

**Редакционный совет:**

**Голенков В.А.** д-р техн. наук, проф., председатель  
**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 Л.В.** д-р экон. наук, проф.  
**Степанов Ю.С.** д-р техн. наук, проф.

**Редколлегия**

**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.  
**Киричек А.В.** д-р техн. наук, проф.  
**Подмастерьев К.В.** д-р техн. наук, проф.

**Члены редколлегии:**

**Бабичев А.П.** д-р техн. наук, проф.  
**Вдовин С.И.** д-р техн. наук, проф.  
**Дмитриев А.М.** д-р техн. наук, проф., член-кор. РАН  
**Емельянов С.Г.** д-р техн. наук, проф.  
**Зубарев Ю.М.** д-р техн. наук, проф.  
**Зубчанинов В.Г.** д-р физ.-мат. наук, проф.  
**Иванов Б.Р.** д-р техн. наук, проф.  
**Колесников К.С.** д-р техн. наук, проф., академик РАН  
**Копылов Ю.Р.** д-р техн. наук, проф.  
**Малинин В.Г.** д-р физ.-мат. наук, проф.  
**Мулюкин О.П.** д-р техн. наук, проф.  
**Осадчий В.Я.** д-р техн. наук, проф.  
**Панин В.Е.** д-р техн. наук, проф., академик РАН  
**Распопов В.Я.** д-р техн. наук, проф.  
**Смоленцев В.П.** д-р техн. наук, проф.

**Ответственный за выпуск:**

**Василенко Ю.В.** канд. техн. наук, доц.

**Адрес редакции**

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
(4862) 41-98-48, 41-98-03, 55-55-24,  
55-05-81

www.gu-unpk.ru

E-mail: met\_lit@ostu.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, 2013

## Содержание

### Естественные науки

<i>Миловидова О.А., Сергеев В.О., Соколов А.А.</i> Теплопроводность и термоздс материала, состоящего из шарообразных наночастиц.....	3
<i>Мулюкин О.П., Борзенков М.И., Брума Е.В., Григорьева О.Ю., Дудин М.П.</i> Классифицирование деструктивных факторов, причин и последствий их проявления в уплотнительных соединениях клапанной пневмогидроарматуры.....	10
<i>Спиридонов М.В., Савин Л.А., Майоров С.В., Стручков А.А.</i> Динамические характеристики упорных совмещенных подшипниковых узлов гидростатического типа.....	14

### Моделирование технологических процессов

<i>Кравцов А.С., Черепенько А.А.</i> Технологическое обеспечение надежности сборочных узлов с учетом эксплуатационных изменений в процессе работы.....	18
<i>Лобанов И.Е., Антохов И.В.</i> Современные проблемы интенсификации теплообмена в каналах с помощью периодически поверхностно-расположенных турбулизаторов потока прямоугольного поперечного сечения.....	22
<i>Просекова А.В., Родичев А.Ю., Савин Л.А., Филатов А.Н., Павликов П.В.</i> Моделирование процесса центробежно-инерционного накатывания под нанесение антифрикционного покрытия биметаллических подшипников скольжения.....	28
<i>Сергиев А.П., Проскурин А.А.</i> Минимизация высоты заусенцев при использовании эффекта Баушингера.....	35

### Конструирование, расчеты, материалы

<i>Бекташов Д.А., Крапостин А.А.</i> Нанесение наноструктурированных покрытий с целью повышения показателей надежности минералокерамического режущего инструмента.....	40
<i>Бородина М.Б., Савин Л.А., Булавин К.А.</i> Динамика работы гидромеханической муфты с управляемым параметром.....	44
<i>Гречухин А.Н., Разумов М.С., Чевычелов С.А.</i> Экспериментальное определение минимального значения заднего угла инструмента при обработке профильной части пружин железнодородного транспорта посредством планетарного механизма.....	50
<i>Максименко Ю.А., Куц В.В.</i> Методика расчета геометрических параметров остаточных слоев фрезой дисковой с переменным радиусом при обработке РК-профильных валов.....	55
<i>Овчинников Е.В.</i> Наноструктурированные фторсодержащие покрытия.....	60
<i>Селихов А.В., Варгашикин В.Я., Мишин В.В., Тулин С.Н.</i> Анализ особенностей технического диагностирования подшипниковых опор качения по характеру статистического распределения значений их электрического сопротивления.....	68
<i>Симаков А.А., Василенко Ю.В., Бурнашов М.А.</i> Анализ форм колебаний возмущающей силы при плоском виброшлифовании.....	76

### Машиностроительные технологии и инструменты

<i>Александров А.А., Барсуков Г.В., Фроленков К.Ю.</i> Разработка технологии модификации вторичных техногенных абразивных материалов для гидроабразивного резания.....	82
<i>Герова С.В.</i> Методы восстановления поврежденных ответственных деталей энергетического оборудования магистральных газопроводов.....	91
<i>Дорохов Д.О., Кисловский А.А.</i> Перспективы применения комплексного локального деформирования к изготовлению биметаллических подшипников.....	99
<i>Иноземцев В.Е., Мо Хаинг У.</i> Повышение эффективности чистовой обработки труднообрабатываемых сплавов.....	103
<i>Зуйкин Р.А., Афонин А.Н.</i> Влияние конструктивных и технологических параметров режуще-деформирующей обработки трансцендентных резьб на эквивалентные деформации и силы деформирования.....	108
<i>Карасёва А.С.</i> Повышение износостойкости поверхностей трения скольжения деталей машин на основе современных триботехнологий.....	115
<i>Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Тарасов Д.Е.</i> Устройства для реализации упрочнения волной деформации сложнопольных поверхностей.....	120
<i>Овсяникова И.В., Тарапанов А.С.</i> Технологические возможности и перспективы электроэрозионной обработки деталей.....	129
<i>Харламов Г.А., Канатников Н.В., Канатников А.В.</i> Зубострогальные резцы с дифференцированными схемами резания.....	136

### Контроль, диагностика, испытания и управление качеством

<i>Бакурова Ю.А., Подмастерьев К.В.</i> Исследование значений термозлектрической способности (ТЭС) кромок режущего инструмента с различной степенью износа.....	141
<i>Бернат С.В., Марков В.В.</i> Применение результатов эксплуатационных испытаний для оптимизации конструкций полупроводниковых осветительных ламп.....	146
<i>Евсикова Д.А.</i> Автоматизация расчёта погрешности базирования и конструирования установочных элементов при синтезе станочных приспособлений с применением интегрированных САПР.....	151
<i>Крюков Д.Н., Ивахненко А.Г., Аникеева О.В.</i> Стандартизация параметров геометрической точности агрегатных станков.....	156



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

**№ 3 - 2 (299) 2013**  
May - June

# Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology

The founder – federal state educational institution of the higher vocational training  
«State University – Educational-Science-Production Complex»  
(State University ESPC)

Editorial council:

**Golenkov V.A.** Doc. Sc. Tech., Prof.,  
president  
**Radchenko S.Y.** Doc. Sc. Tech., Prof.,  
vice-president  
**Borzenkov M.I.** Candidat Sc. Tech.,  
Assistant Prof., secretary  
**Astafichev P.A.** Doc. Sc. Low., 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.  
**Kirichek A.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Podmasteryev K.V.** Doc. Sc. Tech.,  
Prof.

Member of editorial board

**Babichev A.P.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Vdovin S.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Dmitriev A.M.** Doc. Sc. Tech., Prof.,  
Corresponding Member of RAS  
**Emelyanov S.G.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Zubarev Y.M.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Subchaninov V.G.** Doc. Sc. Ph. - Math, Prof.  
**Ivanov B.R.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Kolesnikov K.S.** Doc. Sc. Tech.,  
Prof., Academician of RAS

**Kopylov Y.R.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Malinin V.G.** Doc. Sc. Ph. - Math, Prof.  
**Mulyukin O.P.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Osadchy V.Ya.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Panin V.E.** Doc. Sc. Tech., Prof.,  
Academician of RAS  
**Raspopov V.Ya.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Smolenzev V.P.** Doc. Sc. Tech., Prof.

Responsible for edition:

**Vasilenko YU.V.** Can. Sc. Tech.,  
assistant prof.

Address

302020 Orel,  
Naugorskoye Chossee, 29  
(4862) 41-98-48, 41-98-03, 55-55-24,  
43-48-90  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: met\_lit@ostu.ru

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

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

© State University ESPC, 2013

## Contents

### Natural sciences

<i>Milovidova O.A., Sergeev V.O., Sokolov A.A.</i> Thermal conductivity and thermoelectric material consisted of a ball-shaped nanoparticles.....	3
<i>Malyukin O.P., Borzenkov M.I., Bryma E.V., Grigor'ieva O.YU., Dydin M.P.</i> Classification destructive factors, causes and consequences of their manifestation in the seal a flap hydro pneumatic valves.....	10
<i>Spiridonov M.V., Savin L.A., Mairov S.V., Strychkov A.A.</i> The dynamic characteristics of combined bearing supports hydro static type.....	14

### Modelling of technological processes

<i>Kravcov A.S., Cherepenko A.A.</i> Technology to ensure reliability of assemblies with operational changes in the process.....	18
<i>Lobanov I.E., Antyukhov I.V.</i> The modern problems of intensification of heat transfer in channel with the turbulators rectangular cross-section.....	22
<i>Prosekova A.V., Rodichev A.Y., Savin L.A., Filatov A.N., Pavlikov P.V.</i> Modeling of centrifugal inertia rolling for antifriction coating applying of bimetal sliding bearings.....	28
<i>Sergiev A.P., Proskurin A.A.</i> A minimization of a burrs height using the bauschinger's effect.....	35

### Designing, calculations, materials

<i>Bektasov D.A., Krapostin A.A.</i> Nanostructured coatings application to improve reliability indices mineralokeramicheskogo cutting tool.....	40
<i>Borodina M.B., Savin L.A., Bulavin K.A.</i> Dynamics of hydromechanical coupling whith controlled parameters.....	44
<i>Grechykhin A.N., Razumov M.S., Chevychelov S.A.</i> Experimental determine the minimum clearance angle tool for handling of shaped springs railway through planetary mechanism.....	50
<i>Maksimenco Y.A., Kuts V.V.</i> Calculation of geometric parameters of residual layer cutters with variable radius at processing RK-profile shaft.....	55
<i>Ovchinnikov E.V.</i> Nanostructured fluorine-containing coatings.....	60
<i>Selihov A.V., Vargashkin V.J., Mishin V.V., Tulin S.N.</i> Evaluation of diagnosis' features of ball bearing's tribounits by parameters of cumulative distribution function of electrical resistance.....	68
<i>Simakov A.A., Vasilenko Yu.V., Burnashov M.A.</i> Analysis of oscillation forms of disturbing force at flat vibrogrinding.....	76

### Machine-building technologies and tools

<i>Alexandrov A.A., Barsukov G.V., Frolenkov K.Y.</i> Modification of secondary development technology technological abrasive materials waterjet cutting.....	82
<i>Gerova S.V.</i> Recovery method subjected damage critical power equipment parts of gas pipeline.....	91
<i>Dorokhov D.D., Kislovsky A.</i> A Prospects of comprehensive local deformation the construction bimetallic bearings.....	99
<i>Inozemtsev V.E., Myo Naing Oo</i> Quality increase finishing of intractable alloys.....	103
<i>Zuykin R.A., Afonin A.N.</i> Influence design and the technological data at a cutting-forming handlin of processing of trapezoidal carvings on equivalent deformations and deformation forces.....	108
<i>Karaseva A.S.</i> Increase the wear resistance of the friction surfaces sliding machine parts on the basis of modern tribotechnology.....	115
<i>Kirichek A.V., Solovyev D.L., Tarasov D.E.</i> The device for realization of hardening wave deformation of the complex-profile surfaces.....	120
<i>Ovsianikova I.V., Tarapanov A.S.</i> Technological capabilities and prospects of electroerosive processing of details.....	129
<i>Harlamov G.A., Kanatnikov N.V., Kanatnikov A.V.</i> Gear shaping cutters with the differentiated schemes of cutting.....	136

### Control, diagnostics, tests and quality management

<i>Bakurova J.A., Podmasteryev K.V.</i> Research of values of thermoelectric ability of surfaces of the cutting tool with various degree of wear.....	141
<i>Bernat S.V., Markov V.V.</i> Application the results of exploitation researches for the optimization of constructions the semiconductor lighting lamps.....	146
<i>Evsikova D.A.</i> Automation error calculation based design and installation of elements in synthesis machine accessories with integrated CAD.....	151
<i>Krukov D.N., Ivakhnenko A.G., Anikeeva O.V.</i> Standardization parameters geometric precision modular machine tools.....	156



# ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

УДК 537.322

О.А. МИЛОВИДОВА, В.О. СЕРГЕЕВ, А.А. СОКОЛОВ

## ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ТЕРМОЭДС МАТЕРИАЛА, СОСТОЯЩЕГО ИЗ ШАРООБРАЗНЫХ НАНОЧАСТИЦ

*Впервые получен полупроводниковый материал, у которого электронные процессы определяют величину коэффициента теплопроводности. Обнаружено сильное влияние изменения состояния поверхности наночастиц меди, из которых состоит материал, на его термоэлектрические свойства.*

**Ключевые слова:** термоэлектрическая добротность, электронная теплопроводность, наноструктурированный материал, состояние поверхности.

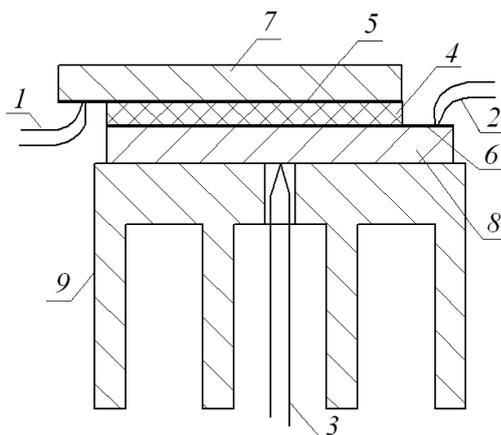
Эффективность прямого преобразования тепловой энергии в энергию электрического тока с помощью твердых тел характеризуются безразмерной термоэлектрической добротностью материала  $Z = \sigma \alpha^2 T/k$ , где  $\sigma$ ,  $\alpha$ ,  $T$ , и  $k$  - электропроводность, дифференциальная термоэдс, абсолютная температура и теплопроводность материала, соответственно. Многочисленные и многолетние исследования с целью увеличения параметра  $Z$  пока не привели к принципиальному прорыву: до сих пор не создано материалов со значением  $Z > 2$ . Надежды на увеличение  $Z$  связывают с использованием наноструктурированных материалов, таких, например, как сверхрешетки, системы с квантовыми ямами и точками и квантовые проволоки. Ожидаемый эффект увеличения  $Z$ , в первую очередь, обусловлен понижением теплопроводности наноструктурированных материалов за счет рассеяния фононов на неоднородностях, имеющих размеры порядка нанометра (смотри, например, [1, 2]). Однако, рассеяние электронов на неоднородностях в твердом теле, созданных для рассеяния фононов и уменьшения  $k$ , приводит к уменьшению  $\sigma$  и  $\alpha$ . По-видимому, поэтому добиться этими методами существенного увеличения отношения  $\sigma \alpha^2/k$  пока не удастся.

Площадь точечного контакта двух шаров равна нулю. Поэтому материал, состоящий из большого числа шарообразных частиц металла или полупроводника, имеет прыжковую электропроводность, обусловленную туннелированием электронов через нанометровые зазоры между частицами в области контактов между ними. Фононная компонента теплопроводности материала, состоящего из частиц в форме шара, равна нулю. Такой материал имеет электронную теплопроводность, обусловленную туннелированием электронов сквозь зазоры между частицами, а также теплопроводность, обусловленную лучистым теплообменом вследствие теплового излучения. Независимо от природы частиц (металл, полупроводник), благодаря отсутствию фононной теплопроводности, материал может иметь рекордное значение термоэлектрической эффективности по отношению к прямому преобразованию тепловой энергии в энергию электрического тока:  $Z = 10 - 10^2$ . Для этого необходимо, чтобы термоэлектронная работа выхода поверхности шарообразных частиц была равна 0.7 - 0.9 эВ [3].

Цель настоящей работы состояла в экспериментальном изучении механизма теплопроводности и термоэлектрических свойств полупроводникового материала, состоящего из большого числа шарообразных наночастиц меди. Кроме того, исследовано влияние изменения состояния поверхности частиц на электронные свойства такого материала.

В опытах использовали наноструктурированный материал (НМ), состоящий из частиц меди. Доля инородных примесей в них не более  $5 \times 10^{-4}$ . Частицы имели форму шара со средним диаметром  $d = 100$  нм и удельной поверхностью  $15 \text{ м}^2/\text{г}$  и содержали на своей поверхности полупроводниковые оксидные слои CuO, толщиной  $L = 2 - 4$  нм. Электродами служили плёнки алюминия толщиной 0.5 мкм, напыленные на полированную поверхность кристаллов кремния с размерами  $20 \times 10 \times 0.45$  мм. Частицы наносили слоем толщиной 1 мкм на поверхность электрода. С помощью манипулятора на основе электромагнита на слой частиц площадью  $2 \text{ см}^2$  сверху помещали второй электрод, площадью  $1 \text{ мм}^2$ , и прижимали к частицам пружинкой. Поверхность электродов и нанесенные на электрод частицы исследованы с по-

мощью атомно-силового микроскопа СММ-2000, оптического микроскопа Axioscop 2МАТ и электронного микроскопа JSM-6380LV. Высота выступов (зерен) на поверхности электродов не превышала 80 нм. С помощью приставки Energy INCA-250 нм для электронного микроскопа JSM-6380LV методом рентгеноспектрального микроанализа был проведен элементный анализ поверхности электродов с нанесенным слоем частиц. Весовой процент химических элементов, содержащихся на поверхности электрода, например, в случае монослоя частиц меди, нанесённых на его поверхность, следующий (толщина анализируемого приповерхностного слоя равна 100 нм): Al – 40,02; Cu – 39,70; O – 12,92; Si – 7,36, а без слоя меди: Al – 70,5; Si – 29,5. Установлено, что после выдержки подложки с монослоем частиц меди в среде атомов водорода (см. далее) и затем в среде воздуха в течение 12 ч содержание элементов на поверхности электрода остается прежним.



**Рисунок 1 – Схема устройства для измерений коэффициента теплопроводности и термоэлектрической эффективности материала, состоящего из шарообразных наночастиц**  
 1,2,3 – термомпары для измерений температур  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  соответственно; 4 – слой наночастиц; 5 и 6 – электроды (алюминиевые пленки) на поверхности пластинок кремния 7 и 8; 9 – радиатор. Электрические контакты к электродам 5 и 6 на схеме не показаны.

Подложку с нанесенным на ее поверхность слоем НМ помещали в вакуумную камеру в среду спектрально чистого водорода при давлении 70 Па. Третью поверхности подложки со слоем НМ непрерывно нагревали сфокусированным светом лампы накаливания. При этом в неосвещенной части подложки между электродами возникала термоэдс  $E$ , обусловленная появлением градиента температуры в слое НМ:  $E = \alpha(T_1 - T_2)$ , где  $T_1$  и  $T_2$  - температуры алюминиевых электродов (можно показать, что  $E$  не зависит от разности  $T_1$  или  $T_2$  и температуры окружающей среды). С помощью высокочастотного разряда в газе получали атомы водорода с концентрацией  $10^{13} \text{ см}^{-3}$ . При этом атомы Н проникали в зазоры между частицами. Благодаря восстановлению атомарным водородом поверхностных оксидных плёнок частиц [4 - 6], происходило изменение состояния их поверхности. Изучали изменение термоэдс в процессе выдержки (до 5 ч) НМ в среде атомов Н. С помощью двух термомпар одновременно контролировали изменение во времени температур  $T_1$  и  $T_3$  верхней поверхности НМ (в неосвещенной части подложки) и нижней поверхности подложки, соответственно ( $T_3 \neq T_2$ ). При этом периодически измеряли вольтамперную характеристику (ВАХ) образца, прикладывая электрическое напряжение к электродам.

В других опытах («вторым» методом) слой частиц, площадью  $S = 1.4 \text{ см}^2$  и толщиной  $d_1 = 1 \text{ мкм}$ , помещали между двумя параллельными одинаковыми пластинками кремния с размерами  $20 \times 10 \times 0.45 \text{ мм}$  (рис. 1). В контакте со слоем частиц находились электроды – плёнки алюминия толщиной 0.5 мкм, напыленные на полированные поверхности кристаллов кремния. С помощью трех одинаковых термомпар одновременно измеряли температуры  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  верхнего и нижнего электродов и нижней поверхности подложки, соответственно. Для этого эти две пластинки кремния были сдвинуты относительно друг друга так, что с двух сторон выступали части двух пластинок размером  $3 \times 10 \text{ мм}$ . К алюминиевым электродам выступающих частей пластинок были присоединены две термомпары. С нижней поверхностью кремниевой подложки в контакте находился алюминиевый радиатор, площадь которого в 16 раз превышала площадь поверхности подложки с образцом. В отверстие диаметром 2 мм в

алюминиевом радиаторе вводили термодатчик и прижимали к нижней поверхности кремниевой подложки в ее центре.

Поверхность верхней пластинки непрерывно нагревали сфокусированным светом лампы накаливания. На выступающую часть подложки свет не попадал. При этом постоянный тепловой поток  $Q$  проходил через верхнюю кремниевую пластинку, слой порошка, кремниевую подложку и радиатор, который охлаждался газом, а также вследствие теплового излучения. В стационарных условиях выполнялось условие:

$$\frac{1}{\sigma S} = \frac{1}{k_1} + \frac{d_1}{k} + \frac{d_2}{k_2} + \frac{1}{\sigma S} \quad (1)$$

где  $S = 1.4 \text{ см}^2$  – площадь поверхности слоя порошка (и площадь электрических контактов к нему);

$k$  и  $k_1$  – коэффициенты теплопроводности слоя порошка и кремниевой подложки, соответственно;

$d_1$  и  $d_2$  – толщины слоя порошка и подложки, соответственно. Используем выражения:

$$Z = \sigma \alpha^2 T/k; \quad T \approx (T_1 + T_2)/2; \quad E \approx \alpha(T_1 - T_2),$$

где  $\sigma$ ,  $\alpha$ ,  $T$ , и  $k$  – электропроводность, дифференциальная термоэдс, абсолютная температура и теплопроводность слоя порошка, соответственно;

$E$  – термоэдс между алюминиевыми электродами.

С помощью этих формул и выражения (1), находим:

$$k = \frac{1}{\sigma S} \left( \frac{1}{k_1} + \frac{d_1}{k} + \frac{d_2}{k_2} + \frac{1}{\sigma S} \right)^{-1} \quad (2)$$

$$Z = \sigma \alpha^2 T/k \quad (3)$$

где  $R = d_1 / (\sigma S)$  – электрическое сопротивление слоя порошка.

Одновременно измеряли изменение во времени величин  $R$ ,  $E$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  после включения и выключения источника нагрева образца (потока света). Эти величины измеряли также в стационарных условиях при разных значениях электрической мощности, подводимой к источнику света, то есть при разных температурах образца. Затем верхнюю пластинку – электрод поднимали. С помощью высокочастотного разряда в газе получали атомы водорода с концентрацией  $[H] \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и выдерживали НМ в среде атомов Н до 5 ч. При этом происходило восстановление атомарным водородом поверхностных оксидных плёнок частиц за исключением недоступных для атомов Н участков плёнок в области контактов частиц диаметром  $d_c \approx (2bd)^{1/2} \approx 3\text{--}6 \text{ нм}$ , где  $d \approx 100 \text{ нм}$  – диаметр частиц;  $b \approx 0.1 \text{ нм}$  – зазор между шарообразными частицами в области контакта между ними, малопроницаемый для атомов Н. В результате в области контактов частиц происходило образование из остатков оксидных плёнок частиц полупроводника, объемом  $10^{20}\text{--}10^{15} \text{ см}^3$  (квантовых точек) [4]. После воздействия на слой НМ атомами Н верхнюю пластинку – электрод опускали на поверхность НМ и вновь измеряли величины  $R$ ,  $E$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  при разных температурах образца.

По формулам (2) и (3) вычисляли коэффициент теплопроводность слоя порошка  $k$  и эффективность преобразования им тепловой энергии в энергию электрического тока  $Z$  при разных температурах слоя порошка  $T \approx (T_1 + T_2)/2$ . При этом учитывали зависимость от температуры коэффициента теплопроводности кремниевой подложки  $k_1$  (использовали известные из литературы данные для монокристаллов Si [7]). Погрешность измерений величин  $k$  и  $Z$  этим методом (40%) определялась, главным образом, несовпадением измеренных температур  $T_1$  и  $T_2$  с температурами алюминиевых электродов в области их контакта со слоем частиц.

В процессе выдержки в среде атомов водорода нанесенного на подложку слоя НМ термоэдс в нем возрастает после индукции одного периода, затем не меняется (рис. 2, кривая 1). При этом синхронно происходит рост температуры  $T_1$  поверхности НМ в неосвещенной части подложки и уменьшение температуры  $T_3$  нижней поверхности подложки (рис. 2, кривые 2 и 3, соответственно).

Эти изменения являются следствием увеличения под действием атомов Н теплопроводности слоя НМ и изменения условия теплового баланса: увеличивается температура  $T_1$  и, как следствие, увеличивается тепловой поток  $g$ , отводимый газом от верхней неосвещенной поверхности подложки с НМ. Увеличение  $g$  приводит к уменьшению  $T_3$ . Поскольку фононная теплопроводность НМ не меняется, следовательно, увеличивается электронная теплопроводность НМ. Одновременно увеличивается термоэдс. Начальные участки вольтампер-

ных характеристик НМ имеют линейный вид. В процессе выдержки электрода с нанесенными частицами в среде атомов Н дифференциальное сопротивление НМ необратимо уменьшается в несколько раз. Следовательно, увеличение электропроводности НМ коррелирует с увеличением теплопроводности слоя НМ и увеличением термоэдс в этом слое.

Аналогичные результаты получены вторым методом: после обработки НМ атомарным водородом электрическое сопротивление слоя НМ уменьшается в несколько раз, при этом существенно увеличивается термоэдс (рис. 3). Вычисленные по формулам (2) и (3) коэффициент теплопроводности и термоэлектрическая эффективность НМ существенно увеличиваются после обработки НМ атомами водорода (рис. 4).

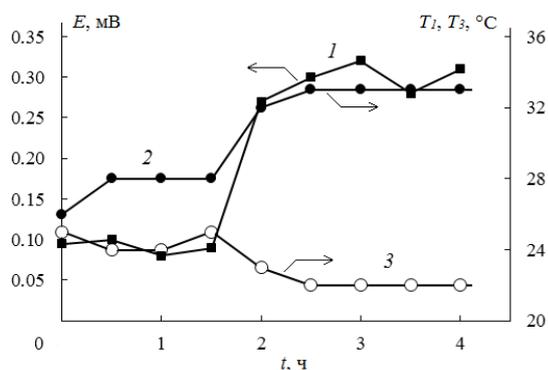


Рисунок 2 – Зависимость от времени выдержки в среде атомарного водорода подложки с нанесенным слоем шарообразных частиц меди термоэдс в не нагреваемой светом части слоя частиц меди (1), температуры поверхности, не нагреваемой светом части этого слоя (2), и температуры нижней поверхности подложки (3)

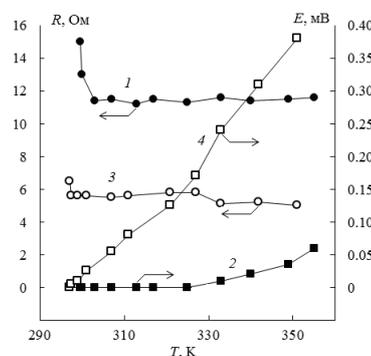


Рисунок 3 – Зависимость от температуры слоя шарообразных частиц меди электрического сопротивления слоя (1), (3) и термоэдс в этом слое (2), (4) до (1), (2) и после (3), (4) воздействия на этот слой атомарным водородом в течение 5 ч.

