/ARM/> (дата обращения 6.03.2014).
4. АРМ Метролога (клиент–сервер), версия 5.0 [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://fvn2009.narod.ru/ARMS/ARMM/armm.htm>, (дата обращения 6.03.2014).
5. Специализированная инжиниринговая компания «Дельта–СИ» [Электронный ресурс] Программный комплекс автоматизированного метрологического оборудования Режим доступа: <http://www.szma.com/deltasi.shtml>, (дата обращения 14.03.2014).

Бакурова Юлия Алексеевна

Ливенский филиал Госуниверситета–УНПК г. Ливны
Кандидат технических наук, доцент кафедры технология машиностроения
E–mail: bakurova2@yandex.ru

Зиборов Максим Александрович

Ливенский филиал Госуниверситета – УНПК
Студент 3 курса направления 151900.62 Конструкторско–технологическое обеспечение машиностроительных производств
E–mail: zibormax@mail.ru

Yu.A. BAKUROVA, M.A. ZIBOROV

SCIENTIFIC AND TECHNICAL BASES AND PROSPECTS AUTOMATED WORKPLACES METROLOGY ON ENGINEERING PLANTS

In the work highlights the key benefits of using an automated workplace metrology for machine–building enterprises. An assessment of the effectiveness of the use of automated workplace metrology with a detailed analysis of special software designed to automate the activities of the metrological service engineering enterprises.

Keywords: *the metrological service, checking and calibration of measuring instruments, automated workplace metrology, special software.*

BIBLIOGRAPHY

1. Pravikov, Yu.M. Metrologicheskoye obespecheniye proizvodstva: uchebnoye posobiye / Yu.M. Pravikov, G.R. Muslina. M.: KNORUS, 2009. – 240 s.
2. Molodoy uchenyy [Elektronnyy resurs] Rezhim dostupa: <http://www.moluch.ru> (data obrashcheniya 25.02.2014).
3. Avtomatizirovannoye rabocheye mesto metrologa [Elektronnyy resurs] Rezhim dostupa: <http://www.metrob.ru/HTML/ARM/> (data obrashcheniya 6.03.2014).
4. ARM Metrologa (kliyent–server), versiya 5.0 [Elektronnyy resurs] Rezhim dostupa: <http://fvn2009.narod.ru/ARMS/ARMM/armm.htm>, (data obrashcheniya 6.03.2014).
5. Spetsializirovannaya inzhiniringovaya kompaniya «Del'ta–SI» [Elektronnyy resurs] Programmnyy kompleks avtomatizirovannogo metrologicheskogo oborudovaniya Rezhim dostupa: <http://www.szma.com/deltasi.shtml>, (data obrashcheniya 14.03.2014).

Bakurova Julia Alekseevna

Livensky branch of the State University–UNPK Livny
Ph.D., assistant professor of mechanical engineering technology
E–mail: bakurova2@yandex.ru

Ziborov Maksim Aleksandrovich

Livensky branch of the State University – UNPK
3rd year student of direction 151900.62 Design and technological support for engineering industries
E–mail: zibormax@mail.ru

Е.В. ПЛАХОТНИКОВА

КОМПЛЕКСНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ «ЭЛЕКТРОПРИВОД – ЗАПОРНАЯ АРМАТУРА» НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В статье рассмотрены основные базовые направления обеспечения качества электродинамических систем «электропривод – запорная арматура» на стадии проектирования, ориентированные на повышение конкурентоспособности отечественной продукции, соблюдение системных принципов и согласованной работы производителей запорной арматуры и электроприводов.

Ключевые слова: обеспечение качества, конкурентоспособность, электродинамические системы, электропривод, запорная арматура.

Проблема обеспечения качества систем функционально объединяющих электропривод и запорную арматуру и широко используемых в трубопроводном транспорте, до сих пор остается открытой.

Несмотря на широкое применение электроприводов для управления запорной арматурой, что делает их неотъемлемыми компонентами единой системы (так например, 80% запорной арматуры АЭС является электроприводной), проектирование и обеспечение качества указанных элементов осуществляется абстрагировано друг от друга, что зачастую влияет на эффективность систем и не позволяет обеспечить требуемого качества конечного продукта.

Рассогласованная работа арматуростроительных предприятий и производителей электроприводов приводит к снижению конкурентоспособности отечественной продукции, ограничивает возможности технического совершенствования систем и препятствует реализации приоритетного направления развития РФ – импортозамещение.

Спроецируем сложившуюся ситуацию на известную модель Нориаки Кано (Япония) [1], где автор выделяет три составляющие профиля качества (рисунок 1) определяющих степень удовлетворенности потребителя:

- базовое (основное) качество, соответствующее "обязательным" характеристикам продукции;
- требуемое (ожидаемое) качество, соответствующее "количественным" характеристикам продукции;
- желаемое (опережающее) качество, соответствующее характеристикам продукции, открывающим возможность для прорыва на рынок и опережения конкурентов.

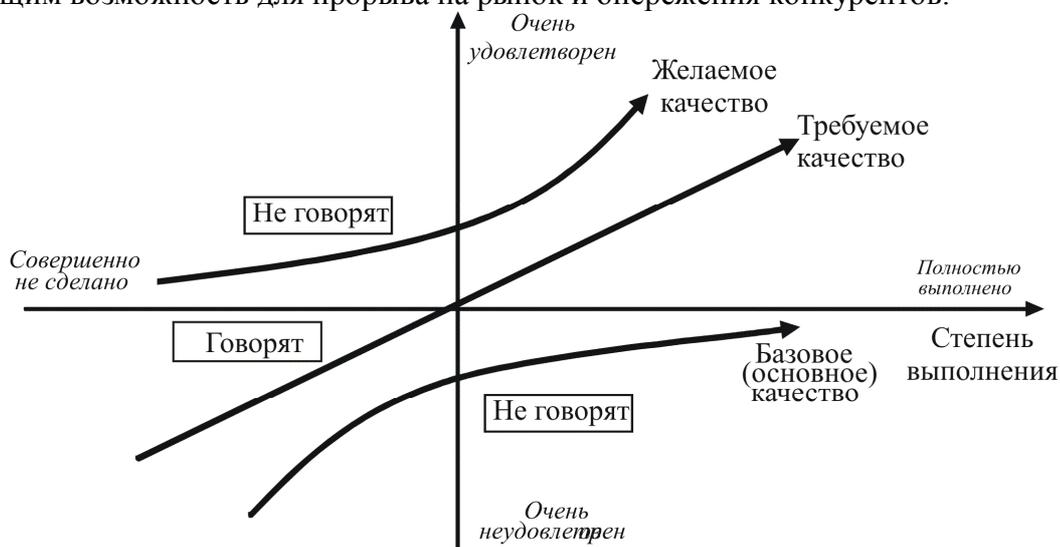


Рисунок 1 – Модель Нориаки Кано (Япония)

В нашем случае, следует отметить, что по частным направлениям и производителям запорной арматуры и производителям электроприводов, не раз удавалось совершить прорыв в области качества и перейти на уровень желаемого качества, представляющего особую ценность для потребителя.

Российские компании регулярно презентуют на рынке новые совершенные конструкции указанных типов, повышая их надежность, быстродействие, улучшая весогабаритные характеристики, используя новые схемы управления и диагностирования. Но совместное применение высокотехнологичных конструкций в рамках единой системы часто ограничивается невозможностью их интеграции.