Коэффициент лучистого теплообмена в материале, состоящем из шарообразных частиц равен [3]:  $k_h = q_T / (S\sqrt{T}) \approx 4 \sigma_T T^3 d$ , где  $\sigma_T$  - постоянная Стефана-Больцмана. Используя значения  $T = 400$  К;  $d = 10^{-7}$  м, находим:  $k_h \approx 10^{-6}$  Вт/(мК). Эта величина на шесть порядков меньше измеренного в опытах значения коэффициента теплопроводности  $k \approx 1$  Вт/(мК) (рис. 4, b). Поскольку лучистый теплообмен вследствие теплового излучения пренебрежимо мал, следовательно, выполняется условие:  $k \cong k_e + k_p$ , где  $k_e$  и  $k_p$  - коэффициенты электронной и фононной теплопроводности структуры соответственно. Увеличение теплопроводности НМ после воздействия на него атомарным водородом – это следствие того, что теплопроводность НМ определяют электронные процессы в области точечных контактов между частицами.

Пусть в материале создан градиент электрического потенциала  $\nabla\phi$ . Если выполняется условие  $e\Delta\phi \ll k_B T$ , где  $e$  - элементарный заряд;  $k_B$  - постоянная Больцмана;  $\Delta\phi \cong d\nabla\phi$  - падение напряжения на контакте между двумя частицами, тогда сила тока через контакт зависит линейно от приложенного к слою НМ напряжения [3]. Полагая  $d = 100$  нм,  $\nabla\phi \approx 10^5$  В/м, находим:  $\Delta\phi < k_B T / e$ . Вследствие выполнения этого условия в опытах начальные участки ВАХ – линейные. Используя экспериментальные данные (см. рис. 3, кривая 3), оценим электропроводность НМ:  $\sigma = d_1 / (RS) \approx 10^{-2}$  (Ом м) $^{-1}$ . Отношение  $k / \sigma \approx 10^2$  В $^2$ /К для НМ на восемь порядков больше отношения  $k / \sigma \approx k_B^2 T / e^2 \approx 10^{-6}$  В $^2$ /К для материалов, состоящих из однородных шарообразных частиц [3]. Этим обусловлены небольшие значения величины  $Z \cong \sigma a^2 T / k_e \approx 10^{-10}$  для НМ (рис. 4, b).

Наличие оксидных пленок на поверхности металлических наночастиц существенно уменьшает электропроводность НМ [4]. Покажем, что наличие этих пленок сильно влияет на величину отношения  $k / \sigma$  для НМ.

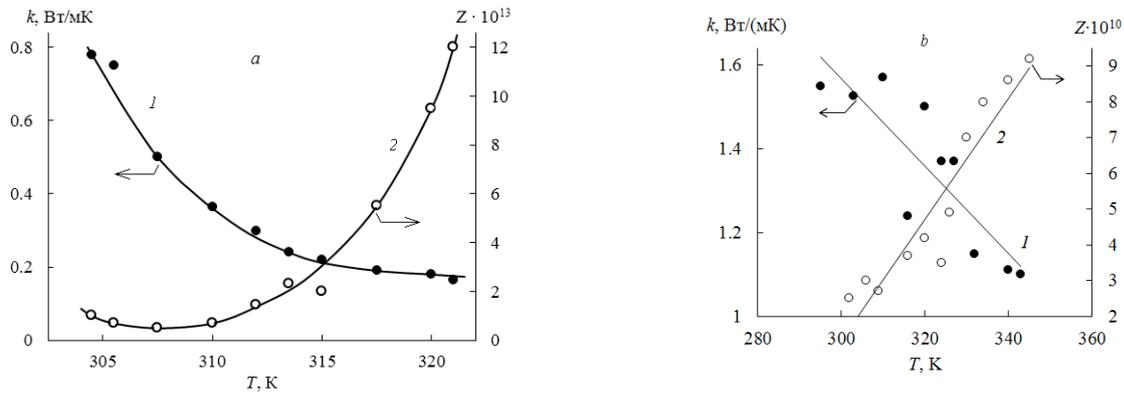


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента теплопроводности(1) и термоэлектрической эффективности (2) слоя шарообразных частиц меди от температуры до (а) и после (б) воздействия на этот слой атомами водорода в течение 5ч.

Если в материале создан постоянный градиент температуры  $\nabla T$  в направлении цепочки частиц, тогда между двумя контактирующими частицами возникает разность температур  $\delta T = T_1 - T_2 \cong d\nabla T$  [3] и разность потенциалов (электродвижущая сила сторонних сил)  $u$ . В условиях равновесия потоки электронов через область контакта между двумя частицами в прямом и обратном направлениях совпадают:

$$i = i_1 \exp\{-eu/(k_B T_1)\} - i_2 = 0, \tag{4}$$

где 
$$i_{1,2} = [n \langle v_x \rangle]_{1,2} = \int_0^{d/2} \int v_x f(\varepsilon, T_{1,2}) D[\varepsilon, l(r)] 2\pi r dr^3 p, \tag{5}$$

$n$  – концентрация электронов в объеме частицы;

$v_x$  – проекция вектора скорости электрона на направление нормали к плоскости  $x = 0$ , касательной к сферическим поверхностям частиц;

$f(\varepsilon, T) = n(2\pi m k_B T)^{-3/2} \exp[-\varepsilon/(k_B T)]$  - функция распределения электронов по энергиям;  $\varepsilon = p^2/2m$  - энергия электронов в твердом теле;  $p$  и  $m$  – импульс и эффективная масса электрона;

$D[\varepsilon, l(r)] \approx \exp\{-2l(r)[2m_0(\chi - \varepsilon)]^{1/2}/\hbar\}$  – коэффициент прозрачности потенциально-го барьера для электронов, туннелирующих из одной частицы в другую через зазор между ними;

$\chi$  - потенциальный барьер для электронов (в данном случае - электронное сродство поверхности полупроводника);

$l(r)$  - величина вакуумного зазора между частицами в области контакта между ними,  $l = 2r^2/d$ ;

$r$  – расстояние от точки контакта частиц в плоскости  $x = 0$ .

Поток тепла  $q_e$ , переносимого электронами через зазор в области контакта между двумя частицами, равен:

$$q_e = q_1 \exp\{-eu/(k_B T_1)\} - q_2, \tag{6}$$

где 
$$q_{1,2} = [n \langle v_x \varepsilon \rangle]_{1,2} = \int_0^{d/2} \int v_x \varepsilon f(\varepsilon, T_{1,2}) D[\varepsilon, l(r)] 2\pi r dr^3 p. \tag{7}$$

Применяя к выражениям (5) и (7) теорему о среднем, используем средние значения  $\bar{S}$  и  $\bar{S}_\varepsilon$  величины  $S(\varepsilon) = \int_0^{d/2} D[\varepsilon, l(r)] 2\pi r dr$  по отношению к процессам электронного переноса между двумя контактирующими частицами заряда и энергии, соответственно. Применим выражение [3]:  $k_e/\sigma \cong 2k_B^2 T \bar{S}_\varepsilon / (e^2 \bar{S})$ , справедливое в случае НМ, состоящего из однородных шарообразных частиц. При выполнении условия  $\chi \geq 2$  эВ в случае однородных шарообразных частиц найдено:  $\bar{S}_\varepsilon \cong \bar{S}$  [3]. Убедимся в том, что в случае металлических частиц с полупроводниковыми пленками на их поверхности полученным экспериментальным результа-

там соответствует выполнение условия  $\bar{S}_\varepsilon \gg \bar{S}$ . При переносе энергии электронами, туннелирующими из одной частицы в другую через зазор между ними, электроны преодолевают только потенциальный барьер  $\chi$ . При этом выполняется условие (4), то есть упорядоченный поток электронов в НМ отсутствует. Далее вследствие электрон – фононного взаимодействия процесс выравнивания температуры в объеме каждой частицы происходит с участием фононов. Электрон – фононному взаимодействию, вероятно, способствуют акцепторные электронные состояния (ловушки электронов) в объеме оксидных пленок [4] (особенно в случае необработанных атомами Н образцов, смотри далее). При этом перенос тепла через межфазную границу между оксидной пленкой и металлом осуществляют фононы. Об этом свидетельствует уменьшение коэффициента теплопроводности НМ при увеличении температуры (рис. 4 б, кривая 1) со скоростью  $k^{-1}dk/dT \approx 7 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ , соответствующей фононному механизму теплопроводности (например, в случае кристаллов кремния  $k_{Si}^{-1}dk_{Si}/dT \approx 4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ).

Напротив, при токопрохождении через НМ из-за наличия оксидных пленок на поверхности металлических частиц электроны преодолевают не только потенциальный барьер  $\chi$  в зазоре между частицами, но также и потенциальный барьер  $\Delta\Phi$  на межфазной границе металла с оксидной пленкой, равный разности термоэлектронных работ выхода металла и полупроводника:  $\Delta\Phi = |\Phi_1 - \Phi_2| \approx 0.6 \text{ эВ}$ , где  $\Phi_1 = 4.4 \text{ эВ}$ ;  $\Phi_2 \approx 5 \text{ эВ}$  - работы выхода меди и оксидов меди CuO и Cu<sub>2</sub>O, соответственно [8]. В этом случае поток электронов  $i_1$  в выражении  $\sigma \cong 4e^2 i_1 / (\pi dk_B T)$  [3] для электропроводности НМ, состоящего из однородных шарообразных частиц, необходимо умножить на вероятность  $P$  преодоления электронами этого барьера. Допустим, что доминирующий механизм токопрохождения через НМ состоит в том, что электроны металлических ядер туннелируют сквозь потенциальные барьеры, образованные вакуумными зазорами между частицами, а также двумя контактирующими оксидными пленками на поверхности частиц. Получаем:

$$P \approx \exp\left\{-4L[2m_0\Delta\Phi]^{1/2}/\hbar\right\} \approx 10^{-10}, \quad (8)$$

где  $L \approx 2 \text{ нм}$  – толщина одной пленки;  $\Delta\Phi \approx 0.6 \text{ эВ}$ .

Можно допустить также, что механизм токопрохождения через НМ включает прохождение электронами над потенциальным барьером границы между металлическим ядром и оксидной пленкой с вероятностью  $P = \exp[-\Delta\Phi/(k_B T)]$ . Полагая:  $T = 350 \text{ К}$ ;  $\Delta\Phi = 0.6 \text{ эВ}$ , получаем:  $P \approx 10^{-9}$ . Эти оценки позволяют объяснить низкие значения величин  $\sigma$  и  $Z$ , полученные в опытах. Слабой зависимости электрического сопротивления НМ от температуры (см. рис. 3, кривые 1 и 3) лучше соответствует предположение о туннелировании электронов сквозь оксидные пленки.

Взаимодействие атомов водорода с оксидами и сульфидами металлов сопровождается их восстановлением и увеличением плотности поверхностных донорных состояний, связанных со сверхстехиометрическими атомами металла [4 - 6]. Вследствие этого на поверхности полупроводников возникает положительный заряд и изгиб зон вниз. Благодаря этому в области точечных контактов частиц возникают потенциальные ямы для электронов [4], а также возрастает поверхностная концентрация электронов  $n$ . При этом уровень Ферми  $\varepsilon_F$  на поверхности полупроводника изменяет свое положение:  $\varepsilon_F = \varepsilon_c - k_B T \ln(N_c/n)$ ,

где  $\varepsilon_c$  - уровень дна зоны проводимости полупроводника;

$N_c$  - плотность электронных состояний.

Кроме того, увеличивается объемная концентрация электронов и смещается уровень Ферми в объеме оксидных пленок [4]. Это приводит к уменьшению термоэлектронной работы выхода поверхности полупроводника и, согласно выражениям (5) и (7), в случае НМ - к увеличению потока электронов через зазоры между частицами в области контактов между ними, а также энергии, переносимой ими. Уменьшение работы выхода  $\Phi_2$  оксидной пленки в результате воздействия атомов водорода сопровождается уменьшением потенциального барьера  $\Delta\Phi$  на межфазной границе металла с оксидной пленкой. Это приводит к увеличению вероятности  $P$  туннелирования электронов сквозь пленки (выражение (8)), а следовательно, - к увеличению  $\sigma$  и  $Z$ . Благодаря этим процессам увеличиваются электропроводность, электронная теплопроводность и термоэлектрическая эффективность НМ. Акцепторные электронные состояния (ловушки электронов) в объеме оксидных пленок, а также потенциальные ямы для электронов в области точечных контактов частиц [4] стимулируют электрон – фононное взаимо-

действие в оксидных пленках, благодаря которому процесс выравнивания температуры в объеме каждой частицы происходит с участием фононов.

Установлено, что полупроводниковый материал, состоящий из большого числа шарообразных наночастиц меди с оксидными пленками на их поверхности, обладает уникальным свойством: величину его коэффициента теплопроводности определяют электронные процессы в области точечных контактов между частицами. Наличие оксидных пленок на поверхности наночастиц и их большая термоэлектронная работа выхода ответственны за низкие значения электропроводности и термоэлектрической эффективности материала, состоящего из этих частиц. В результате уменьшения под действием атомарного водорода термоэлектронной работы выхода оксидных пленок происходит увеличение электропроводности, теплопроводности по электронному механизму и термоэлектрической эффективности этого материала.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев А.В. УФН / А.В. Дмитриев, И.П. Звягин. 2010. – Т. 180. – С. 821 - 859.
2. N. Gothard, J.E. Spowart, T.M. Tritt. // Phys. Status Solidi A. 2010. V. 207. pp. 157 - 162.
3. В.Ф. Харламов. ЖЭТФ. 2013. Т. 143. № 6. С. 623 – 630.
4. В.Ф. Харламов, Д.А. Коростелёв, И.Г. Богораз, О.А. Миловидова, В.О. Сергеев. // ФТП. 2013. Т. 47. № 4. С. 473-479.
5. Харламов, В.Ф. Кинетика и катализ / В.Ф. Харламов. – 2005. Т. 46. № 4. С. 497- 505.
6. В.Ф. Харламов, А.В. Седов, С.Н. Ромашин. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. № 18. С. 1 - 8.
7. K. Suzuki, N. Mikoshiba. // Phys. Rev. B.: Solid state. 1971. V. 3. № 8. pp. 2550-2556.
8. Фоменко, В.С. Эмиссионные и адсорбционные свойства веществ и материалов / В.С. Фоменко, И.А. Подчерняева. – М.: Атомиздат. 1975. – 320 с.

**Миловидова Ольга Алексеевна**  
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел  
Аспирант кафедры «Физика»  
Тел. 8-920-283-72-15  
E-mail: [olga57.09@mail.ru](mailto:olga57.09@mail.ru)

**Сергеев Владимир Олегович**  
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел  
Аспирант кафедры «Физика»  
Тел. 8-920-086-58-86  
E-mail: [perebezchik@mail.ru](mailto:perebezchik@mail.ru)

**Соколов Александр Александрович**  
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел  
Аспирант кафедры «Физика»  
Тел. 8-920-080-07-77  
E-mail: [ispleener@gmail.com](mailto:ispleener@gmail.com)

O.A. MILOVIDOVA, V.O. SERGEEV, A.A. SOKOLOV

### THERMAL CONDUCTIVITY AND THERMOELECTRIC MATERIAL CONSISTED OF A BALL-SHAPED NANOPARTICLES

*First a semiconductor material, which the phonon component of the thermal conductivity significantly smaller than the electron thermal conductivity was obtained. A strong effect of changing the state of the surface of copper nanoparticles that make up the material on its electronic properties is found.*

**Keywords:** *thermoelectric quality, electronic thermal conductivity, nanostructured material, surface condition.*

**Milovidova Olga Alekseevna**  
State University – Education Science Production Complex, Orel  
Postgraduate student of department «Physics»  
Tel. 8-920-283-72-15  
E-mail: [olga57.09@mail.ru](mailto:olga57.09@mail.ru)

**Sergeev Vladimir Olegovich**  
State University – Education Science Production Complex, Orel  
Postgraduate student of department «Physics»  
Tel. 8-920-086-58-86  
E-mail: [perebezchik@mail.ru](mailto:perebezchik@mail.ru)

**Sokolov Aleksandr Aleksandrovich**  
State University – Education Science Production Complex, Orel  
Postgraduate student of department «Physics»  
Tel. 8-920-080-07-77  
E-mail: [ispleener@gmail.com](mailto:ispleener@gmail.com)

О.П. МУЛЮКИН, М.И. БОРЗЕНКОВ, Е.В. БРУМА, О.Ю. ГРИГОРЬЕВА, М.П. ДУДИН

## КЛАССИФИЦИРОВАНИЕ ДЕСТРУКТИВНЫХ ФАКТОРОВ, ПРИЧИН И ПОСЛЕДСТВИЙ ИХ ПРОЯВЛЕНИЯ В УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ КЛАПАННОЙ ПНЕВМОГИДРОАРМАТУРЫ

*Охарактеризованы классификационные признаки предложенной авторами систематизации деструктивных факторов, причин и последствий их проявления в уплотнительных соединениях клапанной пневмогидроарматуры и созданная на ее основе диаграмма Парето по основным видам неисправностей арматуры такого рода на стадиях испытания, доводки и эксплуатации.*

**Ключевые слова:** клапанная пневмогидроарматура; деструктивные факторы; схема Исикава; диаграмма Парето; отказ; неисправность; агрегат; схема исследования; признаки отказа; мобильная транспортная техника.

В работе [1] авторами охарактеризован ряд деструктивных факторов, негативно влияющих на показатели эксплуатационной надежности клапанно-седельных пар пневмогидроарматуры. Однако, за рамками этой работы остались вопросы систематизации всех видов деструктивных факторов, причин и последствий их проявления в уплотнительных соединениях клапанной пневмогидроарматуры. Как показал проделанный авторами углубленный анализ научно-технических источников на настоящее время отсутствуют полные классификационные схемы таких факторов, причин и последствий их проявления в уплотнительных соединениях (УС) клапанной арматуры, а трактовка деструктивных факторов и их роли в общей надежности клапанных устройств преподносятся различными авторами неоднозначно [2, 3, 4].

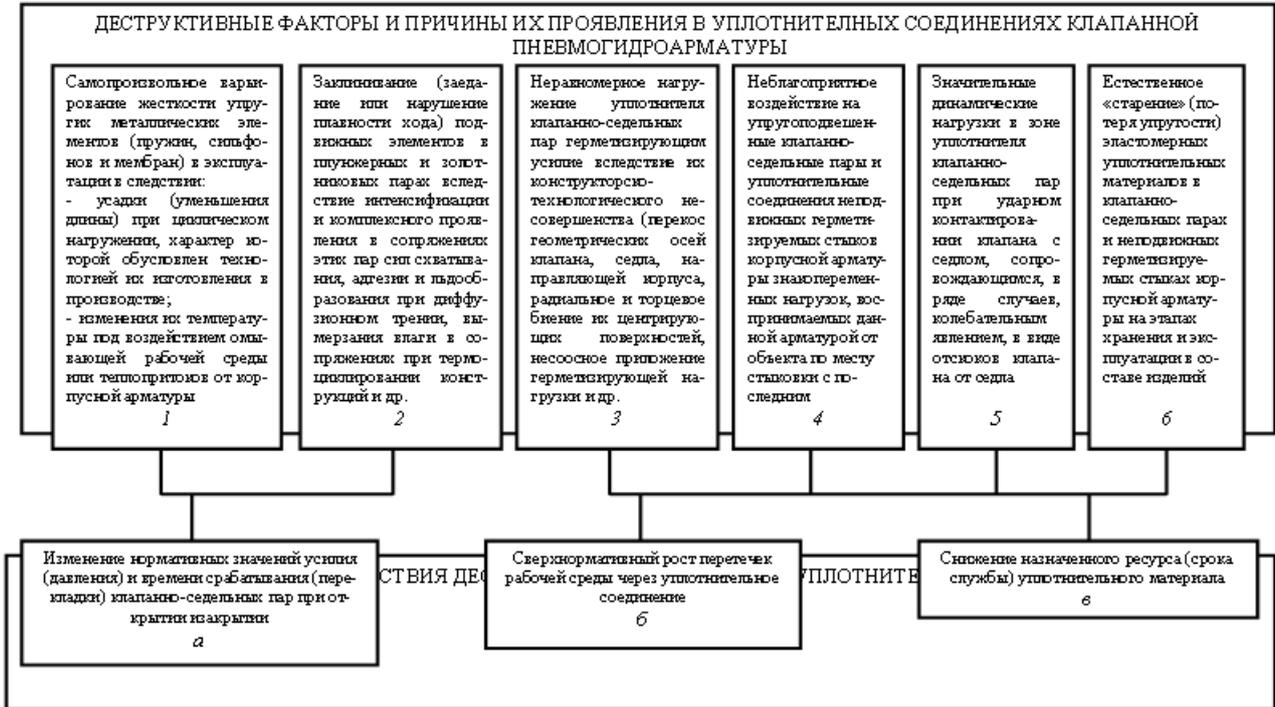
Результатом этого анализа явилась разработка классификационной схемы, представленной на рисунке 1, по своей сути, как будет показано далее, являющейся глубокой разработкой схемы Исикава по превалирующим неисправностям, то есть развитием не центрального «ствола дерева» со множеством неисправностей (а, б, в), а его «побегов» (1, 2, 3, 4, 5, 6), определяющих причины, условия и характер «зарождения» главенствующих неисправностей.

На практике с учетом неравнопрочности конструктивных элементов и узлов клапанной пневмогидроарматуры с помощью инженерно-статистического анализа возможно выделение одного или нескольких критических (наиболее «слабых» в прочностном отношении) элементов (или параметров) с выполнением условия эквивалентности, при этом для каждого критического элемента определяется проценты накопления повреждений, приводящие к отказам. Обычно инженерно-статистический анализ неисправностей клапанной арматуры проводят с помощью схемы Исикава («дерево» неисправностей и их причин) и диаграмм Парето. Схема Исикава дает возможность получить полную качественную картину по влиянию «слабых» звеньев и процессов накопления повреждений на надежность клапанной арматуры, а диаграмма Парето, на которой по оси абсцисс указываются виды неисправностей, а по оси ординат – кумулятивный (накопительный, приводящий с течением времени к внезапному отказу изделия) процент неисправностей (или их причин), позволяет на основе имеющейся статистической информации количественно оценить соотношения различных видов неисправностей и их причин.

Последующий анализ научно-технических источников [1-5] с учетом практических данных проф. О.П. Мулюкина, проработавшего более 18 лет инженером конструктором 1 категории в специализированном аэрокосмическом предприятии, позволил построить представленную на рисунке 2 диаграмму Парето для неисправностей УС серийной клапанной пневмогидроарматуры, обусловленных деструктивными факторами 1, 2, 3, 4, 5 и 6 (рис. 1).

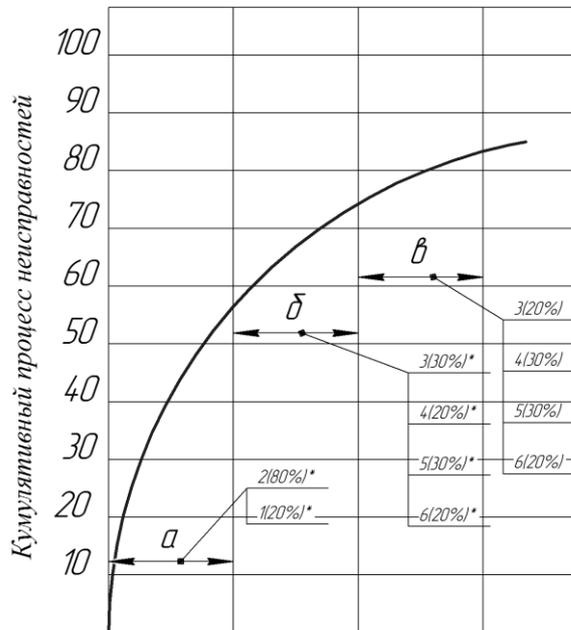
Отказы клапанной пневмогидроарматуры являются следствием неисправности какой-либо детали или узла. Прогноз технического состояния таких элементов и узлов или идентификация причин отказа – основные задачи, решаемые различными методами диагностики [6-7]. Многочисленность и высокая степень сложности клапанной пневмогидроарматуры современных энергетических установок, постоянное их обновление и модернизация, требования высокой эксплуатационной надежности предполагают организацию работ по неотложному реагированию на проявление возможной неисправности. Проведение операций по изу-

чению технического состояния ответственных деталей, узлов и агрегатов отказавшей мобильной транспортной техники представляет собой практически непрерывный процесс комплексных научных исследований, в котором участвуют ученые и инженеры различных специальностей (рис. 3). [1]



**Рисунок 1 – Классификационная схема деструктивных факторов, причин и последствий их проявления в уплотнительных соединениях клапанной пневмогидроарматуры**

1...6 – нумерация деструктивных факторов; а, б, в – обозначение неисправностей в уплотнительных соединениях клапанной арматуры, обусловленные проявлением деструктивных факторов



Основные виды неисправностей (а, б, в, - см. рисунок 1) из-за проявления деструктивных факторов (1, 2, 3, 4, 5, 6 - см. рисунок 1) на стадиях испытания, доводки и эксплуатации

**Рисунок 2 – Диаграмма Парето для неисправностей клапанной пневмогидроарматуры из-за воздействия деструктивных факторов**

\*- процентная составляющая отдельного деструктивного фактора в конкретном виде неисправностей

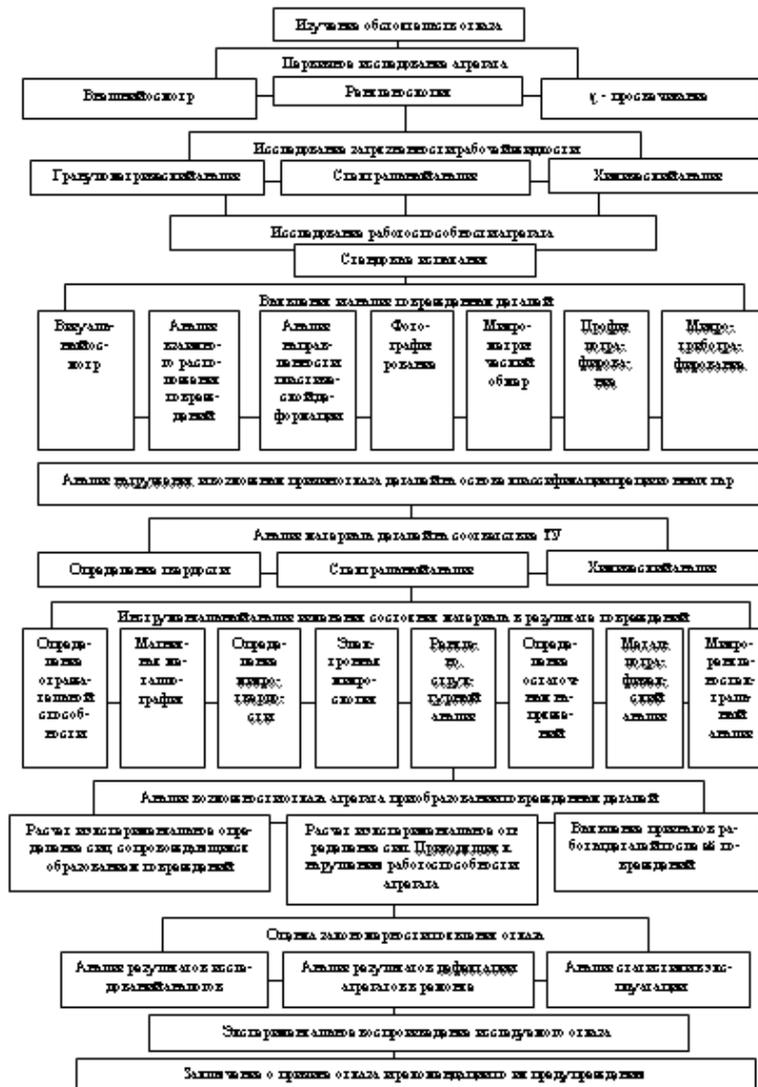


Рисунок 3 – Схема исследования отказавших агрегатов мобильной транспортной техники

Следует отметить, что выявление объективных признаков отказа деталей и узлов агрегатов мобильной транспортной техники – весьма сложная задача. Это связано, прежде всего, с большим многообразием различных по конструкции и назначению прецизионных и клапанно-седельных пар, эксплуатирующихся в существенно различных условиях. Все эти различия оказывают влияние как на причину, так и на характере проявления отказов и неисправностей этих пар. Кроме того, нередко отказ проявляется кратковременно и не сопровождается выходом соответствующего устройства из строя. так, у большинства регулирующих и распределительных золотниковых пар отказы могут иметь временный, самоустраняющийся характер и при последующих испытаниях агрегатов не проявятся. Для распознавания такого рода повреждений необходимы соответствующие способы и средства, разработка которых составляет важную научно-техническую задачу.