Введение новых конструктивных и технологических решений направленных на повышение качества одного элемента электродинамической системы приводят к снижению конкурентных качественных характеристик другого, ввиду наличия между ними связи, часто описываемой отрицательной корреляцией.

Так, например, применение высокооборотных электроприводов, существенно уменьшающих время срабатывания систем (положительный шаг в направлении повышения качества), приводит к возникновению повышенных электродинамических нагрузок [2] (отрицательный эффект). Наличие чрезмерных нагрузок автоматически требует увеличения весогабаритных характеристик запорной арматуры, с целью обеспечения ее надежности при эксплуатации.

Увеличение весогабаритных качественных характеристик оказывает влияние на трудоёмкость установки систем на объект эксплуатации, увеличивая эксплуатационные затраты (отрицательный эффект), но что более значимо увеличивают требуемые для управления арматурой крутящие моменты, что приводит к необходимости использования более мощных электроприводов и увеличению стоимости систем в базовой комплектации (отрицательный эффект).

В результате, следует констатировать факт бесконечного движения отечественных разработчиков по замкнутому кругу. И в данном случае мы говорим не о «спирали качества» разработанной Джозефом М. Джураном [3], а именно о кольце, ограничивающем переход от требуемого к желаемому качеству (рисунок 1), а иногда заставляющего застыть на уровне базового качества, не представляющего интереса для потенциальных потребителей продукта.

Проблема обеспечения качества систем «электропривод – запорная арматура» не является новой, но как показывают проведенные исследования [4], может иметь новое более рациональное решение.

Достичь требуемого качества и укрепить позиции отечественных компаний позволит комплексное обеспечение качества систем на стадии проектирования. В данном случае акцент необходимо сделать именно на термин систем, а не отдельных элементов, качество которых не вызывает у автора ни каких сомнений.

Общую структуру обеспечения качества электродинамических систем «электропривод – запорная арматура» можно представить совокупностью четырех базовых направлений и методов их реализации (рисунок 2).

Первым базовым направлением представленной структуры (рисунок 2) является рассмотрение электропривода и запорной арматуры как элементов единой электродинамической системы – основное направление повышения качества.

Работы в данном направлении уже велись и ведутся различными авторами, так например функциональное и структурное описание уже было представлено в работах О.Н. Шпакова [5], А. Н. Гарганеева [6] и т.д. Достигнутые результаты, к сожалению, были направлены авторами на решения частных задач – повышение качества запорной арматуры, введу их специализации в области арматуростроения.

Для решения общей проблемы обеспечения качества систем необходимо их комплексное рассмотрение с учетом системных свойств, проявляющихся при функциональном объединении элементов. Здесь, особенный вес имеет электродинамический крутящий момент системы $M_{эл.дин.}$ [2], значение которого определяет качество конечного продукта и зависит от совокупности характеристик объединяемых в систему элементов: жесткости запорной арматуры, частоты вращения электропривода, времени запаздывания системы управления.

Вторым базовым направлением (рисунок 2) является обеспечение согласованности силовых характеристик системы. Под согласованностью следует понимать обеспечение соответствия фактического крутящего момента фиксируемого при остановке системы номинальному значению, указанному в нормативной документации.



Рисунок 2 – Структура комплексного обеспечения качества электродинамических систем «электропривод – запорная арматура»

Проведенные, в том числе автором, теоретические и экспериментальные исследования [4 – 6] позволяют утверждать, что в большинстве случаев функциональное совмещение высокоскоростных электроприводов с запорной арматурой не позволяют обеспечить требуемые нормированные характеристики, заданные при проектировании систем. Причиной указанного рассогласования является именно электродинамический крутящий момент $M_{эл.дин.}$.

Как показали исследования [4], обеспечить требуемые силовые характеристики возможно уже на стадии проектирования, путем снижения крутящего момента настройки M_n с учетом электродинамического момента системы $M_{эл.дин.}$, что позволяет минимизировать результирующие усилия, использовать в системе менее мощные и более высокоскоростные электроприводы, повышая быстродействие систем и снижая их весогабаритные параметры [4].

Кроме указанного мероприятия необходимым методом повышения качества электродинамических систем является уменьшение разброса силовых характеристик ΔM , путем обеспечения культуры производства, оптимизации параметров технически совмещаемых элементов, соблюдения при проектировании пропорций факторов определяющих погрешность настройки системы [7].

Третье базовое направление (рисунок 2) – обеспечение функциональной совместимости элементов при проектировании систем [8].

Функциональное совмещение электроприводов с запорной арматурой, при существующей системе проектирования, в основу которой заложены традиционные методики статического силового расчета, не учитывающие электродинамический момент системы $M_{эл.дин.}$, приводит к снижению их эффективности и как результат препятствуют повышению конкурентоспособности продукции. Определение рациональных сочетаний элементов с учетом основных технических характеристик влияющих на значение электродинамического момен-

та системы является основным методом реализации указанного направления, являющимся необходимым для достижения требуемого уровня качества продукции.

Четвертым базовым направлением (рисунок 2) повышения надежности и как следствия качества систем является использование демпфирующих элементов снижающих электродинамические нагрузки.

Многообразие электродинамических систем, обусловленное широкой областью их применения (так например, один блок АЭС обслуживает 10 тысяч километров труб различного диаметром от 5 до 1200 мм, со средами давлений от 0,1 до 25 МПа и температурой до 350°C), требует интеграции различных типоразмеров запорной арматуры и электропривода.

Обеспечить согласованность всех систем, путем использования вышеуказанных корректирующих действий не всегда возможно.

С целью минимизации электродинамических нагрузок в частных случаях необходимо использовать дополнительные конструктивные элементы, введение которых требует индивидуального подхода к функциональному описанию систем и решение частных вопросов обеспечения совместимости их элементов.

Использование совокупности четырех перечисленных направлений (рисунок 2), определяющих комплексную модель обеспечения качества систем «электропривод – запорная арматура», позволит гарантировать качество отечественной продукции по двум основным профилям (базовому и требуемому качествам) (рисунок 1), и даст возможность шагнуть на более высокий уровень – желаемое качество, обеспечивающий конкурентное преимущество продукта.

Представленная структура (рисунок 2), являясь базовой, может быть дополнена и детализирована с учетом нужд конкретных потребителей процесса.

В данном случае важным условием является соблюдение комплексного системного подхода, который необходимо реализовывать не только на техническом уровне для обеспечения качества электродинамических систем, но и на уровне согласованной работы двух стратегически важных для России секторов промышленности: предприятий выпускающих электроприводы и арматуростроительных предприятий.