Поддержание высокой надежности мобильной транспортной техники требует оперативного и достоверного определения причин возможных отказов и неисправностей, что влечет за собой необходимость разработки научно-методических основ диагностики причин отказов и повреждаемости динамически нагруженных узлов и деталей.

Разработана классификационная схема деструктивных факторов, причин и последствий их проявления в уплотнительных соединениях клапанной пневмогидроарматуры. Представлены в виде диаграммы Парето основные виды неисправностей из-за проявления деструктивных факторов на стадиях испытания, доводки и эксплуатации клапанной пневмогидроарматуры. Охарактеризованы особенности исследования отказавших агрегатов мобильной транспортной техники по выявлению объективных признаков отказов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мулюкин, О.П. Оценка влияния деструктивных факторов на показатели эксплуатационной надежности клапано-седельных пар пневмогидроарматуры [Текст]/О.П. Мулюкин, О.Ю. Григорьева, М.П. Дудин, М.И. Борзенков// Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - №6 (290). – Орел: Госуниверситет – УНПК, 2011. – С. 65-71.
2. Кармугин, Б.В. Современные конструкции малогабаритной пневмоарматуры: монография [Текст]/Б.В. Кармугин, В.Л. Кисель, А.Г. Лабезник. – Киев: Техника, 1980. – 295 с.
3. Кондратьева, Т.В. Предохранительные клапаны: монография [Текст]/ Т.В. Кондратьева. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1976. – 232 с.
4. Пневмогидравлические системы. Расчет и проектирование: Учеб. пособие для технических вузов [Текст]/ под ред. Н.М. Беляева. – М.: Высшая школа, 1988. – 271 с.
5. Эдельман, А.И. Топливные клапаны жидкостных ракетных двигателей: монография [Текст]/А.И. Эдельман. – М.: Машиностроение, 1970. – 240с.
6. Жуковский, А.Е. основы создания агрегатов автоматизации пневмогидравлических систем летательных аппаратов и двигателей. Ч. 1. Обеспечение конструкторской надежности и технологичности агрегатов: монография [Текст]/А.Е. Жуковский, Е.В. Шахматов, В.М. Квасов и др. – Самара: НПО «Импульс», 1993. – 375 с.
7. Жуковский, А.Е. Основы создания агрегатов автоматизации пневмогидравлических систем летательных аппаратов и двигателей. Ч.2. Обеспечение качества динамических процессов и устойчивость систем с агрегатами управления и регулирования: монография [Текст]/ А.Е. Жуковский, О.П. Мулюкин, Д.Е. Чегодаев и др. – Самара: НПО «Импульс». 1995. – 216 с.

**Мулюкин Олег Петрович**

Самарский государственный университет путей сообщения Доктор технических наук, профессор. Заведующий кафедрой «Инженерная графика» Заслуженный изобретатель Российской Федерации, Заслуженный деятель науки Российской Федерации 443063, Самара, 1-ый Безымянный пер., 19  
Тел.: 8-963-916-06-34.  
E-mail: om46@mail.ru

**Дудин Михаил Павлович**

Самарский государственный университет путей сообщения Аспирант 443063, Самара, 1-ый Безымянный пер., 19  
Тел.: 8-927-687-96-78  
E-mail: ripperhead@mail.ru

**Григорьева Ольга Юрьевна**

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс Аспирант 302020, Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел: (4862) 43-48-90.  
E-mail: met\_lit@ostu.ru

**Борзенков Михаил Иванович**

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автопласт» 302020, Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел: (4862) 43-48-90.  
E-mail: bim5155@yandex.ru

**Брума Екатерина Владимировна**

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс Аспирант. Тел: (4862) 41-98-42  
Email: gordon@ostu.ru

O.P. MALYUKIN, M.I. BORZENKOV; E.V. BRYMA, O.YU. GRIGOR'IEVA, M.P. DYDIN

**CLASSIFICATION DESTRUCTIVE FACTORS, CAUSES AND CONSEQUENCES OF THEIR MANIFESTATION IN THE SEAL A FLAP HYDRO PNEUMATIC VALVES**

*In this article described classification features proposed by the authors systematize destructive factors, causes and consequences of their display in sealing joints hydro pneumatic valve fittings and established on the basis of the Pareto chart by the main types of valves faults at the stages of testing, tuning and operation.*

**Keywords:** *pneumatic valve hydroelectric fittings; destructive factors, Ishikawa diagram, Pareto chart, failure, malfunction, machine, scheme of studies, signs of failure, mobile handling equipment.*

**Muljukin Oleg Petrovich**

Samara state university of communication lines Doctor of technical sciences, professor, head of department “Engineering graphic”  
Tel.: 8-963-916-06-34  
E-mail: om46@mail.ru

**Dudin Mikhail Pavlovich**

Samara state university of communication lines Postgraduate  
Tel.: 8-927-687-96-78  
E-mail: ripperhead@mail.ru

**Grigorieva Olga Jurievna**

State University – teaching – research – industrial complex Postgraduate  
Tel: (4862) 43-48-90  
E-mail: met\_lit@ostu.ru

**Borzenkov Mikhail Ivanovich**

State University – teaching – research – industrial complex Candidate of technical sciences, Associate Professor of department “Avtoplast”  
Tel: (4862) 43-48-90  
E-mail: bim5155@yandex.ru

**Bruma**

**Ekaterina Vladimirovna**  
State University – teaching – research – industrial complex Postgraduate  
Tel: (4862) 41-98-42  
E-mail: gordon@ostu.ru

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УПОРНЫХ СОВМЕЩЕННЫХ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ТИПА

*Предложена динамическая модель и представлены результаты расчета динамических характеристик упорной совмещенной подшипниковой опоры гидростатического типа, в состав которой входят упорный подшипник качения и гидростатический подшипник скольжения.*

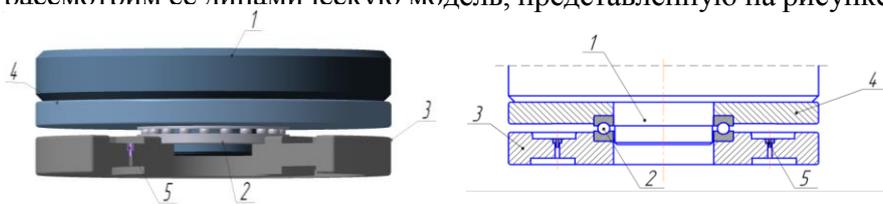
**Ключевые слова:** Динамическая модель совмещенной опоры, упорный гидростатический подшипник скольжения, упорный подшипник качения, коэффициенты жесткости и демпфирования совмещенной опоры.

В настоящее время роторные машины находят свое применение практически во всех сферах науки и техники, это насосы, компрессоры, детандеры, приводы вращательного движения и т.д., совершенствование которых направлено, прежде всего, на увеличение производительности и их ресурса за счет увеличения скорости вращения ротора.

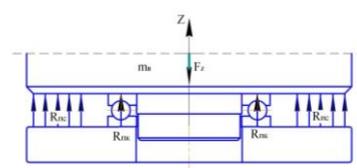
Важным узлом любой роторной машины, является роторно-опорный узел, определяющим динамические и другие эксплуатационные характеристики машины. Ввиду того, что в процессе работы роторной машины на опорные узлы помимо радиальных сил действуют и осевые, обусловленные действием внешних и внутренних факторов, динамические характеристики всей машины в целом, и роторно-опорного узла в частности, будут зависеть от динамических характеристик упорных подшипниковых узлов.

В настоящее время рассматривается вопрос применения, в качестве упорных подшипниковых узлов роторов, совмещенных опор, являющимися относительно не сложным техническим решением, позволяющим использовать достоинства подшипников качения и скольжения на различных режимах работы машины. Далее в статье рассмотрим вопросы расчета динамических характеристик упорного совмещенного подшипникового узла гидростатического типа.

На рисунке 1 представлена конструкция упорной совмещенной опоры, в состав которой входит осевой гидростатический подшипник скольжения и упорный подшипник качения. Принцип работы представленной опоры заключается в следующем. При эксплуатационных режимах, когда несущая способность подшипника скольжения отсутствует или незначительна, внешнюю нагрузку воспринимает подшипник качения, а динамические качества опоры определяются соответствующими качествами подшипника качения. При эксплуатационных режимах, когда подшипник скольжения обладает несущей способностью, не превышающей внешней нагрузки, внешнюю нагрузку воспринимают подшипник качения и скольжения одновременно, определяя динамические качества опоры взаимным влиянием. В случаях, когда несущая способность подшипника скольжения превышает значения внешней нагрузки, подшипник качения функционирует в режиме полного выключения, всю внешнюю нагрузку воспринимает подшипник скольжения, а динамические качества опоры соответствуют динамическим качествам подшипника скольжения в одиночной постановке. Для оценки динамических качеств рассматриваемой опоры рассмотрим ее динамическую модель, представленную на рисунке 2.



**Рисунок 1 – 3D-модель и схема упорной совмещенной опоры**  
1-Вал; 2-Подшипник качения; 3-Пята подшипника скольжения; 4-Подпятник подшипника скольжения; 5-Система подачи смазочного материала



**Рисунок 2 – Динамическая модель упорного совмещенного подшипникового узла гидростатического типа**

Динамическая модель жесткого ротора, нагруженного в осевом направлении, опирающегося на осевой совмещенный подшипниковый узел и жестко ограниченного в радиальном направлении, можно представить в виде одномассового одностепенного осциллятора, в котором колебания системы происходят под действием внешних и массовых сил, а также реакций подшипников качения и скольжения.

Система уравнений осевого движения данной модели в общем виде имеет вид:

$$m_s \frac{d^2 z}{dt^2} = R_z - F_z; \quad (1)$$

где  $m_s$  - масса вала;  
 $z$  - перемещения вала в осевом направлении;

$R_z$  - составляющая реакций совмещенной опоры;

$F_z$ ; - составляющая внешнего воздействия на опору.

- В зависимости от режимов работы опоры и условий нагружения составляющие правой части уравнения движения могут принимать следующие значения.

- Режим полного выключения подшипника скольжения  $R_z = R_{ПК}$ ;

- Режим разделения нагрузок  $R_z = R_{ПК} + R_{ПС}$ ;

- Режим полного выключения подшипника качения  $R_z = R_{ПС}$ ;

- Воздействие постоянной внешней силы  $P_a$  и силы веса  $F_z = P_a + m_g g$ ;

- Воздействие силы веса  $F_z = m_g g$ ;

- Воздействие постоянной внешней силы  $P_a$ , силы веса и возмущающего осевого воздействия  $F_{sh}(t)$ ,  $F_z = P_a + m_g g + F_{sh}(t)$ ;

Реакция подшипника качения определяется на основе решения контактной задачи теории упругости и ее можно представить в следующей зависимости [2].

$$R_{ПК} = \begin{cases} n \frac{2}{3\eta} \sqrt{\frac{1}{\sum \rho}} \left( \frac{(h_m - z)}{\frac{2k}{\pi\mu}} \right)^{\frac{3}{2}} & \text{если } z \leq h_m \\ 0 & \text{если } z > h_m \end{cases} \quad (2)$$

где  $h_m$  – монтажный зазор совмещенной опоры;

$n$  – количество тел качения подшипника;

$\eta$  – коэффициент, характеризующий упругие свойства материала;

$\frac{2k}{\pi\mu}$

$\pi\mu$  – параметр, учитывающий геометрию контакта;

$\sum \rho$  – сумма главных кривизн поверхностей соприкосновения тел в месте их первоначального контакта.

Реакции подшипника скольжения определяются на основании интегрирования расчетных значений полей давлений полученных из модифицированного уравнения Рейнольдса [1] и имеют вид:

$$R_{ПС} = \int_{R_{in}}^{R_{out}} \int_0^{2\pi} p \left( z, \frac{dz}{dt} \right) r d\varphi dr \quad (3)$$

где  $p \left( z, \frac{dz}{dt} \right)$  - поле давлений находится на основании интегрирования уравнения Рейнольдса.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{r\partial r} \left[ \frac{\rho h^3}{\mu K_r} r \frac{\partial p}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{r^2 \partial \varphi} \left[ \frac{\rho h^3}{\mu K_\varphi} \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right] = \\ = 12\omega^2 \frac{\partial}{r\partial r} \left( \frac{\rho^2 r^2 h^3}{40\mu} \right) + 6\omega \frac{\partial}{\partial \varphi} (\rho h) - 12\rho V_z + 12h \frac{\partial \rho}{\partial t}. \end{aligned} \quad (4)$$

Для описания осевого зазора используется функция осевого зазора:

$$h(r, \varphi) = Z_r + r \cos \varphi \operatorname{tg} \gamma_X + r \sin \varphi \operatorname{tg} \gamma_Y, \quad (5)$$

где  $r$  – радиальная координата цилиндрической системы;

$\varphi$  – окружная координата цилиндрической системы;

$Z_r$  – текущая осевая координата ротора;

$\gamma_X$  – угол между плоскостью подпятника и плоскостью торца вала в плоскости  $\varphi = 0$ ;

$\gamma_Y$  – угол между плоскостью подпятника и плоскостью торца вала в плоскости  $\varphi = \pi/2$ .

Аналитическое интегрирование уравнений движения ротора не представляется возможным ввиду отсутствия аналитических зависимостей для реакций смазочного слоя, поэтому решение данных уравнений велось путем численного интегрирования. Для численного интегрирования дифференциальных уравнений может быть принят метод Эйлера и его модификация метод Адамса-Бошфорта.

Результатами решения данного уравнения являются развертки осевых колебаний ротора

при установившемся движении для различных режимов работы опоры и условий ее нагружения.

На рисунке 3 представлены развертки осевых колебаний вала, установленного в совмещенный подшипниковый узел гидростатического типа, работающий в режиме разделения нагрузок в случае импульсного приложения внешней нагрузки, а также развертки колебаний вала при аналогичных условиях эксплуатации в случае использования одиночных постановок подшипников скольжения и качения.

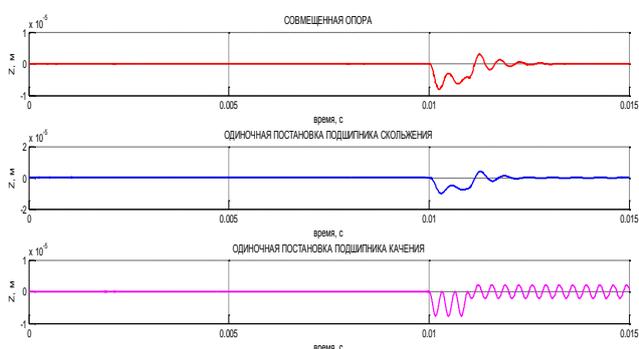


Рисунок 3 – Сравнительный анализ разверток осевых колебаний совмещенной опоры

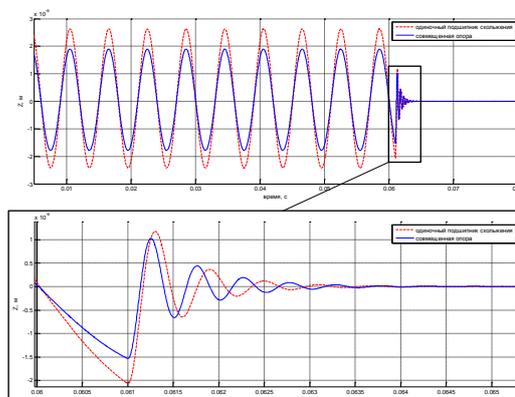


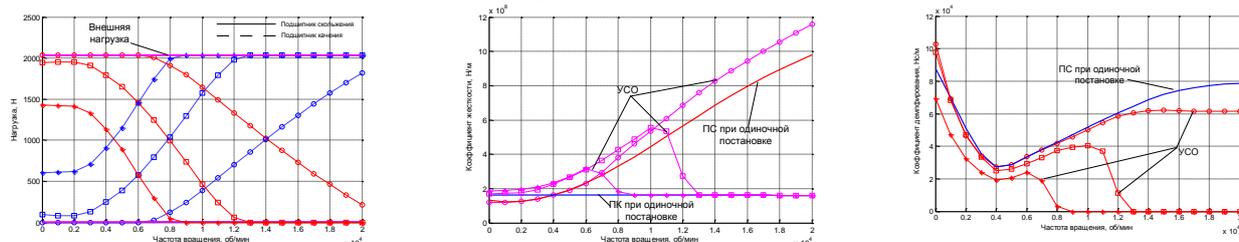
Рисунок 4 – Сравнительный анализ разверток осевых колебаний совмещенной опоры в случае возбуждения гармоническими колебаниями

Из графиков видно, что использование совмещенной опоры позволяет обеспечить более устойчивую работу опоры, а в случае динамического возбуждения снизить амплитуду колебаний вала и период их затухания по сравнению с одиночными постановками подшипников скольжения и качения.

На рисунке 4 представлены развертки осевых колебаний вала в совмещенной опоре и одиночном подшипнике скольжения при воздействии гармонической нагрузки.

Из графиков видно, что период осевых колебаний в процессе действия гармонической нагрузки совпадает для совмещенной опоры и подшипника скольжения, тогда как амплитуда колебаний для совмещенной опоры в этот период меньше. В период снятия гармонической нагрузки и стабилизации в установившемся движении период осевых колебаний совмещенной опоры сокращается, а амплитуда колебаний возрастает, что обусловлено дополнительной жесткостью подшипника качения в составе опоры.

Помимо разверток осевых колебаний показателями динамических качеств совмещенной опоры являются коэффициенты жесткости и демпфирования. На рисунке 5 представлены результаты расчета коэффициентов жесткости и демпфирования совмещенной опоры по сравнению с одиночной постановкой подшипника качения и скольжения.



а) график распределения нагрузки

б) коэффициент жесткости

в) коэффициент демпфирования

Рисунок 5 – Сравнительный анализ коэффициентов жесткости и демпфирования

○ – гарантированный зазор УСО 20 мкм; □ – гарантированный зазор УСО 30 мкм; \* – гарантированный зазор УСО 40 мкм.

Коэффициент жесткости рассматриваемой совмещенной опоры в виду параллельной схемы установки ее элементов будет равен сумме жесткостей подшипника качения и скольжения:

$$K_z^{УСО} = K_z^{ПК} + K_z^{ПС} \quad (6)$$

При определении коэффициентов демпфирования совмещенной опоры, демпфирующими свойствами подшипника качения пренебрегаем ввиду их малости по сравнению с демпфирующими свойствами подшипника скольжения на несколько порядков, таким образом, демпфирующие свойства совмещенного подшипниковый узла будут определяться коэффициентами демпфирования подшипника скольжения в составе опоры.

$$B_z^{УСО} = B_z^{ПС} \quad (7)$$

Коэффициенты жесткости  $K_z^{ПК}$   $K$  и демпфирования  $B_z^{ПС}$   $B$  находятся как соответствующие производные реакции смазочного слоя.

$$K_z^{пс} = \left( \frac{\partial R_z}{\partial Z} \right) \quad B_z^{пс} = \left( \frac{\partial R_z}{\partial \dot{Z}} \right). \quad (8)$$

Коэффициент жесткости подшипника определяется на основе контактной задачи Герца и вышеуказанной зависимости реакции подшипника качения.

$$K_z^{пк} = n \frac{3}{2} K' \delta_\Sigma^{1/2} \quad (9)$$

где  $n$  – количество тел качения;  
 $K'$  – нелинейный коэффициент жесткости подшипника;  
 $\delta_\Sigma$  – суммарная деформация подшипника качения.

$$K' = \left( \frac{1}{K_m^{2/3}} + \frac{1}{K_c^{2/3}} \right)^{-3/2} \quad (10)$$

где  $K_{m,c}$  – нелинейный коэффициент шарика в контакте с «тугим» и «свободным» кольцом подшипника качения

$$K_{m,c} = \frac{1.5}{\frac{2k^{3/2}}{\pi\mu} \eta \Sigma \rho^{1/2}} \quad (11)$$

Из графиков на рисунке 5 видно, что в режимах полного выключения подшипника скольжения или подшипника качения коэффициенты жесткости совмещенной опоры соответствуют жесткостным характеристикам соответствующих элементов опоры. В режиме разделения нагрузки коэффициент жесткости совмещенной опоры выше, чем аналогичный показатель для одиночной постановки подшипника качения и скольжения. Коэффициент демпфирования совмещенной опоры имеет значение меньшее, чем коэффициент демпфирования для одиночной постановки подшипника скольжения.

Учитывая все вышесказанное, можно говорить о том, что совмещение упорного подшипника качения и гидростатического подшипника скольжения в едином подшипниковом узле позволяет улучшить динамические качества упорного подшипникового узла, что позволяет говорить о возможности их использования в качестве опор роторных машин, когда другие способы повышения динамических качеств опор неэффективны или ограничены.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитин, А. К. Гидродинамическая теория смазки и расчет подшипников скольжения, работающих в стационарном режиме [Текст] / А. К. Никитин [и др.] – М. : Наука, 1981. – 316 с.
2. Перель, Л.Я. Подшипники качения: Расчет, проектирование и обслуживание опор: Справочник [Текст] / Л.Я. Перель, А.А. Филатов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 608 с.: ил.
3. Стручков, А.А. Повышение несущей способности, ресурса и динамических характеристик упорных узлов роторов за счет совмещения подшипников качения и скольжения. Дис... кандидата технических наук. – Орел, 2006, – 163 с.

**Спирidonov Максим Викторович**  
 ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г. Орёл, Аспирант кафедры «Мехатроника и международный инжиниринг», E-mail: [pmp1@ostu.ru](mailto:pmp1@ostu.ru). Адрес: г.Орел, Наугорское ш-се 29, тел. (4862) 41-98-49.

**Савин Леонид Алексеевич**  
 ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г. Орёл, Профессор кафедры «Мехатроника и международный инжиниринг», E-mail: [savin@ostu.ru](mailto:savin@ostu.ru). Адрес: г.Орел, Наугорское ш-се 29, тел. (4862) 41-98-49.

**Майоров Сергей Владимирович**  
 ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г. Орёл, Доцент кафедры «Мехатроника и международный инжиниринг», E-mail: [pmp1@ostu.ru](mailto:pmp1@ostu.ru). Адрес: г.Орел, Наугорское ш-се 29, тел. (4862) 41-98-49

**Стручков Александр Александрович**  
 ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г. Орёл, Доцент кафедры «Мехатроника и международный инжиниринг», E-mail: [orsaa@list.ru](mailto:orsaa@list.ru). Адрес: г.Орел, Наугорское ш-се 29, тел. (4862) 41-98-49.

M.V. SPIRIDONOV, L.A. SAVIN, S.V. MAIROV, A.A. STRYCHKOV

### THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF COMBINED BEARING SUPPORTS HYDROSTATIC TYPE

*A dynamic model and the results of calculation of dynamic characteristics of persistent combined bearing supports of hydrostatic type, which consists of the thrust ball bearing and hydrostatic bearings.*

**Keywords:** *Dynamic model of combined bearings, thrust hydrostatic bearings, thrust ball bearing, coefficients of stiffness and damping combined support.*

# **МОДЕЛИРОВАНИЕ** **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

УДК 621.83.05

А.С. КРАВЦОВ, А.А. ЧЕРЕПЕНЬКО

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СБОРОЧНЫХ УЗЛОВ С УЧЕТОМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ**

*В статье рассматривается технологическое обеспечение требуемой точности сборочных единиц с учетом эксплуатационных параметров элементарных соединений.*

*Ключевые слова: надёжность, качество, эксплуатационные свойства, износ, параметры.*

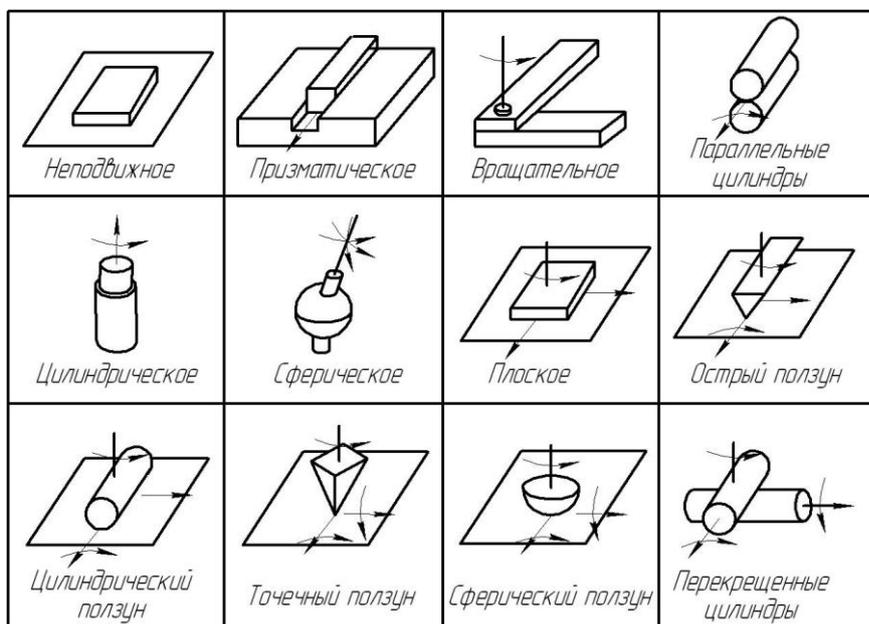
Выпуск качественной конкурентоспособной продукции с наименьшими затратами было и остается основной задачей технической подготовки производства. Качество продукции во многом определяется на этапах проектирования, изготовления и сборки. На этапе проектирования конструктор осуществляет подбор материалов контактирующих деталей, проводит отработку на технологичность, на основе расчетов на прочность и жесткость назначает номинальные функциональные размеры, назначает параметры качества функциональных поверхностей с учетом обеспечения требуемых эксплуатационных свойств, обеспечивающих работоспособность узлов и машины в целом. На этапах изготовления деталей сборочных единиц решается задача разработки технологических процессов механической обработки с выбором оборудования, инструмента, технологической оснастки и назначением режимов обработки, обеспечивающих достижение требуемых параметров точности и качества функциональных поверхностей для заданной надежности. При сборке необходимо обеспечить заданную точность замыкающего звена одним из методов, формирование посадок сопряжения, обеспечение герметичности и др. Все три этапа, входящие в общую структуру разработки и постановки продукции на производство, согласованы между собой и основным критерием оценки эффективности этих этапов, является выпуск качественной и надежной продукции. Поэтому задача конструкторско-технологического обеспечения работоспособности изделия, а в частности обеспечение эксплуатационных свойств, является важным технико-экономическим аспектом повышения эффективности производства и, как следствие, инструментом создания качественных, конкурентоспособных изделий.

В настоящий момент происходит постоянное повышение требований, предъявляемых к изделиям машиностроения. Это связано с ужесточением условий эксплуатации машин: скоростных, динамических, температурных и др. В целом надежность и долговечность деталей и узлов определяется их эксплуатационными свойствами. К ним относятся износостойкость, статическая прочность, сопротивление усталости, коррозионная стойкость и др. Правильный выбор параметров, лимитирующих работоспособность деталей и узлов, а также определение их значений является важнейшей задачей при проектировании.

Качество машин и его главный показатель - долговечность - определяются надежностью соединения деталей. Технологический аспект рассмотрения надежности соединений становится одним из важнейших и исследуется наряду с конструктивными аспектами. В свою очередь, показатели качества имеют широкие границы рассеивания. Оно может существенно изменяться даже от колебаний фактических размеров в пределах допусков. Так, например, в пределах посадки Н7/с6 натяг, а, следовательно, и прочность посадок, как один из показателей качества в диапазоне диаметров 80...100 мм меняется в 3.5 раза, а для посадки Н7/р6 в 7 раз.