Без применения комплексного подхода и сбалансированного взаимодействия всех заинтересованных в продвижении продукции участников, повысить конкурентоспособность отечественных электродинамических систем «электропривод – запорная арматура» и совершить качественный скачок, с целью импортозамещения западной продукции не представляется возможным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глудкин, О.П. Всеобщее управление качеством: Учебник для вузов / О.П. Глудкин, Н.М. Горбунов, И.И. Гуров, Ю.В. Зорин. М.: Радио и связь, 1999. – 600 с.
2. Плахотникова, Е.В. Повышение эффективности систем «запорная арматура – электропривод» / Е.В. Плахотникова, В.Б. Протасьев // Известия Тульского Государственного Университета. Серия «Технические науки» – Тула: ТулГУ. – 2013. – Вып. 6. – Ч. 1. – С. 142–152.
3. Лapidус, В.А. Всеобщее качество (TQM) в российских компаниях / В.А. Лapidус. М.: Типография Новости, 2000. – 432 с.
4. Плахотникова, Е.В. Повышение качества электродинамических систем «запорная арматура – электропривод» для трубопроводов АЭС с газовым теплоносителем / Е.В. Плахотникова // Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. – 123 с.
5. Шпаков, О.Н. Трубопроводная арматура: справочник специалиста / О.Н. Шпаков // Санкт-Петербург – Москва: КХТ, 2007. – 463 с.
6. Гарганеев, А.Г. Электропривод запорной арматуры / А.Г. Гарганеев, А.С. Каракулов, С.В. Ланграф. Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 157 с.
7. Плахотникова, Е.В. Анализ погрешностей силовых характеристик определяющих качество функционирования систем «электропривод – запорная арматура» / Е.В. Плахотникова, В.Б. Протасьев // Известия Тульского Государственного Университета. Серия «Технические науки». Тула: ТулГУ. – 2014. – Вып. 7. – С.117–124.
8. Плахотникова, Е.В. Повышение качества электродинамических систем «электропривод – запорная арматура» путем обеспечения согласованности и функциональной совместимости их элементов / Е.В. Плахотникова, В.Б. Протасьев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2014. – 1(303). – С. 37–44.

Плаhotникова Елена Владимировна

ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет»

300012, г. Тула, пр. Ленина, 92

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Инструментальные и метрологические системы»

Тел.: 8 (4872) 332538

E-mail: e_plahotnikova@mail.ru

E. V. PLAHOTNIKOVA

COMPLEX ENSURING QUALITY OF ELECTRODYNAMIC SYSTEMS «THE ELECTRIC DRIVE– STOP VALVES» AT THE DESIGN STAGE

The article describes the main directions of basic quality assurance electrodynamic systems "the electric drive – stop valves" at the design stage, focused on improving the competitiveness of domestic products, adherence to the principles of the system and the coordinated work of producers valves and actuators.

Keywords: *quality assurance, competitive, electrodynamic systems, electric drive, armature.*

BIBLIOGRAPHY

1. Gludkin, O.P. Vseobshcheye upravleniye kachestvom: Uchebnik dlya vuzov / O.P. Gludkin, N.M. Gorbunov, I.I. Gurov, Yu.V. Zorin; Pod red. O.P. Gludkina. M.: Radio i svyaz', 1999. – 600 s.
2. Plahotnikova, Ye.V. Povysheniye effektivnosti sistem «zapornaya armatura – elektroprivod»/ Ye.V. Plahotnikova, V.B. Protas'yev // Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki» – Tula: TulGU. – 2013. – Vyp. 6. – Ch 1. – S. 142–152.
3. Lapidus, V.A. Vseobshcheye kachestvo (TQM) v rossiyskikh kompaniyakh / V.A. Lapidus. M.: Tipografiya Novosti, 2000. – 432 s.
4. Plahotnikova, Ye.V. Povysheniye kachestva elektrodinamicheskikh sistem «zapornaya armatura – elektroprivod» dlya truboprovodov AES s gazovym teplonositelem / Ye.V. Plahotnikova // Tula: Izd-vo TulGU, 2014. – 123 s.
5. Shpakov, O.N. Truboprovodnaya armatura: spravochnik spetsialista / O.N. Shpakov // Sankt-Peterburg – Moskva: KKHT, 2007. – 463 s.
6. Garganeyev, A.G. Elektroprivod zapornoj armatury / A.G. Garganeyev, A.S. Karakulov, S.V. Langraf. Tomsk : Izd-vo TPU, 2013. – 157 c.
7. Plahotnikova, Ye.V. Analiz pogreshnostey silovykh kharakteristik opredelyayushchikh kachestvo funkcionirovaniya sistem «elektroprivod – zapornaya armatura» / Ye.V. Plahotnikova, V.B. Protas'yev // Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki». Tula: TulGU. – 2014. – Vyp. 7. – S.117–124.
8. Plahotnikova, Ye.V. Povysheniye kachestva elektrodinamicheskikh sistem «elektroprivod – zapornaya armatura» putem obespecheniya soglasovannosti i funktsional'noy sovместимости ikh elementov / Ye.V. Plahotnikova, V.B. Protas'yev // Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2014. – 1(303). – S. 37–44.

Plahotnikova Elena Vladimirovna

Tula State University,

Russia, Tula, Lenin Avenue, 92

Candidate of technical science, docent of Chair Tool and metrological systems

Tel: 8 (4872) 332538

E-mail: e_plahotnikova@mail.ru

КОНТРОЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ НЕФТЕШЛАМОВЫХ ЛИНЗ НА ОСНОВЕ РЕЗИСТИВНО–АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА

Рассмотрено применение резистивно–акустического метода контроля для раннего обнаружения техногенных проливов на объектах топливно–энергетического комплекса. Показана возможность выделения неоднородностей в геологической среде за счет регистрации общего сопротивления с локализацией участка неоднородности за счет сейсмоакустического воздействия. Исследована зависимость электрических параметров почвы при различной влажности от частоты электрического тока. Описывается практическое применение резистивно–акустического метода для контроля нефтешламowych проливов на объектах.

Ключевые слова: резистивно–акустический метод, техногенный пролив, система мониторинга, обработка данных.

На сегодняшний день важной проблемой, возникающей при эксплуатации объектов топливно–энергетического комплекса (ТЭК), является образование грунтового нефтешлама. Он формируется в результате техногенных проливов и попадания нефтепродуктов в грунт в процессе производственных операций, либо при аварийных ситуациях на объектах ТЭК. В результате одним из серьезных последствий является образование техногенных нефтешламowych линз в приповерхностных слоях грунта, которые могут достигать значительных размеров в случае невнимательного отношения к этой проблеме [1]. В качестве примера можно привести известный случай выявления в грунтовых водах плавающей линзы керосина площадью 2 га на территории склада ГСМ воинской части на севере г. Иваново [2]. А также очаг загрязнения на территории Моздокского аэродрома общей площадью 163 кв. км., состоящий из 5 линз керосина [3] мощностью 0,01–0,6 м.

Основной задачей, возникающей при этом, является раннее обнаружение утечек нефтепродуктов на объектах ТЭК до возникновения необратимого процесса зарождения грунтовых линз и попадания продуктов нефтешлама в системы водоснабжения. Сложность решения данной задачи связана с необходимостью контроля зоны грунта непосредственно под самими сооружениями ТЭК, где и возникают утечки. Это делает практически невозможным использование прямых скважинных методов контроля для раннего обнаружения утечек. Для решения данной задачи актуально применение косвенных геофизических методов контроля, используемых в настоящее время для геоэкологического мониторинга состояния геологической среды в природно–технических системах [4]. Наиболее перспективным направлением является разработка и применение методов, основанных на совместном действии на изучаемую среду сейсмоакустических и электромагнитных полей, таких как сейсмоэлектрические и резистивно–акустические методы контроля [5, 6]. Сущность резистивных методов неразрушающего контроля более подробно изложена в [7].

Целью работы является обоснование применения резистивно–акустического метода контроля для раннего обнаружения техногенных проливов на объектах ТЭК.

Приоритетными задачами, решаемыми при мониторинге процессов образования техногенных линз нефтепродуктов, являются задачи определения контура линзы и оценки объемов нефтепродуктов, а также мониторинг динамики линзы и выделение каналов миграции нефтепродуктов. Основной предпосылкой применения косвенных геофизических методов для контроля техногенных утечек нефтепродуктов является невозможность получения достаточного качественного объема данных путем внешнего осмотра, а также затруднительность проведения эксплуатационного контрольного бурения под объектами. Особенно их применение актуально при необходимости получения начальной информации об техногенных утечках в грунт на объекте ТЭК. Преимуществом геофизических методов является то, что физические изменения структуры грунта, происходящие вследствие пролива, могут быть зафиксированы значительно раньше, чем проявляются визуально [8].

На рисунке 1 приведена классификация косвенных геофизических методов, применяемых при идентификации линз нефтепродуктов.

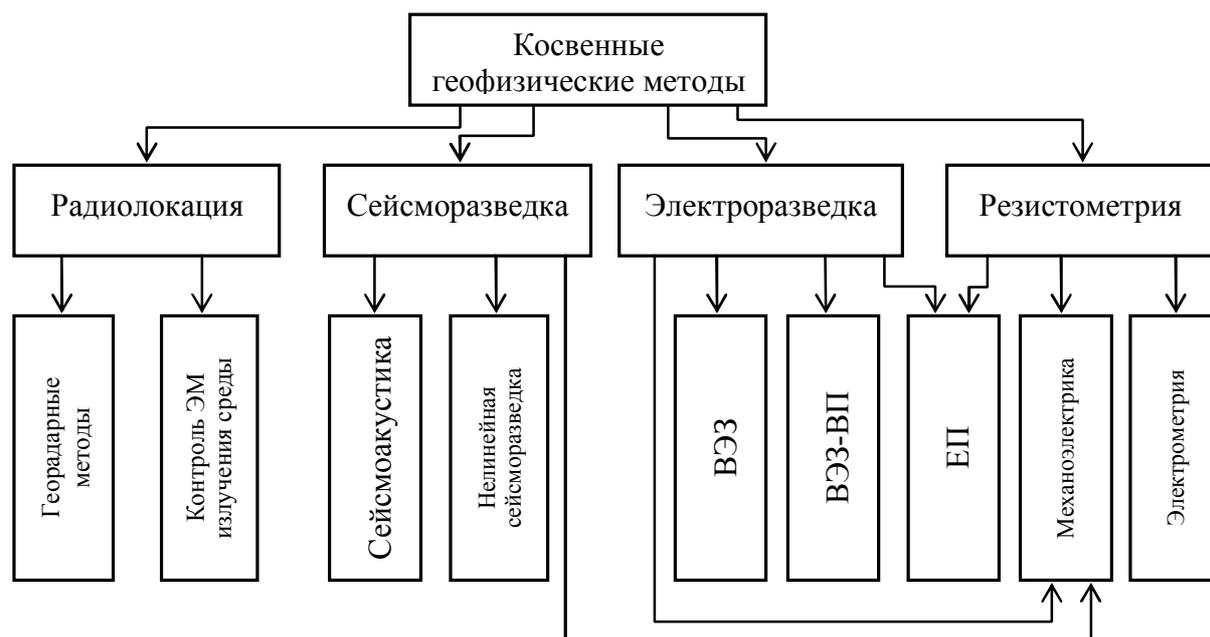


Рисунок 1 – Косвенные геофизические методы контроля техногенных линз нефтепродуктов

При выборе того или другого метода контроля в конкретных условиях, в первую очередь учитывают результаты предварительного визуального обследования зоны предполагаемого пролива и технические условия возможности выполнения геофизических измерений в данном случае. Конечно, при этом также необходимо учитывать достижимую степень информативности применяемого метода и приемлемую величину трудовых и материальных затрат по его применению.

Применение радиолокационных методов основано на отличиях отражающей способности контролируемого слоя грунта при его насыщении нефтепродуктами. Как показали полевые исследования, применение радиолокационных методов (георадаров) позволяет с достаточно высокой степенью обнаруживать техногенные линзы жидких нефтепродуктов, располагаемые до уровня грунтовых вод. Однако глубина контроля при этом незначительная и ограничена десятью метрами [9].

В чистом виде сейсморазведочные и электроразведочные методы не позволяют с достаточной точностью лоцировать границы зоны развития техногенных линз. Обычно тело линзы представлено водной нефтяной эмульсией, которая на фоне сухих пород в геоэлектрическом разрезе соответствуют зонам пониженных удельных сопротивлений. При этом контрастность геоэлектрических аномалий кажущегося сопротивления в линзах, залегающих в слабопроницаемых породах (суглинках) и разрушенных карбонатных породах не превышает 10—20 %, в песках чуть выше. Для повышения чувствительности используют модификации эквипотенциальных электроразведочных методов, позволяющих определить положение и размер линзы по параметру дифференциальной проводимости [10].

Практическая граница между зонами полного и частичного насыщения грунта нефтепродуктами этими методами не фиксируется, что затрудняет их использование при ранней диагностике техногенных проливов на объектах ТЭК. Повысить чувствительность можно за счет применения комбинационных резистивных методов, таких как резистивно-акустический метод, позволяющий проводить томографическое исследование возможных утечек нефтепродуктов под объектами ТЭК.

Резистивно-акустический метод относится к классу механоэлектрических методов контроля, базирующихся на вторичных сейсмических эффектах, пьезоэлектрическом и сейсмоэлектрическом. Он основан на регистрации вариаций силы тока в горных породах при

распространении упругих колебаний и при фиксированной разности потенциалов на исследуемом участке геологической среды (сейсмоэлектрический эффект первого рода).

При этом в качестве информативного параметра используется параметрическая передаточная функция в виде комплексного сопротивления исследуемого участка геологической среды [11]:

$$\dot{H}(j\omega, \Delta u) = \frac{\dot{E}(j\omega)}{\dot{I}(j\omega)} = \dot{Z}_A(j\omega) + \dot{Z}_B(j\omega) + \dot{Z}_0(j\omega) + \sum_{i=1}^n \dot{Z}_i(j\omega, \Delta u), \quad (1)$$

где $\dot{Z}_A(j\omega)$, $\dot{Z}_B(j\omega)$ – сопротивление заземления;

$E(j\omega)$, $I(j\omega)$, $\dot{Z}_0(j\omega)$ – параметры источника электрического поля;

ω – частота зондирующего сигнала;

$\dot{Z}_i(j\omega, \Delta u)$ – сопротивление i -ого элемента исследуемого участка геологической среды, находящегося под сейсмоакустическим воздействием Δu .

Представление передаточной функции (1) исследуемого участка геологической среды в виде геоэлектрической модели последовательно соединенных комплексных сопротивлений позволяет нам воспользоваться моделью N -слойного несовершенного диэлектрика. Приведенная модель содержит N элементов с толщиной слоя d и электрическими параметрами i -ого элемента диэлектрической проницаемостью ϵ_i , удельным электрическим сопротивлением ρ_i . В этом случае передаточная функция исследуемого участка геологической среды может быть представлена в виде последовательно соединенных RC -цепей с параметрами [12]:

$$C_i = \epsilon_i S(j\omega, \Delta u_i) / d(\Delta u_i), \quad R_i = \rho_i d(\Delta u_i) / S(j\omega, \Delta u_i), \quad (2)$$

где $S(j\omega)$ – эффективная площадь элемента среды, определяемая с учетом скин-эффекта.