Если учесть также, что в ходе сборки возникают различные отклонения (положения, формы, соосности и др.), которые могут сохраняться и усугубляться при эксплуатации машины, то очевидно, что рассеяние показателей качества возрастает еще больше. Эти факты свидетельствуют о том, что колебания показателей качества, как соединений, так и машин одного и того же конструктивного исполнения определяются технологическими причинами при сборке.

Проанализировав возможные подходы к классификации соединений, была предпринята попытка объединить их положительные стороны, сделав упрощенную обобщенную классификацию сборочных соединений, с добавлением необходимых параметров качества для каждого соединения. За основу взята идея классификации соединений с учетом контакта поверхностей, их кинематической подвижности.



**Рисунок 1 – Классификация соединений**

Данная классификация охватывает большую часть встречающихся типов соединений. С добавлением функциональных зависимостей между эксплуатационными свойствами и параметрами качества, к каждому классу встречающихся типов сборочных соединений, становится, возможно, рассчитать получаемый эксплуатационный параметр, частично влиять на него, через изменения параметров качества поверхности.

Долговечность и работоспособность узла и машины в целом определяется заданными конструктором эксплуатационными свойствами, такими как износостойкость, коррозионная стойкость, усталостная прочность и др. В свою очередь эксплуатационные свойства характеризуются набором эксплуатационных показателей. Так, для износостойкости основным показателем является интенсивность изнашивания, величина начального износа, значение и величина контактного сближения трущихся поверхностей; коррозионная стойкость определяется показателем интенсивности кародирования, величина и запас микрогальванонапряжений и т.д.

Все эксплуатационные показатели зависят от параметров качества поверхностного слоя, т.е. необходимое значение любого эксплуатационного параметра может быть выражено набором показателей качества. Параметры качества поверхности обеспечиваются на стадиях конструкторской и технологической подготовки производства (отделочной или отделочно-упрочняющей обработки за счет выбора технологом методов, инструментов, оборудования, оснастки и режимов финишной обработки). Качество поверхности определяется её геометрическими характеристиками, физико-механическими и физико-химическими свойствами поверхностного слоя [1, 2, 3, 4, 5, 6 и др.].

Основной показатель качества машин – надежность – в значительной мере определяется эксплуатационными свойствами деталей и их соединений. Эти свойства количественно оценивают с помощью эксплуатационных показателей, таких, как податливость, интенсивность износа, коррозионные потери и т.п.

В настоящее время выполнено большое число работ, устанавливающих связь контактной жесткости с параметрами качества поверхности [7, 8, 9, 10]. В них под контактной жесткостью  $j$ , понимается, способность контактирующих тел сопротивляться действию сил, стремящихся их деформировать. Величину, обратную контактной жесткостью, называют податливостью стыка.

Показатели качества машин в значительной мере определяются эксплуатационными свойствами деталей и их соединений. Эти свойства количественно оценивают с помощью эксплуатационных показателей, таких, как податливость, интенсивность износа, коррозионные потери и т.п.

Основные положения и методика расчета поверхностей на трение, износ, при скольжении изложены в литературе. Зависимость для расчета величины интенсивности изнашивания в период приработки и нормального изнашивания, предложена Сусловым А.Г.:

Приработка:

$$I_h = \frac{1.2 \cdot Ra^{2/3}}{n \cdot \lambda \cdot Sm \cdot tm^{3/2}} \cdot \left( \frac{p}{H\mu_0} \right)^{7/6} \cdot$$

$$\sqrt{15 \cdot \pi \cdot (2 \cdot \pi \cdot Wz \cdot H \max)^{1/3} \cdot \left[ 1 + \frac{2 \cdot \pi \cdot H\mu_0 \cdot (1 - \mu^2)}{E} \right]}$$

Нормальное изнашивание:

$$I_h = \frac{1.2 \cdot \pi \cdot p^{7/6}}{n \cdot \lambda \cdot tm^{3/2} \cdot H\mu_0^{3/2}} \sqrt{\frac{30 \cdot (1 - \mu^2) \cdot (2 \cdot \pi \cdot Ra \cdot Wz \cdot H \max)^{1/3}}{E \cdot Sm}}$$

где  $Ra$  – среднее арифметическое отклонение профиля, мкм;  
 $Wz$  – средняя высота волнистости по десяти точкам, мкм;  
 $H \max$  – максимальная величина макроотклонений формы поверхности, мкм;  
 $tm$  – относительная опорная длина профиля на уровне средней линии;  
 $Sm$  – средний шаг неровностей, мкм;  
 $\lambda$  – коэффициент, учитывающий знак и значение остаточных напряжений;  
 $\sigma_T$  – величина остаточных напряжений, МПа;  
 $k$  – коэффициент упрочнения;  
 $p$  – давление, МПа;  
 $n$  – число циклов воздействия до разрушения поверхностного слоя;  
 $E, \mu$  – механические свойства материала заготовки.

Данная формула показывает, что износостойкость деталей машин характеризуется комплексным состоянием поверхностей трения. Несущая способность поверхности деталей, их коэффициент трения и интенсивность изнашивания при трении скольжения наряду с шероховатостью определяются макро отклонением, волнистостью и физико-механическими свойствами (микро твёрдость и остаточные напряжения). Достижение так называемой равновесной шероховатости, зависящей только от условий трения, возможно после длительного процесса работы узла трения, когда будут стабилизированы все параметры состояния поверхностного слоя контактирующих деталей.

Воспользовавшись решением уравнение, выведенным Сорокиным С.В., относительно параметров состояния поверхностного слоя, с учетом требований по возможности метрологического контроля, технологического управления и приоритетность параметров качества влияющих на износостойкость, получаем:

$$I_h \cdot C_M = C_R$$

где  $C_R$  – комплексный параметр, характеризующий зависимость интенсивности изнашивания поверхности от параметров качества поверхностного слоя;

$C_M$  – комплексный параметр, зависящий от механических свойств материала контактирующей детали:

$$C_R = \frac{(Wz \cdot H \max)^{1/6}}{Sm^{0.5} \cdot \lambda \cdot (k \cdot \sigma_T)^{2/3}} \cdot Ra^{2/3} \cdot (Rp - Ra)^{0.5}$$

$$C_M = \frac{n}{43.47 \cdot (p \cdot \pi)^{7/6}} \cdot \sqrt{\frac{E}{1 - \mu^2}}$$

Таким образом, полученное, преобразованное уравнение, при обеспечении равных значений составляющих комплексного параметра  $C_M$  (одинаковые свойства материалов, одинаковая схема нагружения, равные условия работы узлов трения и т.д.) для обеспечения равновесного состояния поверхностного слоя и, как следствие, максимального сокращения периода приработки достаточно варьировать параметрами качества поверхностного слоя, входящими в параметр  $C_R$ .

В основе проведенных исследований лежит системный подход к проблеме технологического обеспечения качества сборочных узлов. При выполнении исследований и реализации поставленных задач использовались научные положения теории автоматизированного проектирования, основные положения технологии машиностроения, качества деталей машин, теории контактного взаимодействия деталей, молекулярно-механической теории тре-

ния и изнашивания, теоретический и практический материал по технологическому обеспечению эксплуатационных свойств. Все расчеты велись на аппарате дифференциального и интегрального исчисления, современной статистической теории и методологии.

Практической значимостью данной работы является разработка структурной схемы автоматизированного расчета качества сборочных узлов, на основе математических и структурных моделей расчета эксплуатационных свойств элементарных кинематических соединений, с выбором технически обоснованных предельных размеров и технологически достижимых параметров качества поверхностей контактирующих деталей.

Вывод: проведенные исследования позволяют обеспечить требуемую надёжность узлов деталей машин, с учётом изменения размерных и качественных показателей соединений в процессе эксплуатации.

Статья подготовлена по материалам доклада на VI Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Машинам быть долговечными. Алексеев П.Г. Тула: Приок. кн. изд.-во, 1973 г., 130 с.
2. Шероховатость поверхности и методы ее оценки. Виттенберг Ю.Р. Л.: Судостроение, 108 с.
3. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. Дунин – Барковский И.В., Карташова А.Н. М.: Машиностроение, 1978 г., 232 с.
4. Повышение надежности машин. Елизаветин А.М. М.: Машиностроение, 1968 г., 267 с.
5. Надежность машин. Проников А.С. М.: Машиностроение, 1978 г., 592 с.
6. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств машин. Рыжов А.В., Суслов А.Г., Федоров В.П. М.: Машиностроение, 1979 г., 176 с.
7. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. Демкин Н.Б. М.: Наука, 1970 г., 227 с.
8. Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей. Рудзит Я.А. Рига: Зинатне, 1975 г., 210 с.

**Кравцов Александр Сергеевич**  
Магистрант ФГБОУ ВПО «Брянский  
государственный технический университет»  
Тел: 8-919-290-99-53  
E-mail: partyzan32@yandex.ru

**Черепенько Аркадий Анатольевич**  
Доктор технических наук, профессор.  
ФГОУ ВПО «Государственный университет-  
учебно-научно-производственный комплекс»  
Тел: (4862) 54-14-51  
E-mail: af@au.ru

A. S. KRAVCOV

### TECHNOLOGY TO ENSURE RELIABILITY OF ASSEMBLIES WITH OPERATIONAL CHANGES IN THE PROCESS

*Experience of development technological support required precision assembly units with operational parameters of elementary connections.*

**Keywords:** *reliability, quality, performance characteristics, wear parameters*

### BIBLIOGRAPHY

1. Machines to be durable. Alekseev PG Tula Priok. Prince. ed.-in, 1973, 130 p.
2. Surface roughness and the methods of evaluation. Wittenberg YR Leningrad Shipbuilding, 108.
3. Measurement and analysis of roughness, waviness and roundness of the surface. Dunin - Barkovsky IV, A. Kartashov Mashinostroenie, Moscow, 1978, 232 p.
4. Improving the reliability of machines. Elizavetin AM Mashinostroenie, Moscow, 1968, 267 p.
5. Reliability of machines. Penetrating AS Mashinostroenie, Moscow, 1978, 592 p.
6. Engineering support of operational properties of machines. Ryzhov AV Suslov AG, VP Fedorov Mashinostroenie, Moscow, 1979, 176 p.
7. Contacting rough surfaces. NB Dyomkin Nauka, Moscow, 1970, 227 p.
8. Microgeometry and contacts the surface. Rudzite YA Riga Zinatne, 1975, 210 p.

**Kravcov Aleksandr Sergeevich**  
Magistrant of Bryansk State Technical University  
Phone: 8-919-290-99-53  
E-mail: partyzan32@yandex.ru

**Cherepenko Arkadiy Anatolievich**  
Doctor of Technical Sciences, Professor.  
Polikarpov Technological Institute  
FSEI HVT «State University – ESPC», Orel  
Tel: (4862) 54-14-51  
E-mail: af@au.ru

## **СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ С ПОМОЩЬЮ ПЕРИОДИЧЕСКИ ПОВЕРХНОСТНОРАСПОЛОЖЕННЫХ ТУРБУЛИЗАТОРОВ ПОТОКА ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ**

*В статье рассматривается исследование структуры турбулентного потока в трубе, в которой требуется интенсифицировать теплоотдачу. Эта проблема особенно актуальна при проектировании современных высокоэффективных энергетических установок, а также при создании авиационных и ракетно-космических двигателей нового поколения. Увеличение интенсификации теплообмена в каналах высоконагруженных двигательных установок позволяет повысить эффективность рабочего цикла. Данное исследование направлено на рассмотрение возможности максимального увеличения интенсивности турбулентных пульсаций в определённых областях потока, где это даёт наибольший интенсификационный эффект. В целях эффективного использования отрывных зон необходимо знать сложные механизмы их взаимодействия с основным турбулентным потоком и процессы, происходящие в самой отрывной зоне.*

**Ключевые слова:** структура потока, вихревые зоны, интенсификация теплообмена, математическое моделирование

Основной целью данной работы является теоретическое исследование вышеуказанных вихревых зон для труб с турбулизаторами прямоугольного поперечного сечения с помощью факторизованного конечно-объёмного метода, который был успешно апробирован при расчёте подобных течений, когда основной упор делается на расчёт осреднённых параметров интенсифицированного течения и теплообмена. Достаточно рассмотреть частный случай прямоугольного поперечного сечения турбулизаторов — квадратное сечение, поскольку оно может применяться для интенсификации теплообмена, когда увеличение сопротивления не является принципиально важным. Для турбулизаторов другой ширины закономерности будут сходными, за исключением крайних случаев — для других случаев интенсификации структура вихревых зон имеет качественно сходный характер. Такого рода интенсификация неэффективна при применении относительно высоких турбулизаторов при малых шагах между ними, поскольку особенно удлиняется рециркуляционная зона, что дополнительно увеличивает потери и снижает интенсификацию теплообмена даже в случае относительно низких выступов при прочих равных условиях. Для прямоугольных турбулизаторов с относительно большим шагом между ними генерируется система двух вихрей: до выступа и за ним. На верхней границе вихрей и между ними существует зона высокой интенсивности турбулентности в непосредственной близости к стенке. При обтекании перед выступом возникают систематические вихреобразования, на поддержание которых и диссипацию энергии идут ощутимые потери энергии. Доказано, что малый шаг между турбулизаторами приводит к слиянию вихрей и ухудшению теплоотдачи из-за большего влияния угловых зон с низкой теплоотдачей, а увеличение шага способствует удельному росту доли поверхности между вихрями, где дополнительная турбулизация успевает заметно затухнуть. Превалирование выработки турбулентности над диссипацией имеет место в основном на удаленной от стенки границе вихревой зоны, где градиент скорости, а также турбулентные напряжения максимальны. При интенсификации теплообмена турбулизаторами прямоугольного поперечного сечения, т.е. резких очертаний (рис. 1), диссипация энергии, возникающая в мощных вихрях до выступов и за ними, может быть сравнима с выработкой турбулентности в них, что обуславливает увеличенные гидравлические потери.

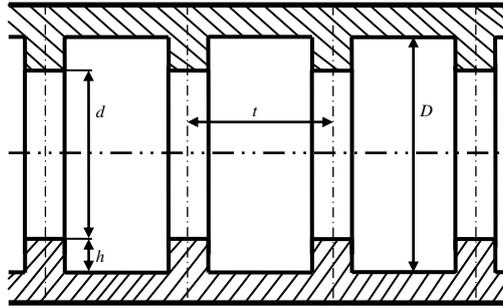


Рисунок 1 - Основные геометрические параметры турбулизаторов

Применение турбулизаторов прямоугольного поперечного сечения может иметь место в случае, когда повышение теплоотдачи важнее увеличения гидравлических потерь. В том случае, когда необходима минимизация гидравлических потерь, нужно переходить к турбулизаторам гладких (плавных) очертаний (максимум выработки турбулентности располагается примерно на уровне верхней границы выступа), где гидравлические потери много меньше.

Структура интенсифицированного потока при относительно малом шаге между турбулизаторами  $t/d=0.25\div 0.50$  для относительных высот турбулизаторов  $d/D=0.90\div 0.94$

В данной работе не рассматриваются случаи малого шага между турбулизаторами, когда высота турбулизаторов соизмерима с расстоянием между ними. Этот случай характерен для труб с канавками, а применение канавок менее эффективно по сравнению с прямоугольными турбулизаторами для интенсификации теплообмена в круглых трубах [1].

На рисунке 2 показаны линии тока для трубы с турбулизаторами при  $Re=10^4$ ;  $d/D=0.94$ ;  $t/D=0.25$  для воздуха. Как отмечалось в [2] на основе экспериментальных данных при очень коротком шаге между турбулизаторами (как для труб с канавками) наблюдается один большой вихрь и два маленьких в углах.

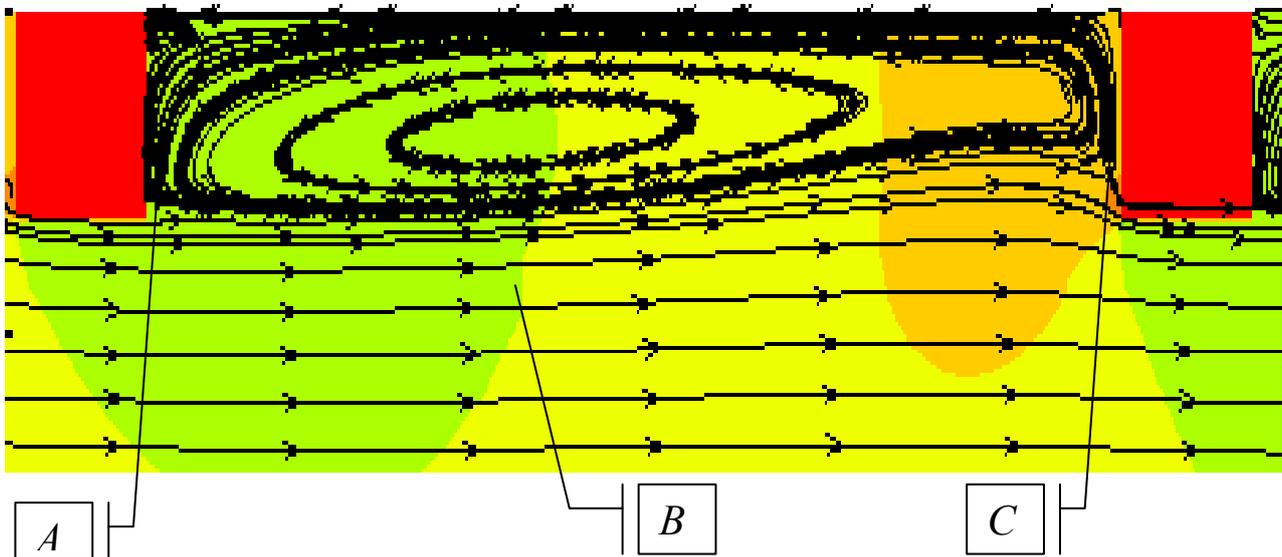


Рисунок 2 - Линии тока для случая ( $Re=10^4$ ;  $d/D=0.94$ ;  $t/D=0.25$ , воздух)

При увеличении шага между турбулизаторами основной вихрь **B** растягивается, увеличивается вихрь **A** и появляется небольшой угловой вихрь **C**. Вихрь **B** становится гораздо менее стабильным по сравнению со случаем малого шага между турбулизаторами. Имеет место также небольшой отрыв потока за передней верхней кромкой турбулизатора на его верхней границе.

Теперь следует подробнее остановиться на общих аспектах структуры потока до турбулизатора и за ним.

Торможение потока перед турбулизатором вызывает повышение давления, которое при дозвуковом потоке распространяется вверх по потоку. Пограничный слой перед турбулизатором вплоть до точки отрыва развивается в условиях положительного градиента давления.

Наличие трения в пограничном слое приводит к уменьшению полного давления газовой струи. Оставшейся кинетической энергии частиц газа, движущихся вблизи стенки, недостаточно для преодоления всей области повышенного давления. На определенном расстоянии от турбулизатора частицы газа, израсходовав весь запас кинетической энергии, полностью затормаживаются, и пограничный слой полностью отрывается от поверхности. Оторвавшийся пограничный слой присоединяется к поверхности турбулизатора на некотором расстоянии от его вершины. Струи, расположенные ниже определенной линии тока, не могут преодолеть повышенного давления, и начинают двигаться к основанию турбулизатора, образуя область рециркуляционного течения. Внутри рециркуляционной зоны поток движется к основанию турбулизатора сначала в области отрицательного градиента давления, а затем на некотором расстоянии от основания поток тормозится с ростом давления.

При течении за турбулизатором пограничный слой отрывается от кромки, а затем присоединяется к поверхности, образуя за турбулизатором рециркуляционную область. В отрывном, или рециркуляционном, течении часть потока движется в прямом, а ближе к основанию турбулизатора – в обратном направлении.

Обратное течение также можно подразделить на ядро потока и пограничные слои. Один пограничный слой образуется в результате взаимодействия течений, движущихся в прямом и обратном направлениях, а у стенки — при взаимодействии газа с твердой поверхностью.

Скорость газа в ядре обратного течения возрастает от нуля до максимального значения и затем уменьшается. При натекании на турбулизатор обратный поток тормозится, пограничный слой под действием положительного градиента давления отрывается и присоединяется на вертикальной стенке турбулизатора. В углу турбулизатора генерируется ещё одна зона отрыва.

Так происходит течение теплоносителя до турбулизатора и за ним.

Далее рассматриваем линии тока для канала с турбулизаторами при  $Re=10^4$ ;  $d/D=0.94$  для воздуха, но при большем шаге  $t/D=0.50$ .

На рисунке 3 показаны линии тока именно для этих условий. Здесь основной вихрь становится меньше, и он располагается ближе к турбулизатору и к стенке. Угловые вихри до и за турбулизатором становятся более выраженными, чем при  $t/D=0.25$ .

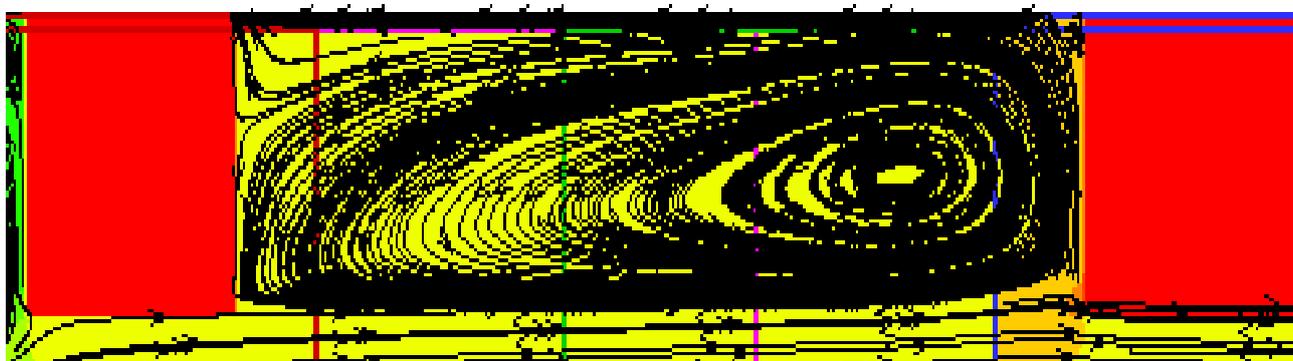


Рисунок 3 - Линии тока для случая ( $Re=10^4$ ;  $d/D=0.94$ ;  $t/D=0.5$ , воздух)

Следовательно, случай  $t/D=0.50$  более выгоден для интенсификации теплообмена, чем  $t/D=0.25$  при прочих равных условиях.

При рассмотрении линий тока для трубы с турбулизаторами при  $Re=10^4$ ;  $t/D=0.50$  для воздуха, но для более высоких турбулизаторов  $d/D=0.90$  видно, что основной вихрь между

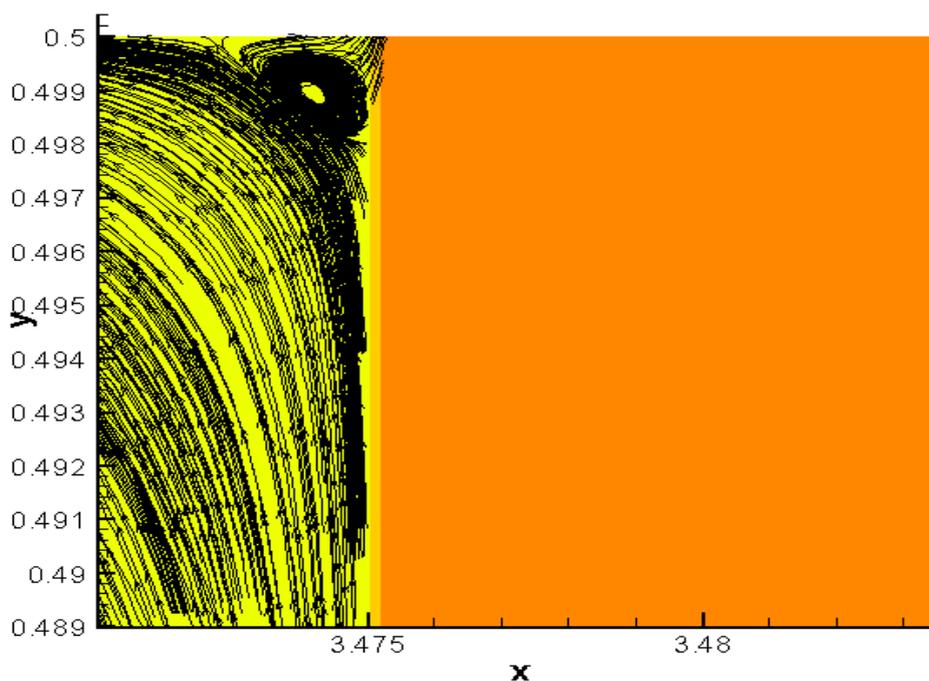
турбулизаторами смещается в направлении потока и деформируется следующим турбулизатором, что указывает на снижение интенсификации теплообмена по сравнению с более низкими турбулизаторами. Угловые вихри до и после турбулизатора с  $d/D=0.90$  также увеличиваются. Особенно удлиняется рециркуляционная зона после турбулизатора, что дополнительным образом увеличивает потери и снижает интенсификацию теплообмена даже по отношению к случаю с  $d/D=0.94$  при прочих равных условиях. Следовательно, интенсификация теплообмена неэффективна при высоких турбулизаторах с малым шагом между ними.

Отметим, что при малом шаге между турбулизаторами образующийся за прямоугольным турбулизатором вихрь увеличивает турбулентность потока далеко за турбулизатором и далеко от стенки трубы, что малоэффективно.

Структура интенсифицированного потока при большом шаге между турбулизаторами  $t/d=1.00$  для относительных высот турбулизаторов  $d/D=0.90 \div 0.94$

В предыдущем разделе были рассмотрены линии тока для турбулизаторов с  $d/D=0.90$  с малым шагом между ними и была теоретически доказана их неэффективность с точки зрения интенсификации теплообмена. Для повышения эффективности интенсификации надо увеличивать шаг между турбулизаторами прямоугольного поперечного сечения.

На рисунке 4 показана структура потока для турбулизаторов прямоугольного сечения при  $Re=10^4$ ;  $d/D=0.90$ ;  $t/D=1.00$  для воздуха. Видно обратное течение от задней кромки верхней грани турбулизатора, достигающее его середины.



*Рисунок 4 - Структура потока при ( $Re=10^4$ ;  $d/D=0.90$ ;  $t/D=1.00$ , воздух)*

Можно выделить три характерные области в зоне отрыва.

1. Главная зона отрыва простирается до сечения присоединения потока, в котором еще заметен обратный ток в зону отрыва. Длина этой зоны нестабильна и колеблется в пределах половины высоты турбулизатора.

2. Длина двумерной зоны отрыва ограничивается сечением, в котором становится заметным локальное течение пристенного слоя вниз по течению от зоны отрыва. Вытянутый двумерный вихрь достигает верхней части задней кромки турбулизатора.

3. Виден небольшой угловой вихрь за турбулизатором. Перед турбулизатором снова образуется отрывная зона, которая также относительно нестабильна и колеблется, достигая половины высоты турбулизатора. На внешней границе зоны происходит интенсивное

турбулентное перемешивание. Внутри отрывной зоны существует область двумерного вихря. Наблюдается также небольшой угловой вихрь.

Полученные расчётные данные позволили установить, что между зонами отрыва генерация турбулентности происходит так же, как и в гладком канале. Около стенки в зоне больших градиентов скорости в результате потери устойчивости потока наблюдается генерация вихревых структур, выходящих за вязкий и буферный слои – как и на гладкой стенке.

При дальнейшем увеличении шага между турбулизаторами  $t/h$  размер вихревых зон растёт, не приводя к качественному изменению их структуры, что подтверждается расчётными данными для  $Re=10^4$ ;  $d/D=0.94$ ;  $t/D=1.00$  для воздуха и экспериментальными данными, приведенными в [1].

Таким образом, для прямоугольных турбулизаторов с большим шагом между ними возникает система двух вихрей: до и за выступом. На верхней границе вихрей и между ними существует зона с высокой интенсивностью турбулентности в непосредственной близости к стенке. Перед выступом возникают систематические вихреобразования, на поддержание которых и диссипацию энергии в них расходуется значительная часть энергии потока.