Передаточная функция геоэлектрического разреза без учета параметров заземления может быть выражена через электрические параметры слоистого несовершенного диэлектрика (2):

$$H(j\omega, \Delta u) = \sum_{i=1}^N \frac{R_i}{1 + x_i^2} - j \sum_{i=1}^N \frac{R_i x_i}{1 + x_i^2}, \quad (3)$$

где $x_i = \omega R_i C_i = \omega \epsilon_i \rho_i$.

Для пространственно стационарной модели, введя параметр $a_i(j\omega) = S(j\omega) / d_i$, характеризующий геометрические размеры i -ого слоя слоистого полупространства с учетом скин-эффекта, уравнение (3) примет окончательный вид:

$$H(j\omega, \Delta u) = \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i / a_i(j\omega)}{1 + x_i^2} - j \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i x_i / a_i(j\omega)}{1 + x_i^2}. \quad (4)$$

При распространении в среде сейсмоакустической волны каждый i -ый элемент находится под механическим воздействием, определяемым деформационным тензором $\Delta u = \{\Delta u_x, \Delta u_y, \Delta u_z\}$. В случае применения одномерной модели ячеек и при наличии неоднородности в среде соотношение (4) примет следующий вид [13]:

$$H(j\omega, \Delta u) = \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i / a_i(j\omega)}{1 + x_i^2} \frac{1 + u_x^i}{1 + u_y^i + u_z^i} - j \sum_{i=1}^N \frac{\rho_i x_i / a_i(j\omega)}{1 + x_i^2} \frac{1 + u_x^i}{1 + u_y^i + u_z^i}. \quad (5)$$

Уравнение (5) показывает возможность резистивно-акустического метода выделять неоднородности в среде за счет регистрации общего сопротивления с локализацией участка неоднородности за счет сейсмоакустического воздействия. Изменяя частоты зондирования можно менять глубину зондирования за счет скин-эффекта. Следует также отметить, что при использовании низкочастотных методов зондирования, со снижением частоты поля возрастает дифференциация электромагнитных свойств почв в зависимости от ее влажности [14]. На рисунке 2 приведены зависимости электрических параметров серой почвы при различной влажности от частоты.

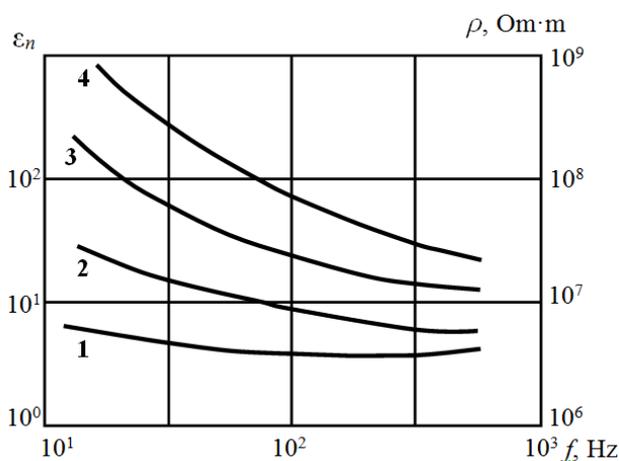


Рисунок 2 – Зависимость электрических параметров почвы от частоты:
Влажность, %: 1 – 0,55; 2 – 1,58; 3 – 2,11; 4 – 3,15

Это факт очень важен для решения поставленной задачи контроля утечек нефтепродуктов и процесса образования нефтешламных линз. Все нефтешламы содержат как твёрдые примеси крупного и мелкого диаметра, так и воду в виде стойкой водной эмульсией, которая на фоне сухих, относительно высокоомных пород имеет пониженное сопротивление [15].

Механоэлектрические методы хорошо зарекомендовали себя в задачах оконтуривания и определения границ горных пород с различными электрическими и механическими свойствами, а также при выделении карстовых нарушений [16]. Разрешающая способность резистивно-акустического метода определяется системой зондирования, а также условием соизмеримости глубины зондирования с размерами искомого объекта. На рисунке 3 приведена схема применения резистивно-акустического метода для контроля нефтешламных проливов на объектах ТЭК.

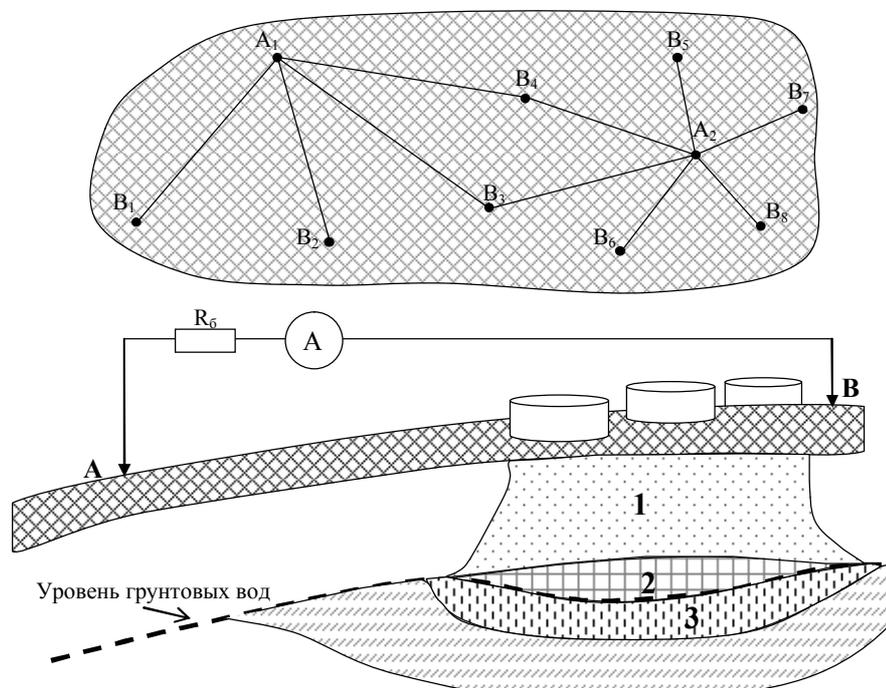


Рисунок 3 – Резистивно-акустический контроль образования техногенных линз нефтепродуктов на объекте ТЭК:

1 – нефтешлам; 2 – линза жидких нефтепродуктов; 3 – зона капильных углеводородов в воде;
4 – зона эмульгированных и растворенных углеводородов

По своей сути применение резистивно-акустического метода аналогично использованию многополюсных электролокационных установок. Они позволяют создать в точке наблюдения эллиптически поляризованное электрическое поле, вследствие того, что источники

территориально разнесены и имеют изначально различные параметры зондирующих сигналов [17]. Следует отметить важное свойство, характерное для многополюсных установок – это возможность балансировки результирующего поля в точке наблюдения, что позволяет размещать установку около объекта контроля утечек. При этом балансировки можно добиться за счет управления зондирующими сигналами с целью задания амплитудно-фазовых соотношений между этими сигналами. Это позволяет устранить влияние искажений мультипликативного типа на фазовые характеристики регистрируемого поля и обеспечить более высокую чувствительность измерительной системы.