Как показали теоретические данные, приведенные в двух последних разделах, малый шаг между турбулизаторами приводит к слиянию вихрей в один и ухудшению теплоотдачи из-за большего влияния угловых зон с низкой локальной теплоотдачей, а увеличение шага между турбулизаторами увеличивает расстояние между вихрями, и дополнительная турбулизация успевает заметно затухнуть.

Как показали расчётные данные по структуре интенсифицированного потока, представленные в работе, отрывные зоны и организованные вихревые структуры являются эффективным средством дополнительной выработки турбулентности в потоке, а следовательно интенсификации теплообмена.

Структура вихревых зон до и после выступа в значительной мере зависит от его геометрии и режима течения теплоносителя. Превалирование выработки турбулентности над диссипацией имеет место, в основном, на удаленной от стенки границе вихревой зоны, где градиент скорости, а также турбулентные напряжения, максимальны.

При интенсификации теплообмена турбулизаторами прямоугольного поперечного сечения, т.е. резких очертаний, диссипация энергии, возникающая в мощных вихрях до них и за ними, может быть сравнима с выработкой турбулентности в них, что обуславливает увеличенные гидравлические потери.

Статья подготовлена по материалам доклада на VI Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. — М.: Машиностроение, 1990. — 208 с.
2. Эффективные поверхности теплообмена Э.К.Калинин, Г.А.Дрейцер, И.З. Копп и др. — М.: Энергоатомиздат, 1998. — 408 с.

### **Лобанов Игорь Евгеньевич**

Доктор технических наук, в.н.с. ПНИЛ-204 Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)

Тел: +74991584314,

E-mail: [loobbaannooff@live.ru](mailto:loobbaannooff@live.ru)

### **Антюхов Илья Владимирович**

Н.с. ПНИЛ-204

Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)

Тел: +7 499 1584893

E-mail: [cryogen204@mai.ru](mailto:cryogen204@mai.ru)

I.E. LOBANOV, I.V. ANTYUKHOV

## **THE MODERN PROBLEMS OF INTENSIFICATION OF HEAT TRANSFER IN CHANNEL WITH THE TURBULATORS RECTANGULAR CROSS-SECTION**

*Carried out mathematical modeling of the structure of the vortex zone located between the periodic surface turbulence flow of semi-circular and square cross-section based on the multi-block computational technologies based on solving the factorized finite-volume method of the Reynolds equations (closed with the transport model Menter shear stress) and the energy equation (at different scale overlapping structured grids). This method has previously been successfully applied and verified by experiments in [1—2]. An exhaustive analysis of the stream lines, proving the advantage of blunt turbulence.*

**Keywords:** *flow structure, vortex zone, heat transfer intensification, mathematical modeling*

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Kalinin E.K, Dreitser G.A., Yarho S.A. Heat Transfer Intensification in Chanals — M.: Masinostroenie, 1990. — 208 pp.
2. The Effective Heat Transfer Surfaces Kalinin E.K, Dreitser G.A., Kopp I.Z. and other — M.: Energoatomizdat, 1998. — 408 pp.

#### **Lobanov Igor Evgenevich**

Doc. Tech. Sc., Chief Scientist PNIL-204  
Moscow Aviation Institute  
(National Research University)  
Phone +7 499 158 43 14  
E-mail: [lloobbaannoff@live.ru](mailto:lloobbaannoff@live.ru)

#### **Antyukhov Ilya Vladimirovich**

Scientist PNIL-204  
Moscow Aviation Institute  
(National Research University)  
Phone +7 499 158 48 93  
E-mail: [cryogen204@mai.ru](mailto:cryogen204@mai.ru)

---

УДК 621.822  
УДК 621.98.019

А.В. ПРОСЕKOBA, А.Ю. РОДИЧЕВ, Л.А. САВИН,  
А.Н. ФИЛАТОВ, П.В. ПАВЛИКОВ

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЦЕНТРОБЕЖНО-ИНЕРЦИОННОГО НАКАТЫВАНИЯ ПОД НАНЕСЕНИЕ АНТИФРИКЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ**

*В статье рассмотрено моделирование процесса центробежно-инерционного накатывания поверхности под напыление антифрикционного материала в программе DEFORM-3D. Проведены теоретические и экспериментальные исследования величины подъема металла после прохода роликов.*

**Ключевые слова:** подшипник скольжения, центробежно-инерционное накатывание, накатные ролики, поверхностно-пластическое деформирование, подъем металла

Тенденция последних лет в производстве подшипников скольжения ориентирована на создание биметаллических опор. Преимущества таких подшипников заключается в снижении затрат на их изготовления, достижение требуемой жесткости при сохранении антифрикционных свойств, удобства ремонта и обслуживания. Однако, при нанесении покрытия на гладкую поверхность могут наблюдаться не желательные процессы такие как «сползание» покрытия. Подобные дефекты связаны с нарушением технологии изготовления или с неправильной эксплуатации. Учитывая этот факт, задачей инженеров заключается в повышение прочности сцепления антифрикционного покрытия для обеспечения наилучшего функционирования подшипников скольжения. Одним из решений поставленной задачи является усовершенствование способов подготовки поверхности под напыление и учет свойств поверхностного слоя.

Опорная поверхность новой или восстанавливаемой детали предварительно обрабатывается на токарном станке, на которую затем наносится микрорельеф сдвоенными роликами центробежно-инерционным накатыванием с помощью специального инструмента (рис. 1). Хвостовик 1 устанавливают в патрон вертикально-расточного или вертикально-сверлильного станка под прямым углом к обрабатываемой поверхности накатными роликами 10 и 11, треугольные зубья которых внедряются в поверхность заготовки. Врезание роликов на полную глубину осуществляется за 5÷6 об. детали без включения подачи при максимальном числе оборотов шпинделя станка. Накатывание проводится за один проход с подачей 2÷3 мм/об. Четыре сдвоенных ролика следуют друг за другом, направление зубьев которых чередуется. При внедрении зубьев роликов 10 и 11 деформируется поверхность заготовки, и деформированный металл вытесняется и распределяется по поверхности.

Основной задачей моделирования поверхности заготовки после накатывания является установление зависимости между режимами обработки и геометрическими параметрами получаемой поверхности. В качестве главного геометрического параметра важен, диаметр поверхности после накатывания и влияние глубины регулярной неровности на подъем металла приводящего к изменению диаметра поверхности. Для более полного представления о процессе, происходящем при пластическом деформировании основы во время накатывания, был смоделирован процесс нанесения микрорельефа на внутреннюю поверхность подшипника скольжения с помощью программного комплекса DEFORM-3D. Объемная модель устройства для накатывания, с двумя накатными роликами с правой и левой насечкой выполнены в системе Inventor (рис. 6, 7).

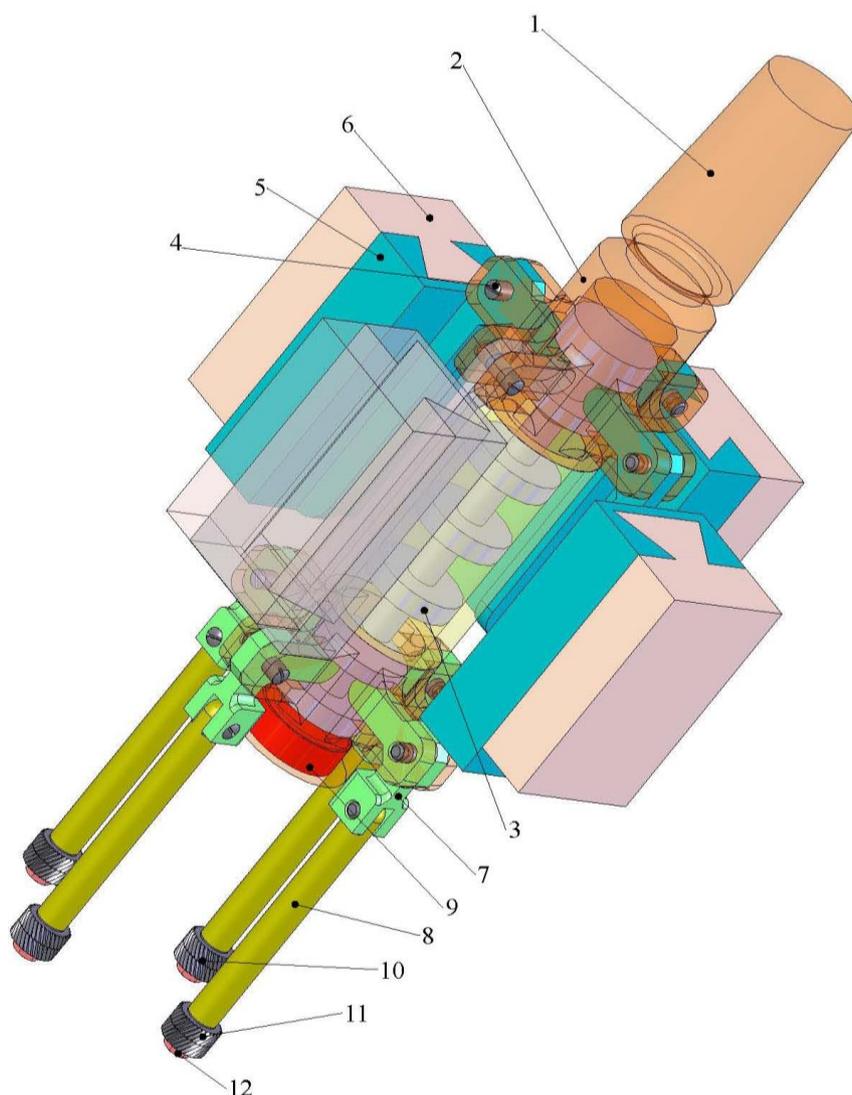


Рисунок 1 – Общий вид устройства



а



б

Рисунок 2 – Двойные ролики

а – с правой насечкой; б – с левой насечкой

В соответствии с расчетными данными внутренний диаметр заготовки перед накатыванием на внутреннюю поверхность профиля составляет  $\varnothing 91,8$  мм. Для сокращения количества конечных элементов с целью упрощения расчетов и получения более точных результатов принимаем ширину втулки 11 мм что оставляет  $\frac{1}{4}$  ширины детали (рис. 3). Импортируем заготовку в программный комплекс DEFORM-3D и с помощью данной программы проверяем ее геометрию. Материал выбираем из базы данных программного комплекса – AISI-1020, № 3 - 2 (299) 2013

холодное деформирование (аналог стали 20 ГОСТ8731-74), тип объекта – пластичный, температура 20°C. Формируем конечно-элементную сетку для заготовки, для чего разбиваем ее на 500000 элементов, в результате чего формируются 100150 узлов и 10400 поверхностных многоугольников. Импортируем в задачу накатные ролики, описанные выше.

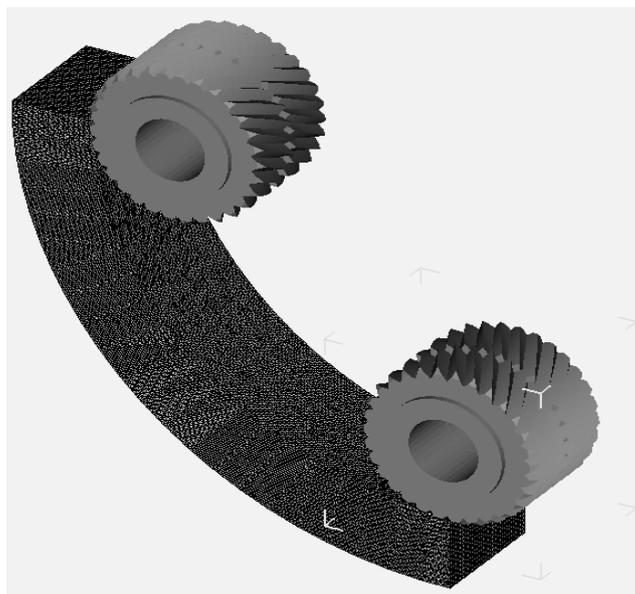


Рисунок 3 – Заготовка со сформированной конечно-элементной сеткой (500000 элементов)

Затем задаем вращение ролика №1 и ролика №2 относительно своей оси. Назначаем расчетное число шагов, коэффициент точности вычисления. Расчетное число шагов принимаем – 250, коэффициент точности – 0,001. Устанавливаем взаимодействие между заготовкой и накатными роликами. Назначаем фактор трения из стандартного ряда, предусмотренного программой 0,12 (сталь по стали). Поскольку деформации инструмента при накатывании незначительные, принимаем накатные ролики абсолютно жесткими. Создаем задачу для расчета и запускаем расчет (рис. 4).

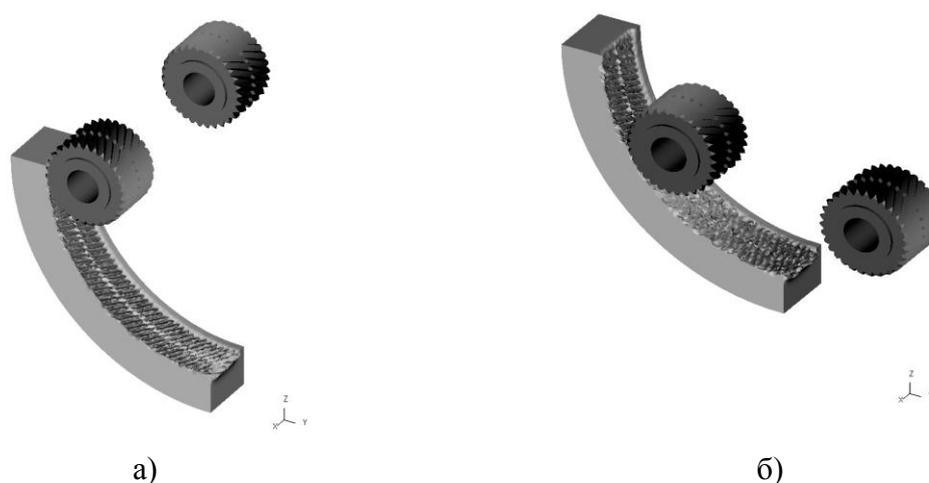
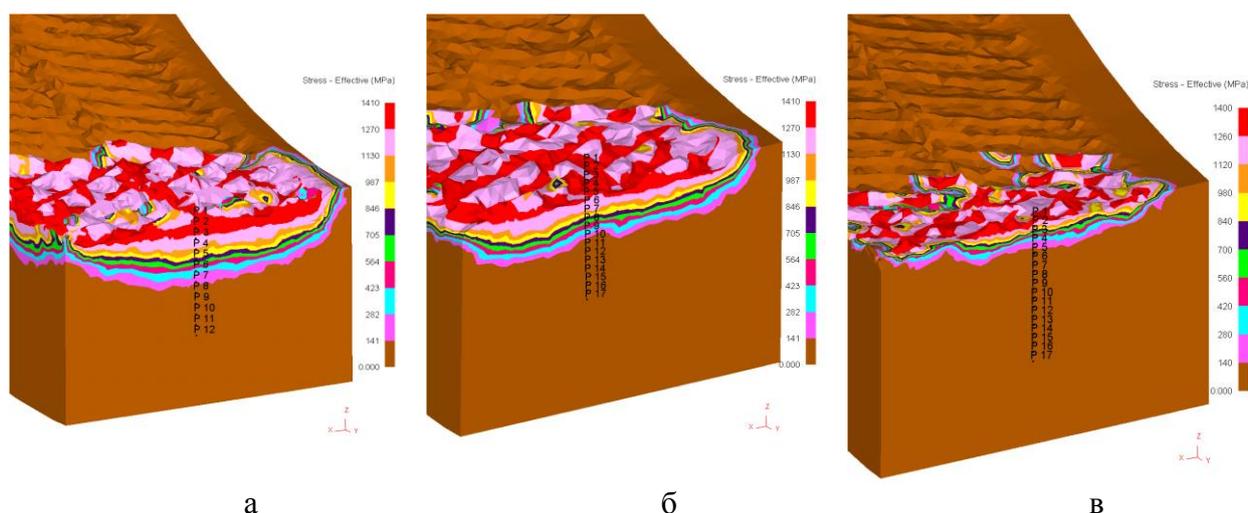


Рисунок 4 – Поверхность заготовки  
а) – после прохода ролика №1, б) – после прохода ролика №2

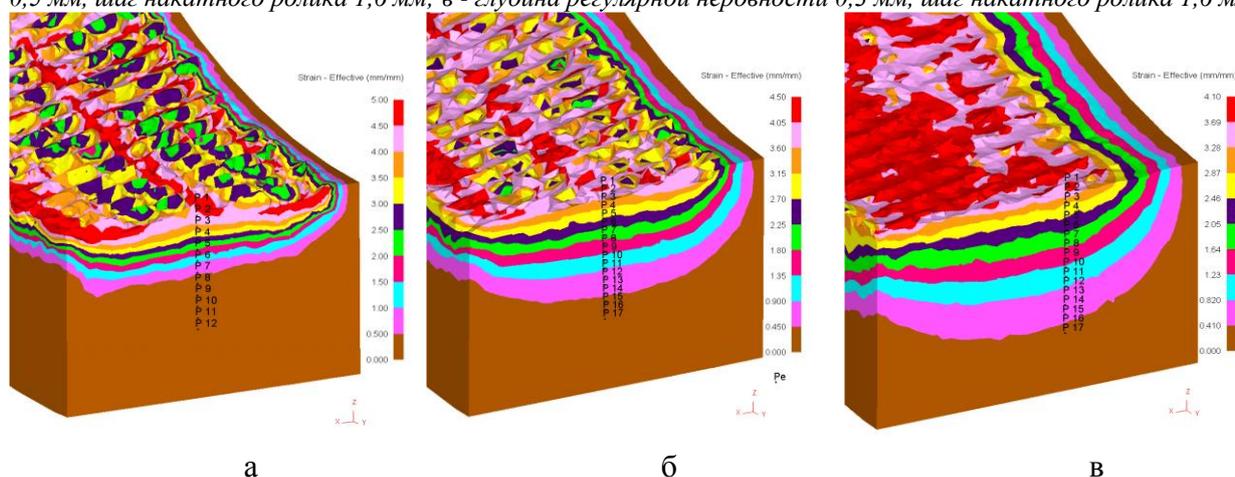
Характер и величина эквивалентных напряжений свидетельствует, что максимальные значения приходятся на поверхность в месте внедрения зуба накатывающего инструмента, и достигают максимальной величины  $\sigma=1299$  МПа при глубине регулярной неровности  $h=0,7$

мм, шаге накатного ролика  $t=2$  мм. Эквивалентные деформации при накатывании позволяют судить о возможном повышении микротвердости и степени упрочнения исходного материала детали (рис. 5). Эквивалентные деформации распределяются в зависимости от глубины регулярной неровности, достигая максимального значения  $\varepsilon=4,6$ , а глубина упрочнения превышает 4 мм (при глубине регулярной неровности  $h=0,7$  мм, шаге накатного ролика  $t=1,6$  мм) (рис. 6). Характер упрочнения неравномерен, наиболее упрочненными являются участки, расположенные на вершинах, при удалении от поверхности степень упрочнения снижается. Также были построены графики распределения эквивалентных напряжений по глубине от различных параметров (рис. 7-9).



**Рисунок 5 - Поля эквивалентных напряжений  $\sigma$ , возникающих по глубине**

*а - глубина регулярной неровности 0,7 мм, шаг накатного ролика 1,6 мм; б - глубина регулярной неровности 0,5 мм, шаг накатного ролика 1,6 мм; в - глубина регулярной неровности 0,3 мм, шаг накатного ролика 1,6 мм*



**Рисунок 6 – Поля эквивалентных деформаций  $\varepsilon$ , возникающих по глубине**

*а - глубина регулярной неровности 0,7 мм, шаг накатного ролика 1,6 мм; б - глубина регулярной неровности 0,5 мм, шаг накатного ролика 1,6 мм; в - глубина регулярной неровности 0,3 мм, шаг накатного ролика 1,6 мм*

Из графиков видно, что наибольшее влияние на величину эквивалентных напряжений оказывает изменение глубины регулярной неровности, шаг накатного ролика влияет в меньшей степени, а шаг смещения зубьев накатного ролика оказывает наименьшее влияние.

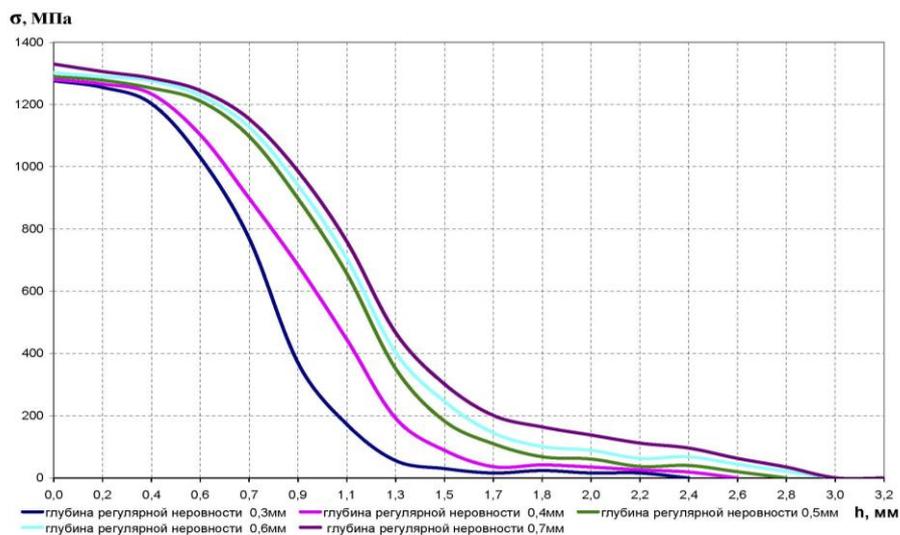


Рисунок 7 – Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma$ , возникающих по глубине в зависимости от глубины регулярной неровности

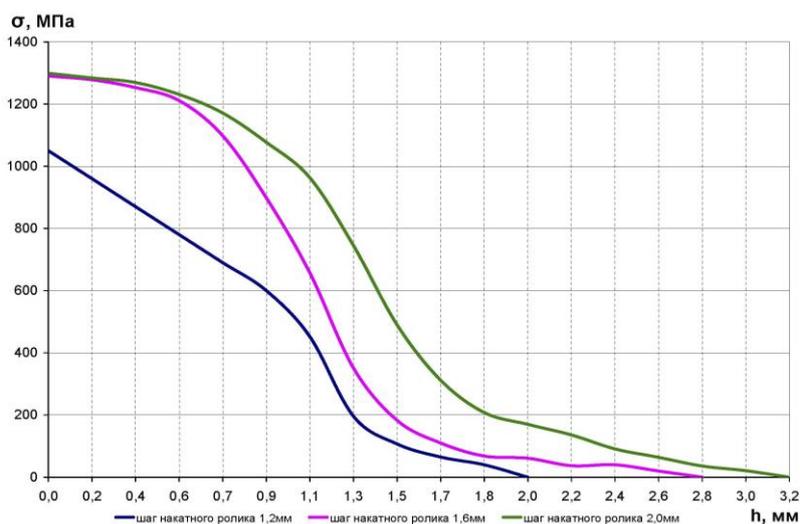


Рисунок 8 – Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma$ , возникающих по глубине в зависимости от изменения шага накатного ролика

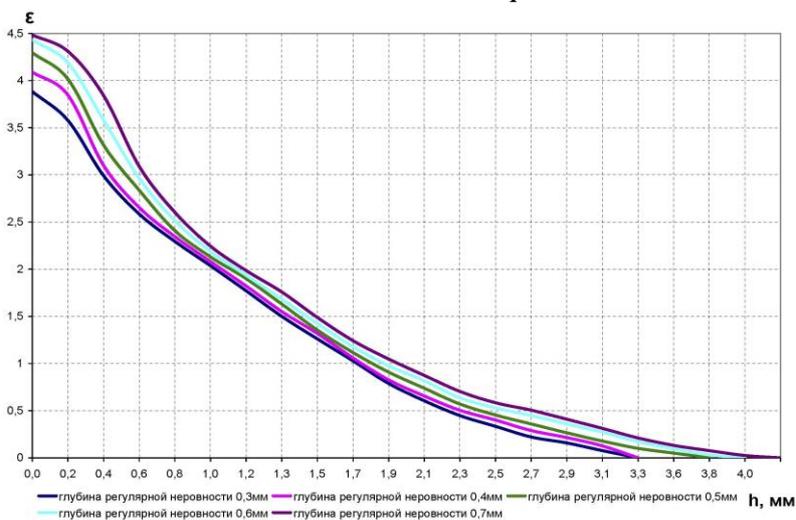
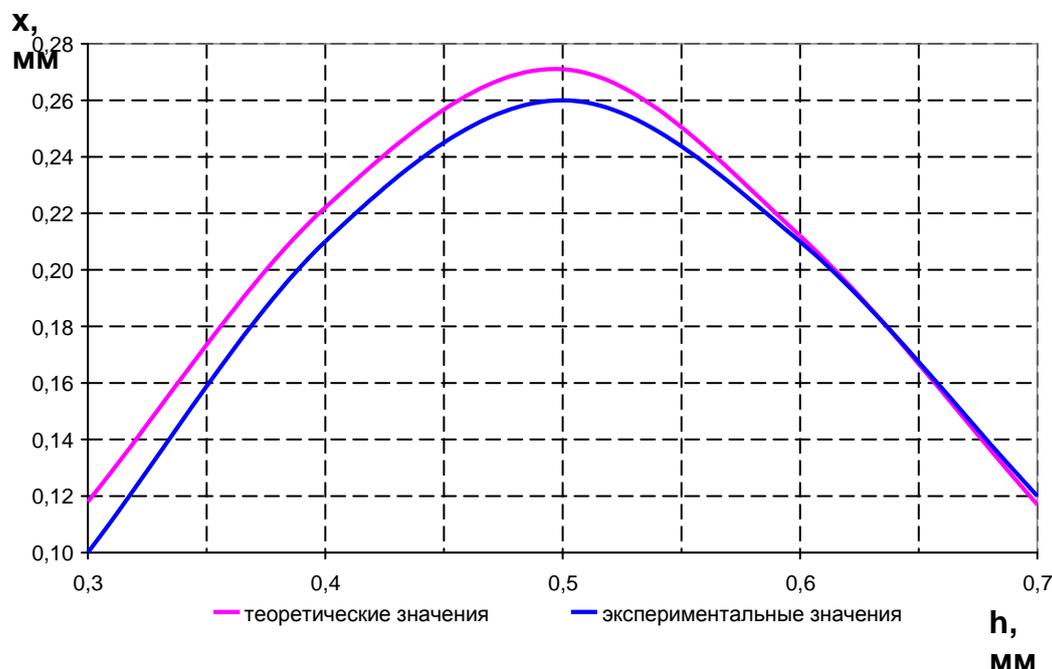


Рисунок 9 – Распределение эквивалентных деформаций  $\epsilon$ , возникающих по глубине в зависимости от изменения глубины регулярной неровности

Для получения полного представления о перемещении металла в процессе центробежно-инерционного накатывания определим зависимость подъема металла  $x$  от глубины регулярной неровности  $h$  методом наименьших квадратов и сравним с экспериментальными замерами. Экспериментальное определение подъема металла  $x$  оптическим измерением геометрических параметров поверхности после накатывания производились проекционным (теневым) методом на универсальном измерительном микроскопе УИМ-21 В результате был построен график зависимости подъема металла  $x$  от глубины регулярной неровности  $h$  (рис. 10).



**Рисунок 10 – График зависимости подъема металла  $x$  от глубины регулярной неровности  $h$**

Расхождение теоретических и экспериментальных исследований незначительны, они вызваны допущениями введенными при моделировании процесса накатывания. Следовательно, приведенный в статье метод моделирования может быть применен для описания процессов пластического деформирования металла обрабатываемой поверхности при центробежно-инерционном накатывании.