Принцип регистрации и обработки геодинамических сигналов при контроле процессов образования нефтешламмовых линз на основе резистивно-акустического метода показан на рисунке 4. Оценка геодинамических вариаций при проливах на объектах ТЭК, как и при геодинамическом контроле приповерхностных неоднородностей, является задачей идентификации геодинамической математической модели в заданном классе объектов по экспериментальным данным. Если применить критерий минимума квадрата ошибки, то оптимальная оценка передаточной функции геологического разреза (5) определится из условия:

$$\mathbf{M}\{[\mathbf{Y}(t) - \mathbf{H}^* \mathbf{X}(t)]^2\} = \min, \quad (6)$$

где $\mathbf{X}(t)$ – входное акустическое зондирующее воздействие на геологический разрез;
 $\mathbf{Y}(t)$ – регистрируемый сигнал в контрольной точке;
 \mathbf{H}^* – оцениваемый оператор объекта; $\xi(t)$ – помехи каналов измерений.

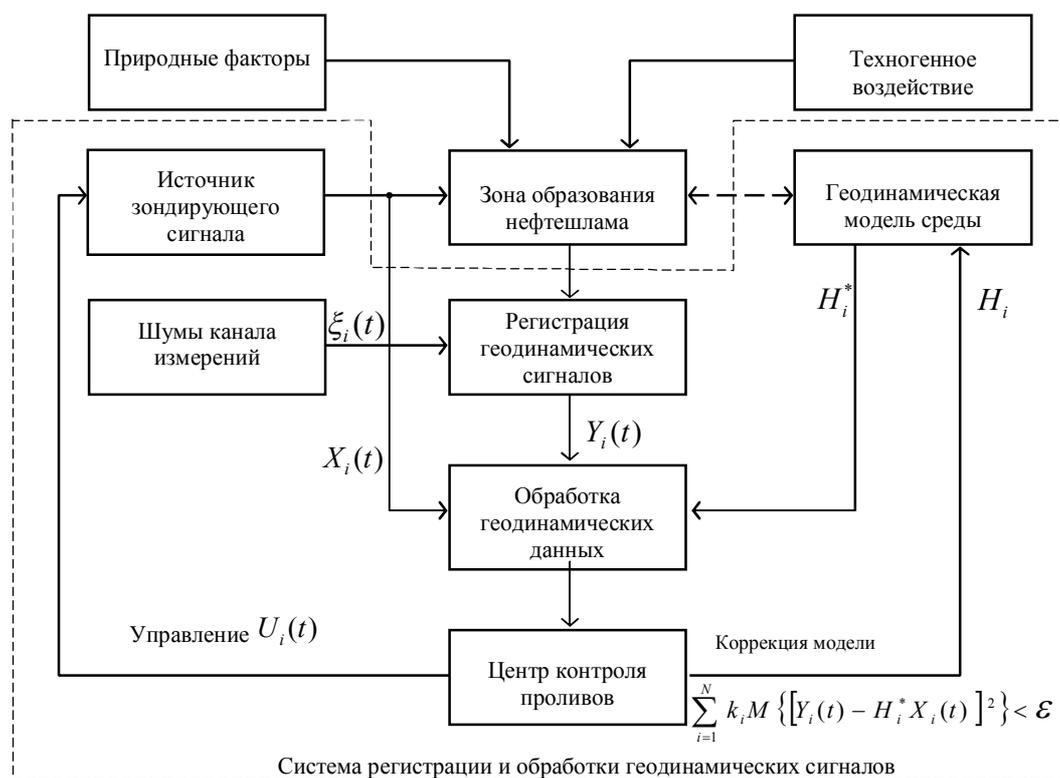


Рисунок 4 – Регистрация и обработка геодинамических сигналов при резистивно-акустическом контроле техногенных проливов

При применении резистивно-акустического метода контроля с использованием многополюсных источников можно оптимизировать систему за счет управления источниками и более точной детализации моделей. Если используются совместно несколько источников, то алгоритмы оптимизации и выбора модели определяются из соотношения (6):

$$\sum_{i=1}^N k_i \mathbf{M}\{[Y_i(t) - \mathbf{H}_i^* X_i(t)]^2\} \leq \varepsilon, \quad (7)$$

где k_i – весовой коэффициент по i -му источнику.

При применении резистивно-акустического метода контроля геологический разрез может быть описан пространственно-временной передаточной функцией:

$$L_y[Y(x, y, z, t)] = L_x[X(x, y, z, t)], \quad (8)$$

где x, y, z – пространственные координаты;

L_x и L_y – функциональные операторы, которые характеризуют передаточную функцию геологического разреза.

Входом геоэлектрического разреза являются пространственные координаты источника поля. Выходом являются пространственные координаты датчика поля.

Исходя из принципа стационарности и линейности геоэлектрического разреза (8), можно записать операторную передаточную функцию геоэлектрического разреза в случае одновременного действия нескольких зондирующих сигналов:

$$H(x, y, z, p) = \sum_{i=1} [\frac{Y_i(x, y, z, p)}{X_i(x, y, z, p)}] \quad (9)$$

где X_i, Y_i – зондирующий сигнал и отклик i -го источника.

Соотношение (9) определяет один из важнейших аспектов организации мониторинга изменений в среде – это возможность выделения свойств отдельной части среды за счет управления параметрами источников [18]. Регистрируемые электромагнитные сигналы могут быть выражены через систему пространственных функций объекта исследования $\Psi_{ij}(p, \alpha_1^0, \dots, \alpha_m^0)$, при условии начальной балансировки измерительной системы и незначительных изменений в среде:

$$Y(p, \alpha_1, \dots, \alpha_m) = \sum_{i=1}^n \Delta H_i(x, y, z, p) = K(p) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [\frac{\partial \Psi_{ij}(p, \alpha_1^0, \dots, \alpha_m^0)}{\partial \alpha_j} \Delta \alpha_j], \quad (10)$$

где $\Delta \alpha_i$ – вектор геодинамических изменений в среде при проливе.

При этом регистрируемое электромагнитное поле можно разделить на первичное и вторичное. При мониторинге, исходя из (9), первичное поле – это регистрируемое поле источников при номинальном значении вектора α_i^0 , которое компенсируется за счет управления зондирующими сигналами электролокационной установки. Вторичное поле – это поле аномальных источников, определяющих геодинамические изменения в среде (аномальная составляющая электромагнитного поля). Первичное и вторичное электромагнитные поля являются векторными величинами, что позволяет проводить пространственную векторную информационную обработку регистрируемых электромагнитных данных и значительно упростить интерпретацию результатов контроля процесса образования нефтешламных линз [19].