Статья подготовлена по материалам доклада на VI Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афонин А.Н. Оценка упрочнения резьбы по результатам компьютерного моделирования резьбонакатывания // Труды междунар. научно-практ. конф. «Инженерные системы – 2011», М.: РУДН, 2011. – С. 126 – 129.
2. Восстановление деталей машин: Справочник / Ф.И. Пантелеенко, В.П. Лялякин, В.П. Иванов, В.М. Константинов. Под ред. В.П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.
3. Киричек А.В., Афонин А.Н. Исследование напряженно деформированного состояния резьбонакатного инструмента и заготовки методом конечных элементов // СТИН. 2007, №7. – С. 21-25.
4. Патент РФ на изобретение 2400312. Способ подготовки поверхности изделия под напыление / Родичев А.Ю., Хромов В.Н., Корнев В.Н. - опубл. 27.09.2010 г. Бюл. №25. – 6 с.
5. Хромов В.Н., Корнев В.Н., Родичев А.Ю. Технология подготовки поверхности изделия под напыление //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2010, №2(280). - С. 63-65.

**Савин Леонид Алексеевич**  
 ФГБОУ ВПО «Госунiversитет - УНПК»  
 Профессор, д.т.н.  
 Тел. (4862) 49-98-85  
 E-mail: [savin@ostu.ru](mailto:savin@ostu.ru)

**Просекова Анастасия Владимировна**  
 ФГБОУ ВПО «Госунiversитет - УНПК»  
 Аспирант кафедры «Мехатроника и международный инжиниринг»  
 Тел. (4862) 49-98-85  
 E-mail: [prosekova.anastasia@yandex.ru](mailto:prosekova.anastasia@yandex.ru)

**Родичев Алексей Юрьевич**

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК»  
К.т.н., докторант кафедры «Мехатроника и международный инжиниринг»  
Тел. (4862) 49--98-85  
E-mail: [rodfox@yandex.ru](mailto:rodfox@yandex.ru)

**Филатов Алексей Николаевич**

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК»  
Аспирант кафедры «Мехатроника и международный инжиниринг»  
Тел. (4862) 49--98-85  
E-mail: [span4aka@gmail.com](mailto:span4aka@gmail.com)

**Павликов Павел Викторович**

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК»  
Магистрант  
Тел. (4862) 49--98-85

---

L.A. SAVIN, A.V. PROSEKOVA, A.Y. RODICHEV, A.N. FILATOV, P.V. PAVLIKOV

**MODELING OF CENTRIFUGAL INERTIA ROLLING  
FOR ANTIFRICTION COATING APPLYING OF BIMETAL  
SLIDING BEARINGS**

*Modeling of centrifugal inertia rolling for antifriction coating applying using DEFORM-3D software is considered in the article. Theoretical and experimental researches of metal lifting after rolling are carried out.*

**Keywords:** sliding bearing, centrifugal inertia rolling, rollers, surface plastic deformation, lifting of metal

**BIBLIOGRAPHY**

1. AN Afonin Rating hardening thread on the results of computer simulation rezbonakatyvaniya // Proc. scientific and practical. Conf. "Engineering Systems - 2011", Moscow People's Friendship University, 2011. - P. 126 - 129.
2. Restoration of machine parts: Guide / FI Panteleenko, VP Lyalyakin, VP Ivanov, V. Konstantinov. Ed. VP Ivanov. - Mashinostroenie, 2003. - 672 p.
3. Kirichek AV AN Afonin The research of stress strain state of thread rolling tool and work finite element // STIN. 2007, № 7. - P. 21-25.
4. Russian Federation Patent 2,400,312. The method of surface preparation products for coating / Rodichev AY, Khromov VN root. VN - Publ. 27.09.2010 Bull. Number 25. – 6p.
5. Khromov VN Korenev VN Rodichev A. Technology substrate preparation for spraying // Fundamental and applied problems of Engineering and Technology, 2010, № 2 (280). - P. 63-65.

**Savin Leonid Alexeevich**

FSBEE HPE "State university - ESPC"  
The professor, D.T.Sc.  
Phone: (4862) 49-98-85  
E-mail: [savin@ostu.ru](mailto:savin@ostu.ru)

**Prosekova Anastasia Vladimirovna**

FSBEE HPE "State university - ESPC"  
The post-graduate student of chair "Mechatronics and the international engineering"  
Phone. (4862) 49--98-85  
E-mail: [prosekova.anastasia@yandex.ru](mailto:prosekova.anastasia@yandex.ru)

**Rodichev Alexey Yur'evich**

FSBEE HPE "State university - ESPC"  
Ph.D., the post-graduate student of chair "Mechatronics and the international engineering"  
Phone. (4862) 49--98-85  
E-mail: [rodfox@yandex.ru](mailto:rodfox@yandex.ru)

**Filatov Alexey Nikolaevich**

FSBEE HPE "State university - ESPC"  
The post-graduate student of chair "Mechatronics and the international engineering"  
Phone. (4862) 49--98-85  
E-mail: [span4aka@gmail.com](mailto:span4aka@gmail.com)

**Pavlikov Pavel Viknorovich**

FSBEE HPE "State university - ESPC"  
The post-graduate student  
Phone. (4862) 49--98-85

---

А.П. СЕРГИЕВ, А.А. ПРОСКУРИН

## МИНИМИЗАЦИЯ ВЫСОТЫ ЗАУСЕНЦЕВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭФФЕКТА БАУШИНГЕРА

*В статье рассматривается как изменяется высота заусенцев, образующихся на кромках деталей при листовой вырубке, в зависимости от воздействия эффекта Баушингера на физико-механические характеристики материала.*

**Ключевые слова:** *высота заусенцев, эффект Баушингера, испытание на растяжение, относительное удлинение, истинное сопротивление разрыву.*

Модели связи величины заусенцев и износа штампов, выполненные Степанским [1], позволили установить зависимость величины заусенцев от основных факторов технологического процесса и физико-механических характеристик материала. Для определения высоты заусенцев при заданной программе выпуска вырубленных изделий  $N (0 \leq N \leq N_{max})$ , получено выражение:

$$h = \sqrt{\frac{N \cdot k_0 \cdot s \cdot w}{A \cdot (1 - f) \cdot \left(1 + \frac{\sigma_u}{\sigma_p}\right)}} \quad (1)$$

Как видно из формулы (1) число изделий  $N_{max}$ , штамповка которых возможна до образования заусенцев предельной высотой  $h_{max}$  увеличивается с ростом значений коэффициента  $A$ , увеличением ширины корня заусенцев  $z_{max}$  и ростом предела прочности на изгиб инструментального материала  $\sigma_u$ , а также уменьшением относительной глубины пластического внедрения режущей кромки до начала образования скалывающихся трещин  $k_0$ , толщины заготовки  $s$ , максимального разрушающего растягивающего напряжения обрабатываемого материала  $\sigma_p$ , средней величины коэффициента трения  $f$  и средней толщины слоя, в пределах которого происходит разрушение адгезионных связей и вынос продуктов разрушения  $w$ .

Увеличение числа изделий  $N_{max}$ , возможна только за счет увеличения предельной высоты заусенцев  $h$ , в пределах допустимых отклонений согласно технологических условий на деталь, а также при увеличении зазора  $z_{max}$  т.е. допустимого износа инструмента, что соответственно увеличивает значения изгибающего момента и величину  $\sigma_u$ , или использование материала с отличающимися физико-механическими характеристиками:  $f$  и  $\sigma_p$ . Значения параметров  $k_0$  и  $\sigma_u$  функционально связаны с величиной зазора  $z$  и изменяются по мере износа пуансона и матрицы, то есть с увеличением зазора  $z$ . Поэтому в реальных условиях регулировать значения  $k_0$  и  $\sigma_u$  с целью увеличения числа изделий  $N_{max}$  не представляется возможным. Регулирование  $N_{max}$  путём изменения средней величины коэффициента трения  $f$  можно осуществить путём применения смазки. Однако в большинстве случаев требуется последующее удаление смазки с деталей, что значительно увеличивает трудоёмкость изготовления изделий и введение дополнительных операций обезжиривания промывки и сушки.

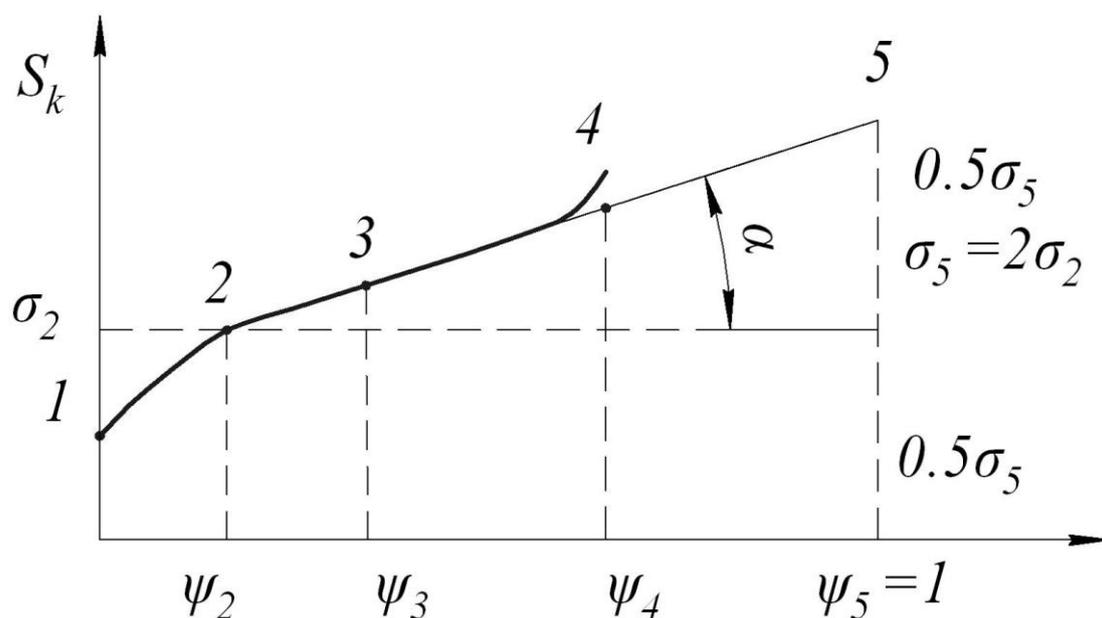
Из проведенного анализа очевидно, что величина образующихся при листовой вырубке заусенцев, не зависит от адгезионного износа пуансона и матрицы при листовой вырубке, то есть объема металла, удаляемого с поверхности инструмента в ходе скользящего кон-

такта, а возрастает с увеличением площадки скользящего контакта инструмента  $F_i$ , среднего давления  $q_i$ , средней величины коэффициента трения  $f$  и числа площадок контакта  $m$ .

Таким образом, для минимизации величины заусенцев и их полной ликвидации, в результате проведенного анализа, установлено, что при заданной программе  $N$  и постоянстве остальных параметров, единственным параметром, существенно влияющим на высоту заусенцев  $h$ , является максимальное разрушающее растягивающее напряжение обрабатываемого материала  $\sigma_p$ , снижение которого будет оказывать доминирующее действие на процесс образования заусенцев. По физической сущности  $\sigma_p$  тесно коррелируется с истинным сопротивлением разрушению  $S_k$ .

Стандартное испытание на растяжение не позволяет однозначно вычислить значение истинного сопротивления разрушению  $S_k$ , поэтому целесообразно рассмотреть некоторые исследования по вычислению  $S_k$ . Людвик [2] предложил построение истинной диаграммы растяжения  $S_k$  на равномерном участке деформации как функцию относительного сужения  $\psi$ , выраженное через относительное удлинение  $\delta$ .

Вычисление  $S_k$  по формуле Людвика  $S_k = \sigma_e(1 + \delta)$ , приводит к большому разбросу значений, так как величина  $\delta$  очень чувствительна к случайным факторам (дефекты, риски и т.п.). Наиболее стабильное значение обеспечивается при вычислении поперечного сужения  $\psi$ . Этим обстоятельством воспользовался Мёлендорф [2], предложив строить истинную диаграмму растяжения в зависимости от относительного сужения (рис. 1). При построении кривой по Мёлендорфу напряжение и относительное сужение рассчитывают по наиболее узкому сечению образца.



*Рисунок 1 – Кривая по Мёлендорфу*

Для построения достаточно измерить две точки: первую на участке равномерного удлинения в начале образования шейки (точка 2), вторую, замерив диаметр шейки после разрыва (точка 4).

Совпадение касательной с кривой в точке 2 позволяет считать, что дальнейший ход кривой может быть вычислен по уравнению (2)

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d\sigma_2}{d\psi_2} = \frac{\sigma_2}{1-\psi_2}, \quad (2)$$

Полученная зависимость (2) позволила Кёрберу [3, 4] сформулировать оригинальное правило, суть которого раскрывается после некоторых преобразований. Возможность вычислить значение напряжения предельной деформации  $\psi=1$ , т.е. для деформации 100% сжатия поперечного сечения. Тогда  $\sigma_5 = 2\sigma_2$ , таким образом напряжение соответствующее  $\psi=1$  равняется удвоенному истинному напряжению соответствующему началу образования шейки. Это заключение лежит в основе правила Кёрбера – истинное напряжение соответствующее 100% сжатию поперечного сечения ( $\psi=1$ , т.е. разрушению) равно удвоенному истинному напряжению соответствующему началу сосредоточенной деформации.

На основании правила Кёрбера, Чехальский и Мёлендорф получили выражение истинного сопротивления разрушению в зависимости от временного сопротивления относительного сужения  $\psi$ :

$$S_k = \sigma_d(1 + \psi), \quad (3)$$

Как установлено при анализе формулы (1), уменьшению величины заусенцев будут способствовать уменьшение пластичности материала и снижение максимального усилия вырубки, что можно достигнуть, используя эффект Баушингера [5].

Эффект Баушингера – явление, которое заключается в снижении пределов пропорциональности, упругости и текучести материалов в результате изменения знака нагружения, если первоначальная нагрузка вызвала наличие пластических деформаций. Металл, подвергнутый слабой пластической деформации нагрузкой одного знака, обнаруживает при перемене знака нагружения пониженное сопротивление начальным пластическим деформациям. На рисунке 2 показан фрагмент диаграммы растяжения.

Эффект Баушингера связывают с наличием остаточных напряжений в наиболее деформированных зернах металла, которые, складываясь с рабочими напряжениями при изменении знака нагрузки, вызывают понижение указанных выше характеристик образца.

С увеличением начальных пластических деформаций величина снижения пластических характеристик уменьшается. Наиболее сильно эффект Баушингера проявляется при незначительном начальном наклепе, когда деформация близка к статической, вызывающем остаточную деформацию порядка 0,2-0,3%. Наибольшее снижение пределов упругости и текучести дают высокоотпущенные стали и магниевые сплавы (до 40-50%). Низкоотпущенные стали дают снижение на 15-30%, алюминиевые сплавы – на 10-20%. У чистой меди, алюминия и мягких сплавов снижения при малых деформациях обратного знака не наблюдается, но возможно будет проявляться при других соотношениях первичной и реверсивной деформации.

Наблюдаемое разупрочнение при изменении знака нагрузки меняется в широких пределах в зависимости от материала и методов технологической обработки, и существенно зависит от скорости деформации. Так, например, при вырубке из алюминиевой полосы АД1, удалось полностью устранить образование заусенцев при значениях первичной и реверсивной деформации 40% [6].

Таким образом при высокоскоростной штамповке, т.е. при динамическом нагружении необходимо устанавливать оптимальные соотношения первичной и реверсивной деформации.

Статья подготовлена по материалам доклада на VI Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства».

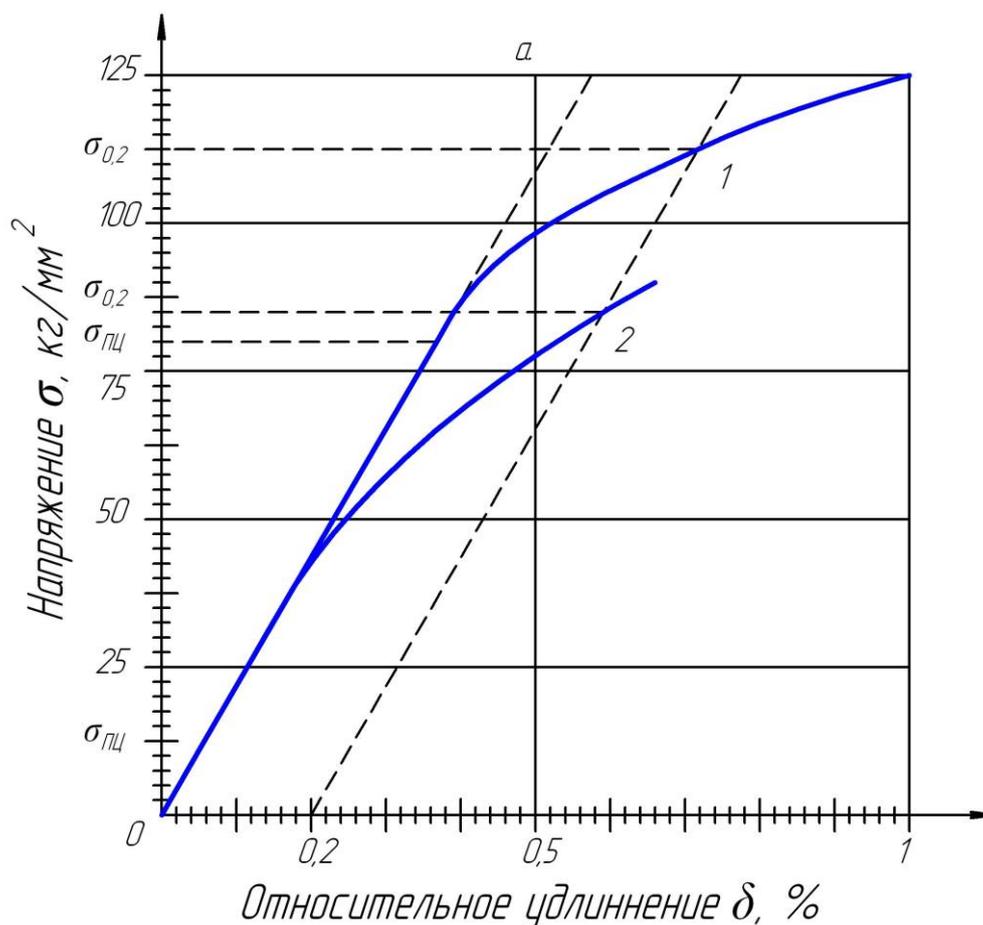


Рисунок 2 – Изменение величины предела пропорциональности  $\sigma_{0,2}$  при прямой и реверсивной деформации  
 1 – материал не подвергавшийся деформации,  
 2 – после деформирования его нагрузкой обратного знака.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанский Л.Г. Прогнозирование надёжности деформирующего инструмента: учебное пособие / Л.Г. Степанский - М.: МГТУ «Станкин», 1995.-99 с., ил.
2. Машиностроение. Энциклопедический справочник. Том 2. М. 1947 г. С.275.
3. Körber F. Mitt K. – W. Inst.f. Eisenforsch. 3.1. 1922 Stahl und Eisen. 42.365.1922/
4. Körber F., Rohland W. Mitt K. – W. Inst.f. Eisenforsch. 5.37.1924.5.55.1924.
5. Bauschinger J. Mittheilungen aus dem mechanisch technischen Laboratorium der Technischen Hochschule in Munchen / J. Bauschinger — 1886, 1887. — Н. XV.
6. Проведение контрольных экспериментов для оптимизации нового технологического процесса реверсивной вырубki листовых деталей. Сергиев А.П., Проскурин А.А., *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* № 5 (295) 2012 Сентябрь-октябрь, Орел: Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, 2012. – 158. стр. 99.

**Сергиев Аркадий Петрович**  
 Доктор технологических наук, профессор  
 Старооскольского технологического  
 института (филиала) ФГАОУ ВПО  
 «Национальный исследовательский  
 технологический университет «МИСиС»

**Проскурин Александр Александрович**  
 Аспирант Старооскольского технологического  
 института (филиала) ФГАОУ ВПО  
 «Национальный исследовательский  
 технологический университет «МИСиС»  
 Тел: (4725) 41-41-55  
 E-mail: [stpros@mail.ru](mailto:stpros@mail.ru)

A.P. SERGIEV, A.A. PROSKURIN

## **A MINIMIZATION OF A BURRS HEIGHT USING THE BAUSCHINGER'S EFFECT**

*In the article it is considering the changing of the burrs height, arising on the part edges with the sheet stamping depending on the impact of the Bauschinger's effect on the physical and the mechanical properties of the material.*

**Keywords:** *burrs height, Bauschinger's effect, elongation test, relative elongation, real tensile strength.*

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Stepany L,G. The forecasting of the deforming tool's reliability: tutorial / L.G Stepany – M.: MGТУ “Stankin”, 1995. – page 99, illustration.
2. Mechanical engineering. Encyclopedic reference. Volume 2. M. 1947. Page 275.
3. Körber F. Mitt K. – W. Inst.f. Eisenforsch. 3.1. 1922 Stahl und Eisen. 42.365.1922/
4. Körber F., Rohland W. Mitt K. – W. Inst.f. Eisenforsch. 5.37.1924.5.55.1924.
5. Bauschinger J. Mittheilungen aus dem mechanisch technischen Laboratorium der Technischen Hochschule in Munchen / J. Bauschinger — 1886, 1887. — H. XV.
6. The carrying out of the control experiments to optimize the new technology process of the reversing stamping of the sheet articles. Sergiev A.P., Proskurin A.A., The Fundamental and the applied problems of the engineering and the technology Nr. 5 (295) 2012 September-October, Oryol: The State University - educational and scientific-industrial complex, 2012 – 158. Page 99.

#### **Sergiev Arkadiy Petrovich**

Doctor of Technological Sciences, Professor  
of Sary Oskol Technology  
Institute (branch) of Federal State  
Autonomous Educational Institution  
of High Professional Education  
“National Exploratory Technology University  
“Moscow Institute of Steels and Alloys”

#### **Proskurin Alexander Alexandrovich**

Postgraduate of Sary Oskol Technology  
Institute (branch) of Federal State  
Autonomous Educational Institution  
of High Professional Education  
“National Exploratory Technology University  
“Moscow Institute of Steels and Alloys”  
Phone: (4725) 41-41-55  
E-mail: [stpros@mail.ru](mailto:stpros@mail.ru)

# КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ, МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.9

Д.А. БЕКТАШОВ, А.А. КРАПОСТИН

## НАНЕСЕНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ МИНЕРАЛОКЕРАМИЧЕСКОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

*В статье рассматриваются изменения показателей надежности минералокерамического режущего инструмента после нанесения на его поверхность наноструктурированных износостойких покрытий.*

**Ключевые слова:** экспоненциальный закон, распределение Вейбулла-Гнеденко, наноструктурированные покрытия.

Использование минералокерамического режущего инструмента при чистовой лезвийной обработке позволяет значительно увеличить её производительность и качество получаемых деталей. Однако широкому использованию этого инструмента в современном машиностроении препятствуют пониженные прочностные свойства. Это приводит при резании к внезапному выходу из строя инструмента вследствие скола режущего клина. Поэтому при использовании минералокерамического режущего инструмента основными являются показатели его надёжности при резании.

Цель работы: изыскание способов повышения надежности минералокерамического режущего инструмента за счет установления законов распределения наблюдаемой случайной величины и определения основных параметров.

Задачи исследований:

1. Установление закона распределения наблюдаемой случайной величины стандартного минералокерамического режущего инструмента с определением всех параметров.
2. Нанесение наноструктурированных покрытий для повышения уровня надежности минералокерамического режущего инструмента.
3. Выявление влияния покрытий на вероятность безотказной работы, вероятность отказа, параметр потока распределения и интенсивность отказов.

Методика проведения экспериментальных исследований

Исследовался процесс резания инструментом из минералокерамики ВОК 71, а так же минералокерамики с покрытиями ВОК 71+CrN и ВОК 71+ZrN.

В качестве обрабатываемого материала использовались закаленные углеродистые сталь 45, У8. Режимы резания:  $t = 0.1$  мм,  $S = 0.1$  мм/об,  $V = 600$  м/мин.

При проведении исследований использовался резец с механическим креплением режущих четырехгранных пластин, которые имели следующую геометрию режущей части:  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\gamma = 0^\circ$ ,  $\phi = 45^\circ$ ,  $\phi' = 45^\circ$ .

В результате проведения стойкостных испытаний был получен вариационный ряд (время стойкости режущего инструмента в сек.) для стандартного минералокерамического режущего инструмента [9]. После проведения расчетов был получен коэффициент вариации равный 1,08. Поэтому стандартный минералокерамический режущий инструмент будет подчиняться экспоненциальному закону распределения. Используя соответствующие формулы, определяем основные параметры надежности и заносим их в таблицу 1.

Таблица 1 - Основные показатели надежности для экспоненциального закона ВОК 71

t	P(t)	Q(t)	a(t) = f(t)
0	1	0	0,0107
76,54	0,4409	0,5591	0,0047
153,08	0,1944	0,8056	0,0021
229,62	0,0857	0,9143	0,0009
306,16	0,0378	0,9622	0,0004
382,70	0,0167	0,9833	0,00018
459,24	0,0073	0,9927	0,00008

Экспоненциальный закон распределения находит широкое применение при решении практических вопросов надежности. Этому виду распределения подчиняется наработка на отказ ремонтируемых и неремонтируемых изделий при рассмотрении внезапных отказов, а также время безотказной работы сложных систем, прошедших период приработки и состоящих из элементов с различной интенсивностью отказов [1].

После нанесения наноструктурированных покрытий на стандартный минералокерамический режущий инструмент так же были проведены стойкостные испытания и получены вариационные ряды. Используя практикум по методам оценки эксплуатационной надежности [2] были определены: размах вариации, величина частного интервала, шкала интервалов интервального вариационного ряда, частота попадания случайной величины в частный интервал, частота попадания  $r_j$  случайной величины в частный интервал, рассчитана частота попадания  $p_j$  случайной величины в частный интервал, рассчитана накопленная частота  $S(p_j)$ . По полученным данным определена средняя наработка на отказ, среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации.

В результате коэффициент вариации ВОК 71+CrN составил 0,39, а коэффициент вариации ВОК 71+ZrN - 0,45. Из теории надежности известно, что если  $V = 0,5$ , то полученный после проведения эксперимента вариационный ряд будет подчиняться закону распределения Вейбулла - Гнеденко. Этот закон используют при определении уровня надежности изделий в период приработки и установлении наработки на отказ неремонтируемых изделий [1]. Применяв соответствующие этому закону формулы определим основные параметры надежности и занесем их в таблицы 3 и 4.

Таблица 2 - Основные параметры надежности для распределения Вейбулла - Гнеденко ВОК71+CrN

t	P(t)	Q(t)	a(t) = f(t)	$\lambda(t)$
0	1	0	0	0
280,74	0,987	0,013	0,023	0,024
561,42	0,814	0,186	0,039	0,048
842,16	0,353	0,647	0,044	0,073
1122,9	0,037	0,963	0,039	0,097
1403,64	0,0003	0,9997	0,029	0,121
1684,32	0	1	0,019	0,145
1965	0	1	0,011	0,170
2245,8	0	1	0,005	0,194

Таблица 3 - Основные параметры надежности для распределения Вейбулла - Гнеденко ВОК71+ZrN

t	P(t)	Q(t)	a(t) = f(t)	$\lambda(t)$
0	1	0	0	0
342,06	0,969	0,031	0,029	0,031
684,12	0,602	0,398	0,044	0,063
1026,18	0,076	0,924	0,042	0,094
1368,24	0,0003	0,9997	0,030	0,125
1710,24	0	1	0,017	0,156
2352,3	0	1	0,008	0,188
2594,36	0	1	0,003	0,219
2736,42	0	1	0,0008	0,250

На основании полученных данных построим графические зависимости вероятности безотказной работы  $P(t)$ , вероятности отказа  $Q(t)$ , параметра потока распределения  $a(t) = f(t)$  и интенсивности отказов  $\lambda(t)$ .