Проведенные полевые работы показали, что глубинность предложенного метода определяется рядом факторов: градиентом механоэлектрических свойств границ зоны пролива, мощностью источника сейсмоакустического воздействия, затуханием упругих и электромагнитных волн, а также чувствительностью приемной аппаратуры. При выполнении опытных работ было установлено, что сейсмоакустическое воздействие при проведении геофизических работ резистивно-акустическим методом должно обеспечиваться в пределах от 0,1 до 1,0 кг [20]. На основании моделирования получено, что предельная глубина локализации мест пролива изменяется от 5 м для сланцевых пород и до 100 м для кварцевых пород. При применении специальных мер для подавления помех и повышения отношения сигнал/шум можно обеспечить глубинность метода до 10 м для сланцевых пород до 300 м для кварцевых пород. Полученная расчетная глубинность метода достаточно хорошо согласуется с результатами экспериментальных работ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13–05–97506.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хаустов, А.П. Чрезвычайные ситуации и профессиональная безопасность в нефтегазовом комплексе / А.П. Хаустов. – М.: ГЕОС, 2009.
2. Хаустов, А.П. Ресурсология и менеджмент природных ресурсов / А.П. Хаустов, М.М. Редина. – М.: РУДН, 2008.
3. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды и природных ресурсов РСО–Алания в 2005 году. – Владикавказ, 2006.

4. Константинов, И.С. Организация систем автоматизированного электромагнитного контроля геодинамических объектов / И.С. Константинов, О.Р. Кузичкин // Информационные системы и технологии. – 2008. – № 4. – С. 13–16.
5. Kamshilin A.N., Volkova E.N., Kuzichkin O.R., Sokolnikov M.A. Soft-oscillations in rocks, results of Laboratory experiments // Annals of geophysics. – 2004. – vol. 47. – № 1. – pp. 93–99.
6. Bykov A.A., Kuzichkin O.R. Seismoelectric Control of Geodynamic Processes in Natural–Technical Systems // Proceedings of the 2013 IEEE 7–th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS) IDAACS'2013. – September 12–14, 2013. – Berlin, Germany. – vol. 2. – pp. 840–843.
7. Неразрушающий контроль. Вавилов В.П., Подмастерьев К.В., Соснин Ф.Р., Корндорф С.Ф., Ногачева Т.И., Пахолкин Е.В., Бондарева Л.А., Мужичкий В.Ф. Справочник в 8 томах / Под общей редакцией В.В. Клюева. Москва, 2006. Том 5 Книга 1. Тепловой контроль. Книга 2. Электрический контроль (2-е издание, исправленное).
8. Хаустов, А.П. Экологическое проектирование и риск-анализ / А.П. Хаустов, М.М. Редина, П.Ю. Силаева. – М.: РУДН, 2008.
9. Shaw M.R., Millard S.G., Molyneaux T.C.K., Taylor M.J., Bungey J.H. Location of steel reinforcement in concrete using ground penetrating radar and neural networks // NDT & E International. – 2005. – vol. 38. – Issue 3. – pp. 203–212.
10. Кузичкин, О.Р. Организация системы геоэлектрического мониторинга карста на основе эквипотенциальных электроразведочных методов / О.Р. Кузичкин, А.Н. Камшилин, Н.Е. Калинин // Приборы и системы. Управление, контроль и диагностика. – 2007. – № 12. – С. 48–53.
11. Bykov A.A., Kuzichkin O.R. Regression Prediction Algorithm Of Suffusion Processes Development During Geoelectric Monitoring // Advances in Environmental Biology. – 2014 – № 8(5). – pp. 1404–1408.
12. Kuzichkin O., Chaykovskay N. Spectral processing of the spatial data at geoelectrical monitoring // IEEE ICMT 2011, Hangzhou, China, pp. 765–768.
13. Быков, А.А. Геодинамический контроль раздела двух сред на основе сейсмоэлектрического эффекта / А.А. Быков, О.Р. Кузичкин // Южно-Сибирский научный вестник. – 2013. – № 2. – С. 61–63. – URL: http://sibsbsb.ru/images/articles/2013/2/14_61-63.pdf.
14. Талалов, А.Д. О структурном механизме частотной дисперсии электрических свойств гетерогенных горных пород / А.Д. Талалов, Д.С. Даев // Физика Земли. – 1996. – № 8. – С. 56–66.
15. Хмелевский, В.К. Электроразведка методом сопротивлений / В.К. Хмелевский, В.А. Шевнин. – М.: Изд-во МГУ, 1994.
16. Bykov A.A., Kuzichkin O.R. Application of seismoelectric method for inspection conductive media // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – vol. 490–491. pp. 1712–1716.
17. Kuzichkin O., Sharapov R. The polarizing characteristics of electrolocation signals and their analysis in geomonitoring system // 13 International multidisciplinary scientific Geoconference SGEM2013. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. – Conference proceedings. – 16–22 June 2013, Albena, Bulgaria. – vol. 2, 2013. – pp. 913–918.
18. Кузичкин, О.Р. Алгоритмы обработки данных в многополюсных электролокационных системах / О.Р. Кузичкин // Радиотехника. – 2007. – № 6. – С. 34–37.
19. Sharapov R., Kuzichkin O. Geodynamic Monitoring in Area of Nuclear Power Plant // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – vol. 492. – pp. 556–560.
20. Быков, А.А. Применение сейсмоэлектрического метода при геодинамическом контроле в природно-технических системах / А.А. Быков, О.Р. Кузичкин // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2013. – № 2(16). – С. 22–28.

Еременко Владимир Тарасович
 ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», г. Орёл
 Зав. кафедрой «Электроника, вычислительная техника и информационная безопасность»
 Доктор технических наук, профессор
 E-mail: Wladimir@orel.ru

Кузичкин Олег Рудольфович
 Муромский институт (филиал) ГОУ ВПО «Владимирский государственный университет», г. Муром
 Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Управление и контроль в технических системах»
 E-mail: electron@mivlgu.ru

Быков Артем Александрович
 Муромский институт (филиал) ГОУ ВПО «Владимирский государственный университет», г. Муром
 Кандидат технических наук, Доцент, Доцент кафедры САПР
 E-mail: bykov_a_a@list.ru

V.T. EREMENKO, O.R. KUZICHKIN, A.A. BYKOV

CONTROL OF TECHNOLOGICAL EDUCATION OIL SLUDGE LENSES BASED ON RESISTIVE-ACOUSTIC METHODS

Application a resistance-acoustic method of monitoring for early detection technical passages on objects of a fuel and energy complex is considered. The opportunity of allocation in the geological environment is shown due to registration of the general resistance with localization of a site of heterogeneity due to seismoacoustic influence. Dependence of electric parameters of ground is investigated at various humidity from frequency of an electric current. Practical application of a resistance-acoustic method for the control passages on objects is described.

Keywords: resistance-acoustic method, technical passages, system of monitoring, data processing.