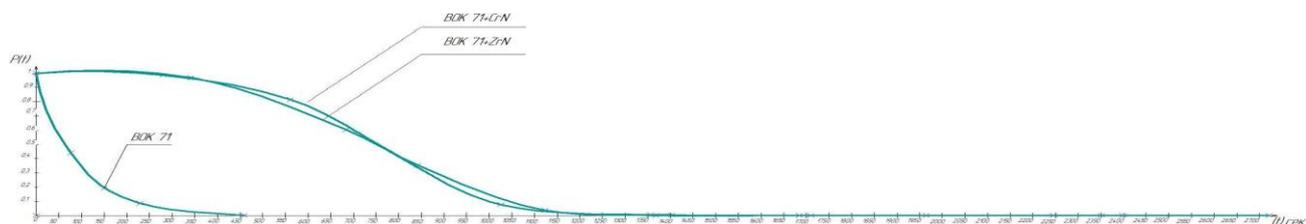


Рисунок 1 - Зависимость вероятности безотказной работы от времени

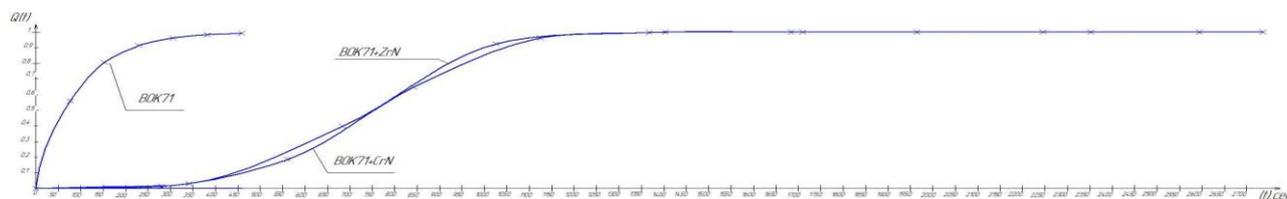


Рисунок 2 - Зависимость вероятностей отказа от времени

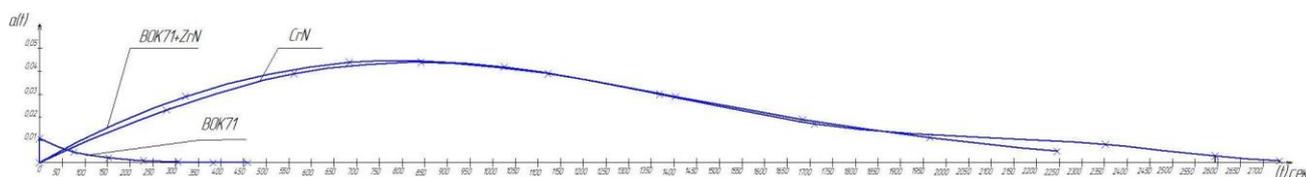


Рисунок 3 - Зависимость параметра потока распределения от времени

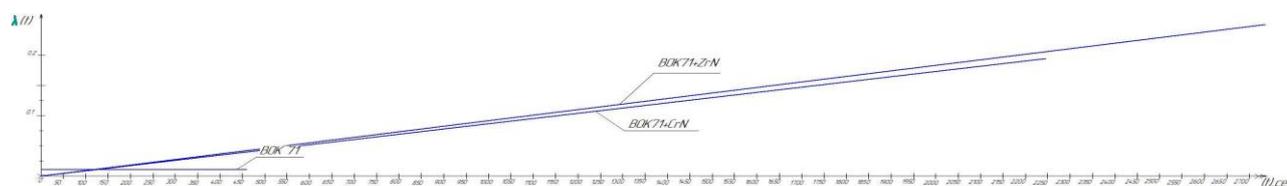


Рисунок 4 - Зависимость параметра интенсивности отказов от времени

В результате проведенных исследований и расчетов было установлено, что стандартный минералокерамический режущий инструмент, изготовленный из ВОК 71 подчиняется экспоненциальному закону распределения. После нанесения наноструктурированных покрытий экспоненциальный закон распределения наблюдаемой случайной величины меняется на распределение Вейбулла - Гнеденко. Это позволяет говорить о том, что процесс изнашивания режущего инструмента переходит от стадии внезапного разрушения в произвольный момент времени к стадии прогнозируемого, предсказуемого разрушения. Из представленных таблиц видно, что с нанесением покрытий увеличилась стойкость режущих пластин и вероятность безотказной работы. Лучшими показателями обладает минералокерамический режущий инструмент ВОК71+CrN.

Статья подготовлена по материалам доклада на VI Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пирогов, К.М. Основы надежности текстильных машин / К.М. Пирогов, С.А. Егоров. Учебное пособие для вузов. Иваново: ИГТА, 2004 г. – 268 с.
2. Вяткин, Б.А. Практикум по методам оценки эксплуатационной надежности текстильных машин. Учебное пособие. Иваново: ИВТИ, 1994 г. - 140 с.
3. Пирогов, К.М. Основы надежности текстильных машин / К.М. Пирогов, Б.А. Вяткин. Москва: Легпромбытиздат, 1985 г. - 256 с.

4. ГОСТ 27.002 - 89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. Группа Т00. - М.: Издательство стандартов, 1990 г. - 40 с.
5. ГОСТ 27.003 - 90 Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. Группа Т51. - М.: Издательство стандартов, 1991 г. - 27 с.
6. ГОСТ 27.203 - 83 Надежность в технике. Технологические системы. Общие требования к методам оценки надежности. Группа Т51. - М.: Издательство стандартов, 1984 г. - 6 с.
7. ГОСТ 27.402 - 95 Надежность в технике. Планы испытаний для контроля средней наработки до отказа (на отказ). Ч 1. Экспоненциальное распределение. Группа Т59. - Минск: Издательство стандартов, 1997 г. - 39 с.
8. Бекташов, Д.А. Исследования надежности механических систем чистового формообразования деталей машин энергетических устройств / Д.А. Бекташов, А.А. Крапостин. Вестник ИГЭУ, выпуск № 2: Иваново: ИГЭУ, 2012 г. – с. 34 - 36.
9. Бекташов, Д.А. Определение основных параметров надежности минералокерамического режущего инструмента / Д.А. Бекташов, А.А. Крапостин. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Выпуск №5: Орел, ГУУНПК, 2012 г. – с. 94-98.

**Бекташов Дмитрий Алиевич**  
Кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУВПО «Ивановская государственная  
текстильная академия»  
Тел: +7(4932)35-78-67.

**Крапостин Алексей Александрович**  
Аспирант кафедры технологии  
машиностроительного производства  
ФГБОУВПО «Ивановская государственная  
текстильная академия»  
Тел: +7(4932)35-78-67.  
E-mail: alex19882003@list.ru

D.A. BEKTASOV, A.A. KRAPOSTIN

## NANOSTRUCTURED COATINGS APPLICATION TO IMPROVE RELIABILITY INDICES MINERALOKERAMICHESKOGO CUTTING TOOL

*Experience of development changes in the reliability mineralokeramicheskogo cutter after  
application to the surface of the nanostructured wear-resistant coatings.*

**Keywords:** *exponential law, Weibull-Gnedenko, nanostructured coatings.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Pirogov, KM Fundamentals of reliability of textile machinery / KM Pirogov, SA Egorov. A manual for schools. Ivanovo: ISTA, 2004 - 268 p.
2. Vyatkin, BA Workshop on how to assess reliability of textile machinery. Textbook. Ivanovo IVTI, 1994 - 140 p.
3. Pirogov, KM Fundamentals of reliability of textile machinery / KM Pies, BA Vyatkin. Moscow: Legprombytizdat, 1985 - 256 p.
4. Standard 27,002 - 89 Reliability in engineering. Basic concepts. Terms and definitions. Group T00. - M.: Publishing Standards, 1990 – 40 p.
5. Standard 27,003 - 90 Reliability in engineering. The composition and the general rules of the task demands on reliability. Group T51. - M.: Publishing Standards, 1991 - 27 p.
6. Standard 27,203 - 83 Reliability in engineering. Technological systems. General requirements for methods of assessing reliability. Group T51. - M.: Publishing Standards, 1984 – 6 p.
7. Standard 27,402 - 95 Reliability in engineering. Test plans for the control of mean time to failure (failures). Ch 1. The exponential distribution. Group T59. - Moscow: Publishing Standards, 1997 – 39 p.
8. Bektashov, DA Research of reliability of mechanical systems finish forming machine parts power devices / DA Bektashov, AA Krapostin. ISPU Gazette, issue number 2: Ivanovo ISPU, 2012 - p. 34 – 36 p.
9. Bektashov, DA Determination of the main parameters of reliability mineralokeramicheskogo cutter / DA Bektashov, AA Krapostin. Fundamental and applied problems of engineering and technology. Issue number 5: Eagle GUUNPK, 2012 - p. 94-98.

**Bektashov Dmitry Aliovich**  
Ph.D., Associate Professor  
FGBOUVPO "Ivanovo State Textile Academy "  
Phone: +7 (4932) 35-78-67.

**Krapostin Alexey**  
Graduate student kafedry technology  
engineering production  
FGBOUVPO "Ivanovo State Textile Academy "  
Phone: +7 (4932) 35-78-67.  
E-mail: [alex19882003@list.ru](mailto:alex19882003@list.ru)

М.Б. БОРОДИНА, Л.А. САВИН, К.А.БУЛАВИН

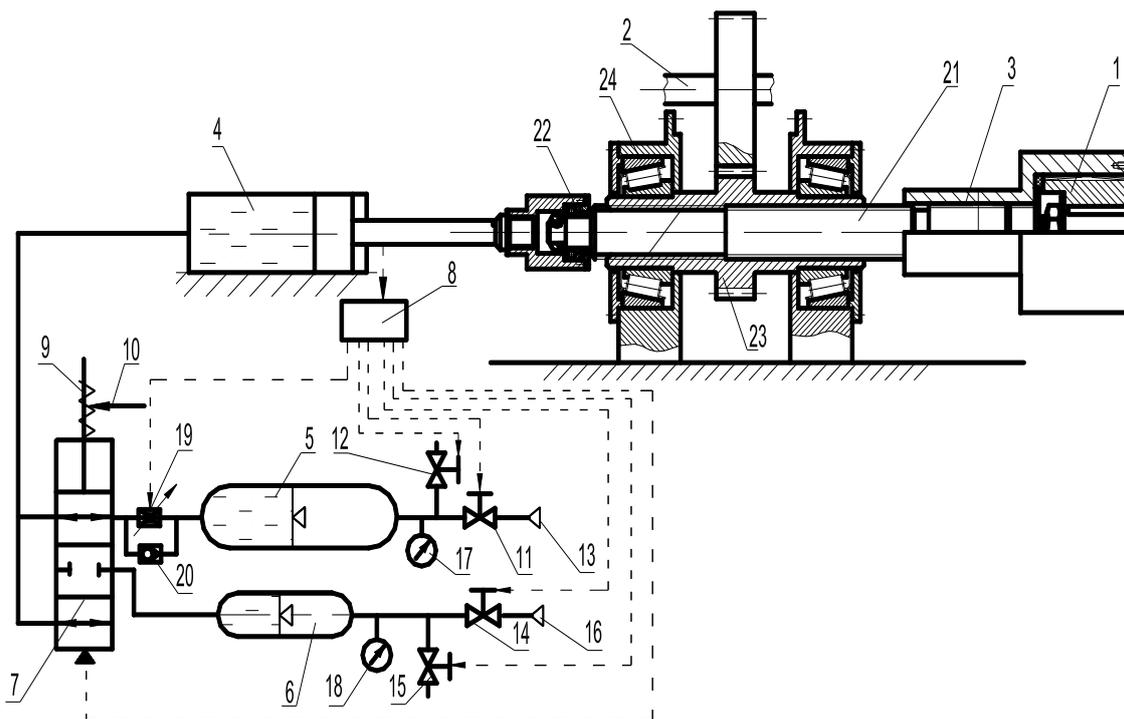
## ДИНАМИКА РАБОТЫ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ МУФТЫ С УПРАВЛЯЕМЫМ ПАРАМЕТРОМ

*В статье рассматривается динамика гидромеханической муфты с дифференциальным передаточным механизмом и управляемыми параметрами в режимах аварийного срабатывания и упругого демпфирования нагрузок со стороны технологической машины, изменяющихся по гармоническому закону.*

**Ключевые слова:** гидромеханическая муфта, динамические нагрузки, защита привода, коэффициент демпфирования.

Гидромеханические предохранительные упругодемпфирующие муфты с управляемыми параметрами обеспечивают защиту приводов машин от динамических нагрузок и перегрузок со стороны технологической машины. Эти муфты обладают широкими возможностями снижения уровня динамических нагрузок в машинных агрегатах, а также способные передавать нагрузки порядка 100 кНм.

Одной из перспективных конструкций является конструкция гидромеханической муфты с дифференциальным передаточным механизмом винт-гайка и неподвижной гидросистемой (рис. 1).



**Рисунок 1 – Гидромеханическая муфта с дифференциальным передаточным механизмом винт-гайка**  
1, 2 – полумуфты; 3 – шлицевая втулка; 4 – гидроцилиндр; 5 – гидropневмодемпер; 6 – гидropневмоаккумулятор; 7 – гидрораспределитель; 8 – система управления; 9 – упругий элемент; 10 – фиксатор; 11, 12, 14, 15 – вентили; 13 – источник высокого давления газа; 16 – источник низкого давления газа; 17, 18 – датчики давления; 19 – гидродроссель; 20 – обратный клапан; 21 – винт; 22 – упорный подшипник; 23 – гайка; 24 – подшипник

Подробное описание конструкции муфты и принцип её действия приведены в [1].

Особенностью муфты является возможность управления изменением давления газовых камер гидropневмодемпера 5 и гидроаккумулятора 6 в процессе работы привода, так как гидросистема в процессе работы муфты остаётся неподвижной. Управлять давлением можно вручную, дистанционно или программировать порядок изменения давления в системе управления 8 (рис. 1).

Динамика работы муфты опишется системой [2]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x}_1 \cdot \left( m_1 + \frac{J_1}{r_1^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha} \right) + \ddot{\varphi}_2 \cdot \frac{J_1}{r_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha} = \frac{2 \cdot M_C + 2 \cdot M_{02}^T - M_D + M_{01}^T}{r_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha} - F_G - F_{01}^T - F_{21}^T \cdot \cos \alpha - \mu \cdot \dot{x} \\ \ddot{\varphi}_2 \cdot (J_2 + J_1) + \ddot{x}_1 \cdot \frac{J_1}{r_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha} = M_D - M_C - M_{02}^T - M_{01}^T \\ M_D = u^2 \cdot \beta \cdot \left( \frac{\omega_0}{u} - \left( \dot{\varphi}_2 + \frac{\dot{x}_1}{r_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha} \right) \right) \end{array} \right. , \quad (1)$$

где  $x_1$  - осевое смещение винта (первая обобщённая координата);

$\varphi_2$  - вращение гайки (вторая обобщённая координата);

$J_1, J_2$  - моменты инерции винта и гайки;

$m_1$  - масса винта;

$r_1$  - средний радиус резьбы винта;

$r_B$  - средний радиус шлицевого соединения;

$r_B, r_2$  - радиусы вала винта и гайки под подшипники;

$\alpha$  - угол подъёма винта;

$M_D$  - момент, передаваемый от привода к винту;

$M_C$  - момент сопротивления со стороны технологической машины;

$f_{12} = f_{21}, f_{01}, f_{01}^n, f_{02}^r, f_{02}^o$  - коэффициенты трения в кинематических парах муфты и подшипниках;

$\beta$  - модуль жёсткости линеаризованной механической характеристики двигателя;

$u$  - передаточное отношение привода.

За начало отсчёта примем установившееся движение муфты.

Тогда начальные условия:

$$\text{При } t = 0, x_1 = x_H, \dot{x}_1 = 0, \ddot{x}_1 = 0, \dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_2 = \omega_H, \ddot{\varphi}_1 = \ddot{\varphi}_2 = 0, M_C = M_{CH},$$

где:  $x_H$  - номинальное смещение винта;

$\omega_H$  - номинальная угловая скорость вала привода;

$M_{CH}$  - номинальный момент сил сопротивления.

Из первого уравнения системы (1) определим номинальное осевое смещение винта:

$$x_H = \frac{2 \cdot M_{CH} - M_{DH} + M_{01}^T + 2 \cdot M_{02}^T}{r_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot C_G} - \frac{F_{G0}}{C_G} = \frac{M_{CH} + M_{02}^T}{r_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot C_G} - \frac{F_{G0}}{C_G}$$

Из второго – номинальный движущий момент:

$$M_{DH} = M_{CH} + (f_{02}^n \cdot r_2 + f_{01}^n \cdot r_B) \cdot (F_{G0} + C_G \cdot x_1)$$

Из третьего – номинальную угловую скорость вала привода:

$$\dot{\varphi}_{2H} = -\frac{M_{DH}}{u^2 \cdot \beta} + \frac{\omega_0}{u}$$

Основными задачами представленной муфты являются: предохранение от случайных перегрузок и упругое демпфирование динамических нагрузок. Поэтому рассмотрим работу муфты в момент аварийного срабатывания и в режиме упругого демпфирования динамических нагрузок.

Аварийное срабатывание. Пусть в начальный момент времени  $M_C \gg M_{C_{np}}$ , тогда гайка останавливается  $\dot{\varphi}_2 = 0$ , и в передаточном механизме муфты остаётся одна степень свободы, а значит вращение вала ведущей полумуфты  $\dot{\varphi}_1 = \frac{\dot{x}_1}{r_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha}$  [2].

Тогда система уравнений (1) примет вид:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 \cdot \left( m_1 + \frac{J_1}{r_1^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha} \right) = \frac{M_D - M_{01}^T}{r_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha} - F_{r0} - C_r \cdot \dot{x}_1 - F_{01}^T - F_{21}^T \cdot \cos \alpha \\ M_D = u^2 \cdot \beta \cdot \left( \frac{\omega_0}{u} - \frac{\dot{x}_1}{r_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha} \right) \end{cases} \quad (2)$$

Подставив второе уравнение системы (2) в первое и аналитически проинтегрировав это дифференциальное уравнение, находим закон осевого движения винта и его скорость:

$$x_1 = C_1 \cdot e^{\lambda_1 t} + C_2 \cdot e^{\lambda_2 t} + \frac{d}{c}$$

$$\dot{x}_1 = C_1 \cdot \lambda_1 \cdot e^{\lambda_1 t} + C_2 \cdot \lambda_2 \cdot e^{\lambda_2 t}$$

где  $\lambda_1, \lambda_2$  - корни характеристического уравнения (для реальных значений коэффициентов получаются только действительные и различные);

$C_1, C_2$  - постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий;

$\frac{d}{c}$  - частное решение неоднородного уравнения.

Из второго уравнения системы (2), можно определить закон изменения момента на валу привода в процессе срабатывания муфты.

$$M_D = \beta \cdot u^2 \cdot \left( \frac{\omega_0}{u} - \frac{C_1 \cdot \lambda_1 \cdot e^{\lambda_1 t} + C_2 \cdot \lambda_2 \cdot e^{-\lambda_2 t}}{r_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha} \right)$$

После срабатывания, оставшаяся в гидроцилиндре жидкость сбрасывается в гидроаккумулятор, давление в котором значительно меньше, и шлицы вала винта выходят из соединения с валом двигателя, муфта размыкается.

Рассмотрим, какое влияние оказывает начальное усилие на штоке гидроцилиндра (которое зависит от начального давления в гидропневмодемпфере (5) на время срабатывания муфты (рис. 2).

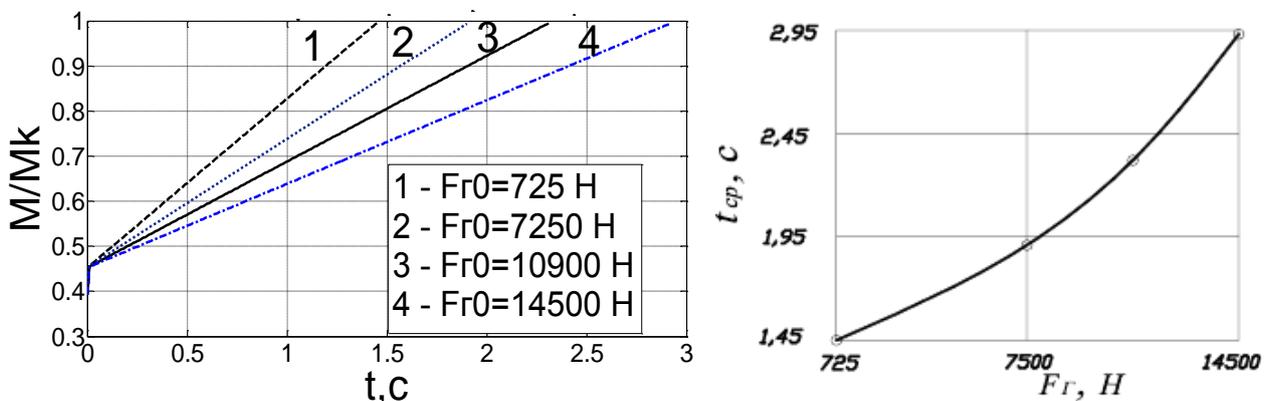


Рисунок 2 – Влияние начального усилия на штоке гидроцилиндра на момент и время срабатывания муфты

Посредством изменения давления в поршневой полости демпфирующего гидроцилиндра было выявлено, что при различных начальных усилиях на штоке время срабатывания муфты будет различным, при этом момент срабатывания остается постоянным и не превышает критического значения.

Упругое демпфирование динамических нагрузок со стороны технологической машины. Рассмотрим вариант, когда момент сопротивления со стороны технологической машины меняется гармонически:  $M_c(t) = M_{c0} \cdot \cos(\omega t)$ .

Для отыскания частного решения можно использовать метод записи системы дифференциальных уравнений (1) в комплексной форме [3]. Используя этот метод, находим действительные перемещения и скорости винта и гайки:

$$x_1 = A_1 \cdot \cos(\omega \cdot t - \gamma_1); \quad \dot{x}_1 = -A_1 \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t - \gamma_1)$$

$$\varphi_2 = A_2 \cdot \cos(\omega \cdot t - \gamma_2); \quad \dot{\varphi}_2 = -A_2 \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t - \gamma_2),$$

где  $A_1 = \frac{M_{c0}}{\psi_1 \cdot \sqrt{(p_1^2 - \omega^2)^2 + 4 \cdot n_1^2 \cdot \omega^2}}$ ,  $A_2 = -\frac{M_{c0}}{\psi_2 \cdot \sqrt{(p_2^2 - \omega^2)^2 + 4 \cdot n_2^2 \cdot \omega^2}}$  - амплитуды

вынужденных колебаний;

$$\gamma_1 = \arctg \frac{2 \cdot n_1 \cdot \omega}{p_1^2 - \omega^2}, \quad \gamma_2 = \arctg \frac{2 \cdot n_2 \cdot \omega}{p_2^2 - \omega^2} - \text{запаздывание по фазе перемещения по отношению к возмущающей силе;}$$

$$\psi_1 = \frac{d_2 \cdot a_1 - d_1 \cdot a_2 + c_2 \cdot b_1 + c_1 \cdot b_1 \cdot d_2 / d_1}{d_1}, \quad \psi_2 = \frac{c_2 \cdot b_1 - c_1 \cdot b_2 + a_2 \cdot d_1 + a_1 \cdot d_1 \cdot c_2 / c_1}{c_1}; -$$

инерционные составляющие;

$$p_1 = \sqrt{\frac{k_1 \cdot d_2 / d_1 - k_2}{\psi_1}}; \quad p_2 = \sqrt{\frac{d_1 \cdot k_2 - d_1 \cdot k_1 \cdot c_2 / c_1}{c_1 \cdot \psi_2}}; - \text{собственные частоты винта и}$$

гайки;

$$n_1 = \frac{c_1 \cdot d_2 / d_1 - c_2}{2 \cdot \psi_1}; \quad n_2 = \frac{d_1 \cdot c_2 / c_1 - d_2}{2 \cdot \psi_2} - \text{коэффициенты вязкого трения.}$$

Подставив скорости осевого смещения винта и вращения гайки в механическую характеристику привода (третье уравнение системы (1)), можем определить, как меняются динамические нагрузки на валу двигателя:

$$M_D = u^2 \cdot \beta \cdot \left( \frac{\omega_0}{u} - \left( \dot{\varphi}_2 + \frac{\dot{x}_1}{r_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha} \right) \right) = u^2 \cdot \beta \cdot \left( \frac{\omega_0}{u} + A_2 \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t - \gamma_2) + \frac{A_1 \cdot \omega}{r_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha} \cdot \sin(\omega \cdot t - \gamma_1) \right)$$

Подставив в уравнение значения параметров макета муфты и экспериментального стенда [4] и задав нагрузку со стороны технологической машины, изменяемую по закону гармонических колебаний с амплитудой 50% от номинального значения получили, что максимальные нагрузки, которые воспринимает двигатель, не превышают 1% от номинального значения.

Определим коэффициент динамичности муфты как отношение амплитуды винта к так называемой равновесной амплитуде [3]  $M_0 = \frac{M_{c0}}{r_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot C_T}$  при различных начальных давлениях в гидродемпфере (рис. 3).

Исследуя графики на рисунке 3 пришли к выводу, что при снижении начального давления в гидродемпфере значения максимального коэффициента динамичности в резонансной зоне увеличивается, а резонансная зона смещается в сторону увеличения вынуждающей частоты.

Исследуемая конструкция муфты позволяет менять вручную, дистанционно или с помощью программы давление в гидроневродемпфере, что даёт возможность регулировать время срабатывания муфты, не перегружая двигатель, избегать опасных резонансных зон, за счёт изменения собственной частоты колебаний, а также устанавливать рациональную жёсткость муфты в процессе работы машины. Особенно важны эти возможности муфты при защите приводов машин в процессе работы которых возникают кратковременные перегрузки, но при этом технологический процесс должен протекать непрерывно (например, печи обжига извести, окомкователи, мельницы и пр.).

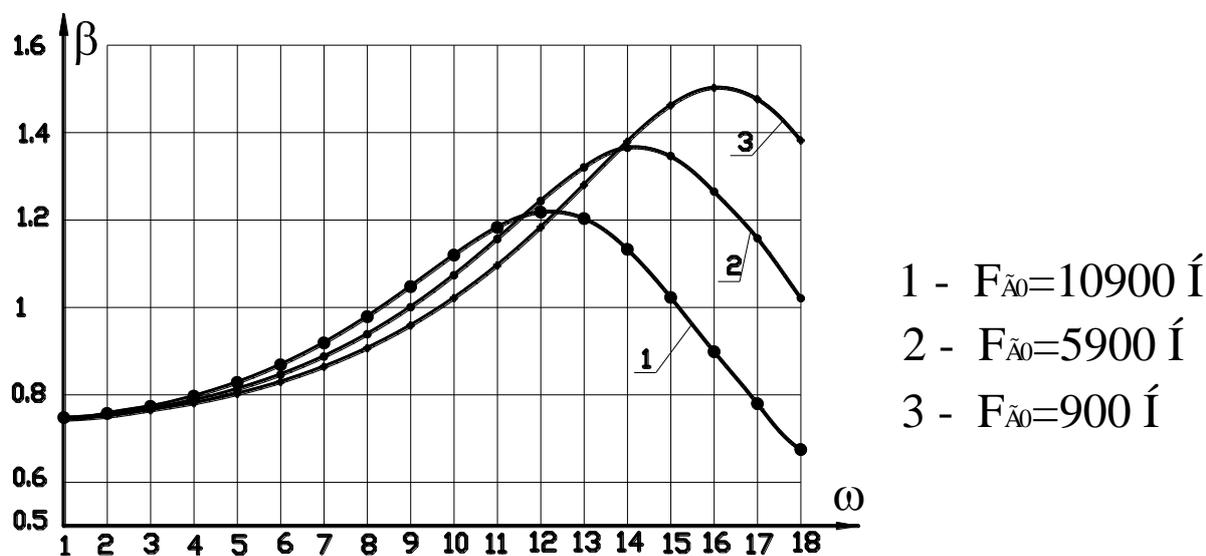


Рисунок 3 – Коэффициент динамичности муфты при начальных давлениях в гидродемпфере

Исследования динамики работы муфты показали, что гидромеханическая муфта с передачей винт-гайка эффективно защищает привод от перегрузок и динамических нагрузок со стороны технологической машины.