BIBLIOGRAPHY

1. Khaustov, A.P. Chrezvychaynyye situatsii i professional'naya bezopasnost' v neftegazovom komplekse / A.P. Khaustov. – M.: GEOS, 2009.
2. Khaustov, A.P. Resursologiya i menezhment prirodnnykh resursov / A.P. Khaustov, M.M. Redina. – M.: RUDN, 2008.
3. Gosudarstvennyy doklad o sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy i prirodnnykh resursov RSO–Alaniya v 2005 godu. – Vladikavkaz, 2006.
4. Konstantinov, I.S. Organizatsiya sistem avtomatizirovannogo elektromagnitnogo kontrolya geodinamicheskikh ob'ektov / I.S. Konstantinov, O.R. Kuzichkin // Informatsionnyye sistemy i tekhnologii. – 2008. – № 4. – S. 13–16.
5. Kamshilin A.N., Volkova Ye.N., Kuzichkin O.R., Sokolnikov M.A. Soft-oscillations in rocks, results of Laboratory experiments // Annals of geophysics. – 2004. – vol. 47. – № 1. – pp. 93–99.
6. Bykov A.A., Kuzichkin O.R. Seismoelectric Control of Geodynamic Processes in Natural–Technical Systems // Proceedings of the 2013 IEEE 7–th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS) IDAACS'2013. – September 12–14, 2013. – Berlin, Germany. – vol. 2. – pp. 840–843.
7. Nerazrushayushchiy kontrol'. Vavilov V.P., Podmaster'yev K.V., Sosnin F.R., Korndorf S.F., Nogacheva T.I., Pakholkin Ye.V., Bondareva L.A., Muzhitskiy V.F. Spravochnik v 8 tomakh / Pod obshchey redaktsiyey V.V. Klyuyeva. Moskva, 2006. Tom 5 Kniga 1. Teplovoy kontrol'. Kniga 2. Elektricheskiy kontrol' (2-ye izdaniye, ispravlennoye).
8. Khaustov, A.P. Ekologicheskoye proyektirovaniye i risk–analiz / A.P. Khaustov, M.M. Redina, P.Yu. Si layeva. – M.: RUDN, 2008.
9. Shaw M.R., Millard S.G., Molyneaux T.C.K., Taylor M.J., Bungey J.H. Location of steel reinforcement in concrete using ground penetrating radar and neural networks // NDT & E International. – 2005. – vol. 38. – Issue 3. – pp. 203–212.
10. Kuzichkin, O.R. Organizatsiya sistemy geoelektricheskogo monitoringa karsta na osnove ekvipotentsi al'nykh elektrorazvedochnnykh metodov / O.R. Kuzichkin, A.N. Kamshilin, N.Ye. Kalinkina // Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol' i diagnostika. – 2007. – № 12. – S. 48–53.
11. Bykov A.A., Kuzichkin O.R. Regression Prediction Algorithm Of Suffusion Processes Development During Geoelectric Monitoring // Advances in Environmental Biology. – 2014 – № 8(5). – pp. 1404–1408.
12. Kuzichkin O., Chaykovskaya N. Spectral processing of the spatial data at geoelectrical monitoring // IEEE ICMT 2011, Hangzhou, China, pp. 765–768.
13. Bykov, A.A. Geodinamicheskii kontrol' razdela dvukh sred na osnove seismoelektricheskogo effek ta / A.A. Bykov, O.R. Kuzichkin // Yuzhno–Sibirskiy nauchnyy vestnik. – 2013. – № 2. – S. 61–63. – URL: http://sibsib.ru/images/articles/2013/2/14_61-63.pdf.
14. Talalov, A.D. O strukturnom mekhanizme chastotnoy dispersii elektricheskikh svoystv geterogennykh gornyykh porod / A.D. Talalov, D.S. Dayev // Fizika Zemli. – 1996. – № 8. – S. 56–66.
15. Khmelevskiy, V.K. Elektrorazvedka metodom soprotivleniy / V.K. Khmelevskiy, V.A. Shevnin. – M.: Izdvo MGU, 1994.
16. Bykov A.A., Kuzichkin O.R. Application of seismoelectric method for inspection conductive media // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – vol. 490–491. pp. 1712–1716.
17. Kuzichkin O., Sharapov R. The polarizing characteristics of electrolocation signals and their analysis in geomonitoring system // 13 International multidisciplinary scientific Geoconference SGEM2013. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. – Conference proceedings. – 16–22 June 2013, Albena, Bulgaria. – vol. 2, 2013. – pp. 913–918.
18. Kuzichkin, O.R. Algoritmy obrabotki dannykh v mnogopolyusnykh elektrolokatsionnykh sistemakh / O.R. Kuzichkin // Radiotekhnika. – 2007. – № 6. – S. 34–37.
19. Sharapov R., Kuzichkin O. Geodynamic Monitoring in Area of Nuclear Power Plant // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – vol. 492. – pp. 556–560.
20. Bykov, A.A. Primeneniye seismoelektricheskogo metoda pri geodinamicheskom kontrole v prirodno–tekhnicheskikh sistemakh / A.A. Bykov, O.R. Kuzichkin // Mashinostroyeniye i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. – 2013. – № 2(16). – S. 22–28.

Eremenko Vladimir Tarasovich

VPO "State University-UNPK" Orel
Head. the chair "Electronics, you-computer technology and information security"
Doctor of Technical Sciences, Professor
E-mail: Wladimir@orel.ru

Kuzichkin Oleg Rudolfovich

Murom Institute (branch) GOU VPO
"Vladimir State University," Murom
Ph.D., Professor, Department "Management and controll in technical systems"
E-mail: electron@mivlgu.ru

Bykov Artem Aleksandrovich

Murom Institute (branch) GOU VPO
"Vladimir State University," Murom
Ph.D., Assistant Professor, Associate Professor of CAD
E-mail: bykov_a_a@list.ru

Уважаемые авторы!
Просим Вас ознакомиться с основными требованиями
к оформлению научных статей

- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста на листах формата А4 и содержит от 3 до 7 страниц; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.
- Статья предоставляется в 1 экземпляре на бумажном носителе и в электронном виде (по электронной почте или на любом электронном носителе).
- В одном сборнике может быть опубликована только **одна** статья **одного** автора, включая соавторство.
- Статьи должны быть набраны шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ - 1,25 см, правое поле - 2 см, левое поле - 2 см, поля внизу и вверху - 2 см.
- К статье прилагается аннотация и перечень ключевых слов.
- Сведения об авторах приводятся в такой последовательности: Фамилия, имя, отчество; учреждение или организация, ученая степень, ученое звание, должность, адрес, телефон, электронная почта.
- Название статьи, фамилии и инициалы авторов, аннотация, ключевые слова и сведения об авторах обязательно дублируются на английском языке за статьей.
- В тексте статьи желательно:
 - не применять обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
 - не применять для одного и того же понятия различные научно-технические термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
 - не применять произвольные словообразования;
 - не применять сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими государственными стандартами.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.
- **Формулы** следует набирать в редакторе формул Microsoft Equation 3.0. **Формулы**, внедренные как изображение, не допускаются!
- **Рисунки** и другие иллюстрации (чертежи, графики, схемы, диаграммы, фотографии) следует располагать непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые.
- Подписи к рисункам (полужирный шрифт курсивного начертания 10 pt) выравниваются по центру страницы, в конце подписи точка не ставится:

Рисунок 1 - Текст подписи

С полной версией требований к оформлению научных статей Вы можете ознакомиться на сайте www.gu-unpk.ru.

Плата с аспирантов за опубликование статей не взимается.

Право использования произведений предоставлено авторами на основании п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации.

Адрес учредителя:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 42-00-24
Факс (4862) 41-66-84
www.gu-unpk.ru
E-mail: unpk@ostu.ru

Адрес редакции:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
(4862) 41-98-48, 41-98-03, 55-55-24, +7(906)6639898

www.gu-unpk.ru
E-mail: tiostu@mail.ru

Материалы статей печатаются в авторской редакции

Право использования произведений предоставлено авторами на основании
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор Тюхта А.В.
Компьютерная верстка Тюхта А.В.

Подписано в печать 10.12.2014 г.
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 10.
Тираж 600 экз.
Заказ №143/14П2

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе
ФГБОУ ВПО «Государственный университет - УНПК»
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.