Статья подготовлена по материалам доклада на VI Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бородина М.Б. Гидромеханические предохранительные муфты нового типа // Материалы II всероссийской научно-методической конференции «Основы проектирования и Детали машин – XXI век» - Орёл, 2010 – С. 211-214.
2. Бородина М.Б. Динамика гидростатической предохранительной муфты приводов тяжело нагруженных машин // Материалы IX междунар. конференции «Вибрация – 2010. Вибрационные машины и технологии»: Сб. научных трудов КГТУ. – Курск: КГТУ, 2010 – С. 197-203.
3. Бидерман В.Л. Прикладная теория механических колебаний. Учеб. пособие для ВТУЗов. М., изд «Высшая школа», 1972.
4. Бородина М.Б. Обоснование параметров предохранительных муфт с гидромеханическим исполнительным механизмом. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.02.02. – Тула, 2010, 137с.

**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](mailto:borodina_marina@mail.ru)

**Савин Леонид Алексеевич**

Доктор технических наук, профессор.

ФГОУ ВПО «Государственный университет-

учебно-научно-производственный комплекс»

Тел: (4862) 48-37-66

E-mail: [savin@ostu.ru](mailto:savin@ostu.ru)

**Булавин Константин Алексеевич**

главный инженер

ЗАО «СУМ-БСК»

Тел: +7 915-569-94-04

E-mail: [bulavin\\_k\\_a@mail.ru](mailto:bulavin_k_a@mail.ru)

---

M.B. BORODINA, L.A.SAVIN, K.A.BULAVIN

**DYNAMICS OF HYDROMECHANICAL COUPLING  
WHITH CONTROLLED PARAMETERS**

*The report discusses the dynamics of hydromechanical coupling with a differential gear mechanism and controlled parameters in the modes of emergency response and damping of the elastic load of the processing machine, which vary harmonically.*

**Keywords:** *hydromechanical coupling, dynamic loads, the protection of the drive, the damping factor.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Mikhail Borodin Hydro-mechanical safety clutches of a new type // Proceedings of the II All-Russian Scientific Conference "Fundamentals of design and machine parts - XXI Century" - Eagle, 2010 - pp. 211-214.
2. Mikhail Borodin The dynamics of the hydrostatic drive slip clutch heavy duty vehicles // Proceedings of the IX Intern. Conference "Vibrations - 2010. Vibratory equipment and technology": Coll. scientific papers KSTU. - Kursk: KSTU, 2010 - pp. 197-203.
3. Biederman, VL Applied theory of mechanical vibrations. Textbook. aid for technical colleges. M., ed "High School", 1972.
4. Mikhail Borodin Justification parameters safety couplings with hydromechanical actuator. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences: 05.02.02. - Tula, 2010, 137с.

**Borodina Marina Borisovna**

Ph.D., Associate Professor,  
Starooskolsky institute of technology  
of A.A.Ugarov, branch of National  
research university "MISIS"

Tel: +7 910-369-71-21

E-mail: [borodina\\_marina@mail.ru](mailto:borodina_marina@mail.ru)

**Savin Leonid Alekseevich**

Doctor of Technical Sciences, Professor,

«The state university — educational  
scientific-industrial complex»

Tel: (4862) 48-37-66

E-mail: [savin@ostu.ru](mailto:savin@ostu.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](mailto:bulavin_k_a@mail.ru)

А.Н. ГРЕЧУХИН, М.С. РАЗУМОВ, С.А. ЧЕВЫЧЕЛОВ

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ЗАДНЕГО УГЛА ИНСТРУМЕНТА ПРИ ОБРАБОТКЕ ПРОФИЛЬНОЙ ЧАСТИ ПРУЖИН ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ПОСРЕДСТВОМ ПЛАНЕТАРНОГО МЕХАНИЗМА**

*В статье рассматривается методика определения минимального значения заднего угла инструмента при обработке профильной части пружин железнодорожного транспорта посредством планетарного механизма.*

*Ключевые слова:* планетарный механизм, задний угол, пружина, железнодорожный транспорт.

Железнодорожный транспорт – ведущий в транспортной системе Российской Федерации. Его ведущее значение обусловлено двумя факторами: технико-экономическими преимуществами над большинством других видов транспорта и совпадением направления и мощности основных транспортно-экономических межрайонных и межгосударственных связей России с конфигурацией, пропускной и провозной способностью железнодорожных магистралей [4].

Стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года определена важная роль развития высокоскоростного железнодорожного транспорта. В этой связи ОАО "РЖД", крупнейшая железнодорожная компания в Российской Федерации, выступила инициатором создания технологической платформы "Высокоскоростной интеллектуальный железнодорожный транспорт"[4].

Основными задачами технологической платформы являются:

- интеграция современных машиностроительных, информационных и телекоммуникационных технологий и средств автоматизации в транспортную инфраструктуру, транспортные средства для повышения безопасности и эффективности транспортного процесса, обеспечения надлежащего уровня комфорта и качества транспортных услуг;
- разработка комплекса технических регламентов и национальных стандартов с учетом мирового опыта проектирования, строительства и эксплуатации скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта, позволяющих осуществлять перевозочный процесс в соответствии с мировым уровнем;
- разработка и производство технических средств нового поколения для высокоскоростных магистралей, включая инфраструктуру и подвижной состав.

Большую роль в обеспечении комфорта и безопасности железнодорожных перевозок играет механизм рессорного подвешивания железнодорожных вагонов. Одной из наиболее ответственных частей системы рессорного подвешивания являются упругие элементы – пружины. Таким образом, изготовление качественных пружин является одной из актуальных задач в сфере железнодорожного хозяйства.

В статье «Анализ способов формообразования профильной части заготовок пружин для тележек железнодорожных вагонов» были рассмотрены технологии изготовления пружин для тележек железнодорожного транспорта, выявлены недостатки существующих технологий, и предложен новый высокопроизводительный способ формообразования профильной части заготовок пружин для тележек железнодорожного транспорта, посредством управляемых планетарных перемещений инструментов [1].

На основе анализа технологий получения профильных поверхностей, был выбран способ планетарного движения режущих кромок на станках токарной группы. Принцип работы, которого заключается в том, чтобы с помощью планетарной передачи придать вершине режущего инструмента траекторию сложной кривой. Формообразование профильной

части пружин планетарным движением режущих кромок, вращающимся резцовым блоком при поступательном движении подачи заготовке относительно своей оси, данный способ основан на замене прямой линии многогранника участком сильно растянутого участка трохойды [2,5].

Предложенный тип обработки сопровождается изменением значения заднего угла режущего инструмента в процессе формообразования [3], величина которого зависит от технологических параметров обработки, а именно: ширины профильной части пружины  $b$ , ее высоты  $h$ , а так же параметров планетарного механизма построителя – радиуса зубчатого колеса с внутренним зацеплением  $R$ , и толщины режущей пластинки или державки инструмента  $L$ .

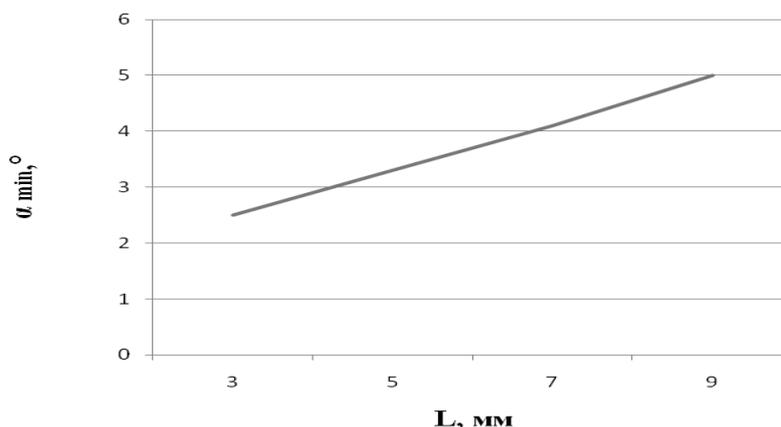
Задачей данного исследования является экспериментальное определение минимального значения заднего угла режущего инструмента, при котором возможна обработка профильной части пружин железнодорожного транспорта посредством планетарного механизма.



*Рисунок 1 – Фрагмент эксперимента*

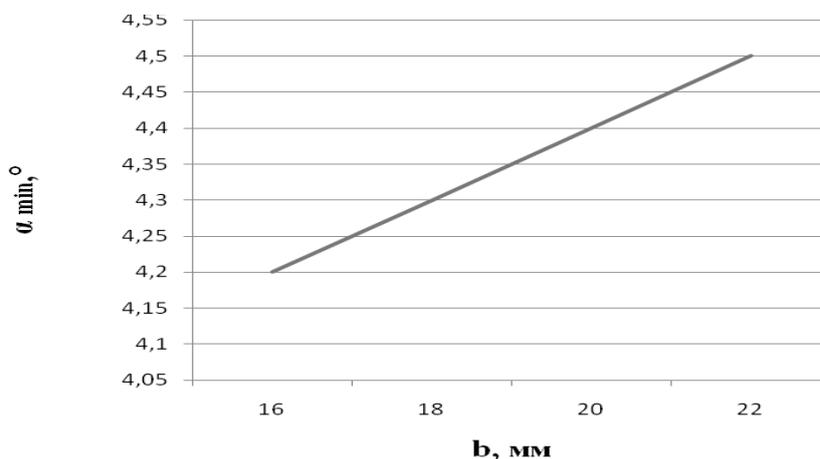
Для решения вышеуказанной задачи был проведен эксперимент. Методика проведения эксперимента заключается в следующем: были подготовлены заготовки различных типоразмеров профильных поверхностей, которые поочередно устанавливались на токарный станок, роль режущего инструмента выполняет резцовый блок с установленным на него кубиком пластичного материала. Заготовки нагревались, и путем поворота резцового блока планетарного механизма, производилась имитация процесса лезвийной обработки. При этом с установленного на резцовый блок кубика пластичного материала нагретой заготовкой удаляется определенный слой материала, таким образом, формируется задняя поверхность режущего инструмента, производится замер значения угла  $\alpha$  минимально допустимого для формообразования профильной поверхности без столкновения задней поверхности режущей пластины или державки о заготовку.

На рисунках 2 – 4 представлены зависимости минимального значения заднего угла инструмента от различных параметров.

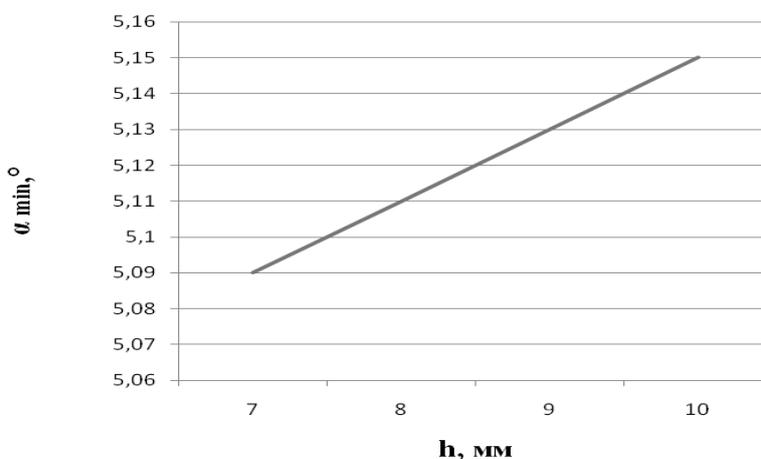


**Рисунок 2 – График зависимости минимального значения заднего угла  $\alpha_{min}$  режущего инструмента от ширины режущей кромки  $L$ .**

Зависимость (рис. 2) показывает, что величина  $\alpha_{min}$  – минимальное значение заднего угла находится в прямой зависимости от толщины режущей пластинки или державки инструмента  $L$ , который необходимо учитывать при проектировании металлорежущего инструмента.



**Рисунок 3 – График зависимости минимального значения заднего угла  $\alpha_{min}$  режущего инструмента от ширины  $b$  получаемого профиля.**



**Рисунок 4 – График зависимости минимального значения заднего угла  $\alpha_{min}$  режущего инструмента от высоты  $h$  получаемого профиля.**

Из рисунков 2,3,4 видим, что графики выражают линейную зависимость изменяемого параметра при постоянных других параметрах. Данные изменения, возможно, выразить в ви-

де эмпирической зависимости в результате проведения многофакторного эксперимента. Это позволит учитывать и проводить необходимую корректировку заднего угла на стадии изготовления инструмента.

С целью исследования зависимости изменения  $\alpha_{\min}$  – минимального значения заднего угла от параметров планетарного механизма, а именно от радиуса зубчатого колеса с внутренним зацеплением  $R$ , параметров ширины и высоты профильной поверхности  $b$  и  $h$  соответственно, параметра толщины режущей пластинки или державки инструмента  $L$ , и получения эмпирических данных был проведен многофакторный эксперимент. Матрица эксперимента представлена в таблице 1.

По результатам обработки исходных данных эксперимента, была получена эмпирическая формула, обобщающая влияние различных факторов на величину  $\alpha_{\min}$  – минимального значения заднего угла.

Таблица 1 - Матрица эксперимента

№	X1		X2		X3		X4		Погрешность			ln Δ <sub>1</sub>	ln Δ <sub>2</sub>	ln Δ <sub>3</sub>
	Код	b	Код	H	Код	R	код	L	Δ <sub>1</sub>	Δ <sub>2</sub>	Δ <sub>3</sub>			
1	-	11	-	11	-	100	-	3	5	5,5	5	1,609	1,705	1,609
2	+	24	-	11	-	100	-	3	9	10	9,5	2,197	2,303	2,251
3	-	11	+	24	-	100	-	3	6	6,3	6,5	1,792	1,841	1,872
4	+	24	+	24	-	100	-	3	13	13	13,5	2,565	2,565	2,603
5	-	11	-	11	+	200	-	3	2,5	2	2,5	0,916	0,693	0,916
6	+	24	-	11	+	200	-	3	4,9	5	4,8	1,589	1,609	1,569
7	-	11	+	24	+	200	-	3	2,5	2,7	2	0,916	0,993	0,693
8	+	24	+	24	+	200	-	3	5	5	5,3	1,609	1,609	1,668
9	-	11	-	11	-	100	+	10	9	9,3	9,3	2,197	2,230	2,230
10	+	24	+	24	-	100	+	10	18	17,3	17,5	2,890	2,851	2,862
11	-	11	+	24	-	100	+	10	11	11	11,3	2,398	2,398	2,425
12	+	24	-	11	+	200	+	10	6,5	6,5	6,3	1,872	1,872	1,841
13	-	11	-	11	+	200	+	10	5	5	4,5	1,609	1,609	1,504
14	+	24	+	24	+	200	+	10	7	7	7,2	1,946	1,946	1,974
15	-	11	+	24	+	200	+	10	5,3	5,3	5,5	1,668	1,668	1,705
16	+	24	-	11	-	100	+	10	14,3	14,5	14,5	2,660	2,674	2,674

$$\alpha_{\min} = \frac{e^{1,963} b^{1,613} h^{0,187} L^{1,47}}{R^{1,186} b^{(0,382 \ln L)}} \quad (1),$$

где  $b$  – ширина профильной поверхности заготовки пружины;  
 $h$  – её высота;  
 $R$  – радиус зубчатого колеса с внутренним зацеплением;  
 $L$  – толщина режущей пластинки или державки инструмента.

Таким образом, в статье предложена методика экспериментального определения минимального значения заднего угла. Показаны исследования влияния технологических параметров влияющих на величину минимального значения заднего угла режущего инструмента при обработке профильной части пружин железнодорожного транспорта посредством планетарного механизма построителя. Проведен многофакторный эксперимент, и получена эмпирическая модель влияния параметров обработки на величину минимального заднего угла режущих кромок.

Статья подготовлена по материалам доклада на VI Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства».

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Анализ способов формообразования профильной части заготовок пружин для тележек железнодорожных вагонов [Текст] / А.Н. Гречухин, С.А. Чевычелов, М.С. Разумов, // Перспективное развитие науки, техники и технологии: Материалы 2-й международной научно-практической конференции Курск, 2012., ТОМ 1 С. 108–111.
2. Барботько, А.И. Обработка многогранников с чётным числом сторон на токарном станке [Текст] / А.И. Барботько, М.С. Разумов // Вестник машиностроения. 2010. №1. С. 46–48.
3. Исследование значения заднего угла резца при обработке профильной части заготовок пружин для тележек грузовых и пассажирских вагонов посредством планетарного механизма [Текст] / А.Н. Гречухин, С.А. Чевычелов, М.С. Разумов, // Современные материалы, техника и технология: Материалы 2-й международной научно-практической конференции Курск, 2012., С. 93–96.
4. ОАО «РЖД» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rzd.ru/> (дата обращения: 08.04.2013)
5. Разумов, М.С. Повышение производительности формообразования многогранных наружных поверхностей посредством планетарного механизма [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук / М.С. Разумов Курск, 2011. – 158 с.

**Гречухин**  
**Александр Николаевич**  
Аспирант ЮЗГУ,  
г. Курск

**Разумов**  
**Михаил Сергеевич**  
К.т.н, ст.преподаватель ЮЗГУ,  
г. Курск

**Чевычелов**  
**Сергей Александрович**  
К.т.н, доцент ЮЗГУ,  
г. Курск

---

A.N. GRECHYKHIN, M.S. RAZUMOV, S.A CHEVYCHELOV

**EXPERIMENTAL DETERMINE THE MINIMUM CLEARANCE ANGLE TOOL FOR HANDLING OF SHAPED SPRINGS RAILWAY THROUGH PLANETARY MECHANISM**

*In the article the method of determining the minimum value of the posterior angle of the tool in the processing of the profile of the spring rail through the planetary gear.*

**Keywords:** planetary gear, rear corner, spring rail.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Analysis of the methods of shaping the profile of the workpiece springs for bogies of railway wagons [Text] / A.N. Grechukhin, S.A. Chevychelov, M.S. Razumov, // Long-term development of science, engineering and technology: Proceedings of the 2nd International Scientific Conference of Kursk, 2012., VOLUME 1 S. 108-111.
2. Barbotko, A.I. Processing polyhedra with an even number of sides on a lathe [Text] / A. I. Barbotko, M.S Razumov // Bulletin of mechanical engineering. 2010. Number 1. Pp. 46-48.
3. The study values the rear corner cutter processing profile of the workpiece springs for bogies of freight and passenger cars through the planetary gear [Text] / A.N Grechukhin, S.A. Chevychelov, M.S. Razumov, // Modern materials, engineering and technology: Proceedings of the 2nd International Scientific Conference of Kursk, 2012., S. 93-96.
4. JSC "Russian Railways" [electronic resource]. - Mode of access: <http://rzd.ru/> (date accessed: 08/04/2013)
5. Razumov, M.S Increased productivity forming polygonal exterior surfaces through the planetary gear [Text] diss. ... Candidate. tech. Science / ms, Razumov Kursk, 2011. - 158 p.

**Grechykhin Alexander**  
Post-graduate student SWSU, Kursk

**Razumov Mikhail**  
Candidate of science, senior teacher  
of the city SWSU, Kursk

**Chevychelov Sergey**  
Candidate of science, senior lecturer  
of the city SWSU, Kursk

---

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОСТАТОЧНЫХ СЛОЕВ ФРЕЗОЙ ДИСКОВОЙ С ПЕРЕМЕННЫМ РАДИУСОМ ПРИ ОБРАБОТКЕ РК-ПРОФИЛЬНЫХ ВАЛОВ

*В статье рассматривается методика расчета геометрических параметров остаточных слоев при работе фрезы дисковой с переменным радиусом*

**Ключевые слова:** фрезерование, фреза дисковая, остаточные слои, РК-профильный вал

РК-профильные соединения широко известны и обладают рядом достоинств, перед традиционными соединениями, но они находят ограниченное применение в отечественном машиностроении вследствие недостаточной технологичности и слабой разработанности необходимого для их производства технологического и инструментального обеспечения. [1].

Для повышения производительности обработки валов с равноосным контуром в работах [2,3] был предложен способ обработки дисковой фрезой с переменным радиусом, позволяющий исключить возвратно-поступательные гармонические движения, реализация которых осуществляется конструктивным исполнением дисковой фрезы, что не требует наличия специальных станков и приспособлений (рис. 1).

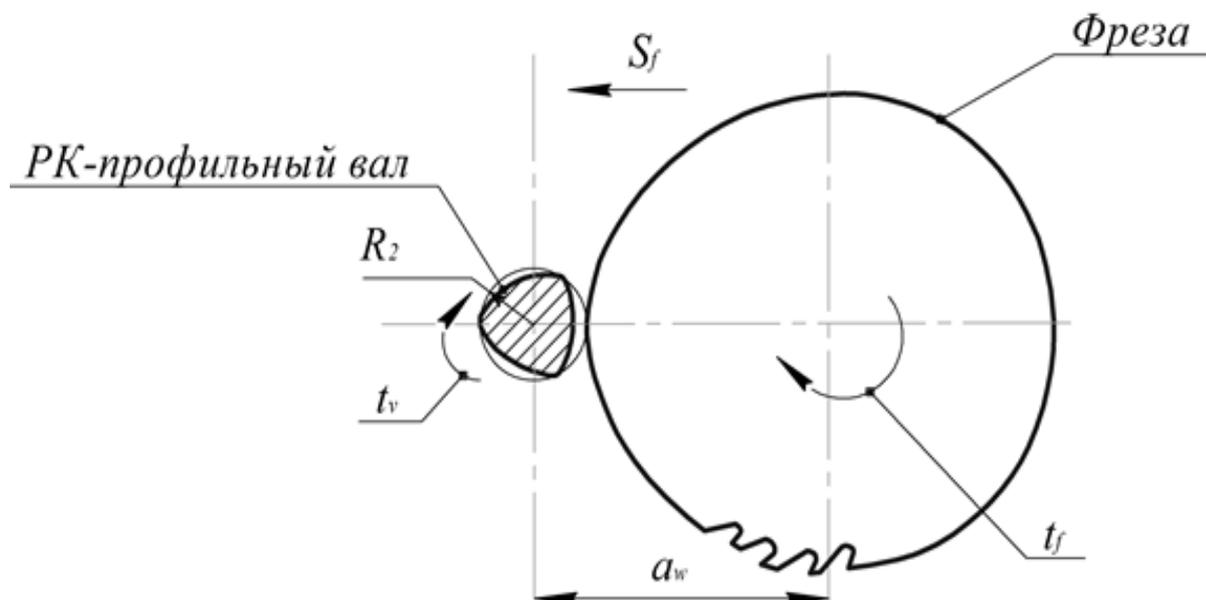


Рисунок 1 - Схема обработки валов с равноосным контуром дисковой фрезой с переменным радиусом

Одним из основных показателей качества при проектировании данных фрез является параметры остаточных гребешков, остающихся после снятия припуска, образованные соседними режущими кромками и характеризующиеся высотой  $R_z$  и шагом  $S_z$ .

Анализ литературных источников [4,5] позволил построить методику расчета параметров остаточных слоев при работе фрезы дисковой с переменным радиусом.

Суть данной методики заключается в следующем (рис.2):

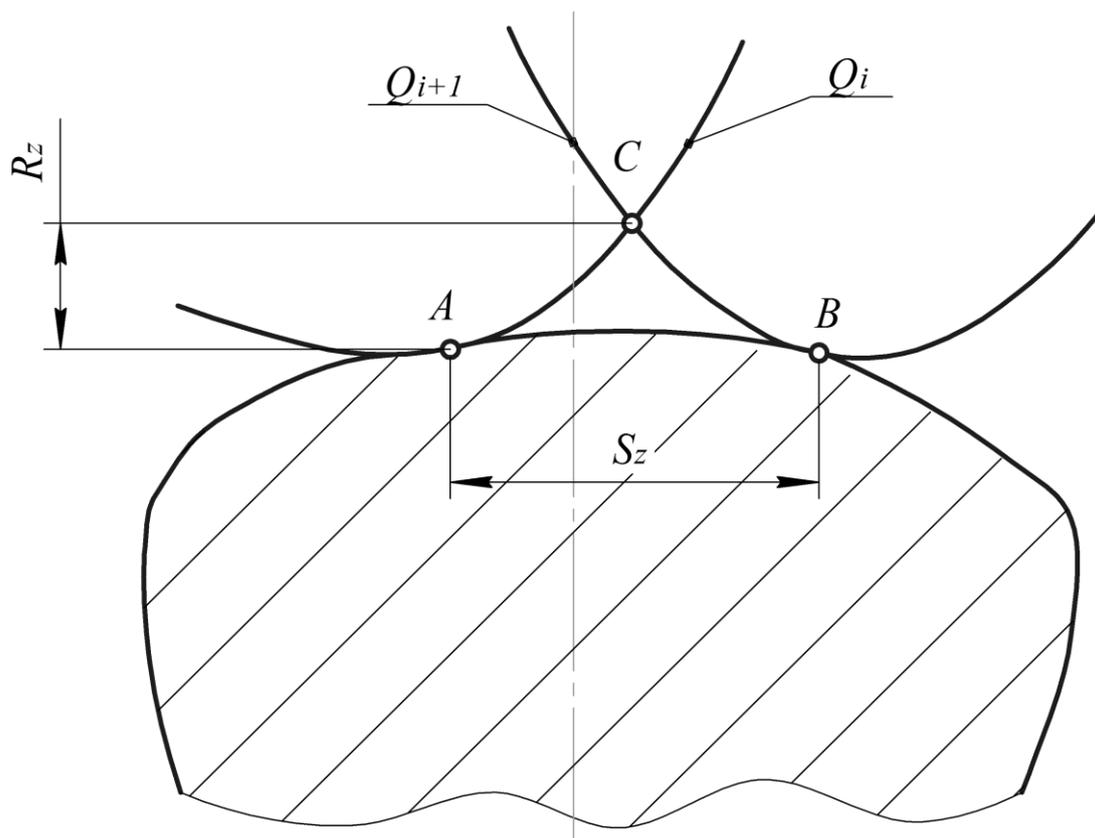


Рисунок 2 - Схема расчета параметров остаточных слоев

1. Находим координаты точки контакта поверхности резания, образованной  $i$ -ой режущей кромкой с поверхностью заготовки (точка  $A$ ) путем решения относительно параметра  $t_A$  уравнения:

$$[\bar{Q}_{it}(\theta_i, \varphi_i, t_A) \times \bar{Q}_{i\varphi}(\theta_i, \varphi_i, t_A)] \cdot \bar{Q}_{i\theta}(\theta_i, \varphi_i, t_A) = 0, \quad (1)$$

где  $\bar{Q}_{it}(\theta_i, \varphi_i, t_A)$  - производная  $i$ -ой поверхности резания по времени  $t_A$ ;

$\bar{Q}_{i\varphi}(\theta_i, \varphi_i, t_A)$  - производная  $i$ -ой поверхности резания по параметру производящей поверхности фрезы  $\varphi$ ;

$\bar{Q}_{i\theta}(\theta_i, \varphi_i, t_A)$  - производная  $i$ -ой поверхности резания по параметру производящей поверхности  $\theta$ .

Координаты точки  $A$  по известному параметру  $t_A$  найдем как:

$$\bar{R}_A = [X_A \ Y_A \ Z_A \ 1]^T = \bar{Q}_i(\theta_i, \varphi_i, t_A), \quad (2)$$

где  $\bar{Q}_i(\theta_i, \varphi_i, t_A)$  - координаты на поверхности резания, образованной  $i$ -ой режущей кромкой в момент времени  $t_A$ .

2. Находим координаты точки контакта поверхности резания, образованной  $(i+1)$ -й режущей кромкой с поверхностью заготовки (точка  $B$ ) путем решения относительно параметра  $t_B$  уравнения:

$$[\bar{Q}_{(i+1)t}(\theta_{(i+1)}, \varphi_{(i+1)}, t_B) \times \bar{Q}_{(i+1)\varphi}(\theta_{(i+1)}, \varphi_{(i+1)}, t_B)] \cdot \bar{Q}_{(i+1)\theta}(\theta_{(i+1)}, \varphi_{(i+1)}, t_B) = 0. \quad (3)$$

Координаты точки  $B$  по известному параметру  $t_B$  найдем как:

$$\bar{R}_B = [X_B \ Y_B \ Z_B \ 1]^T = \bar{Q}_{(i+1)}(\theta_{(i+1)}, \varphi_{(i+1)}, t_B), \quad (4)$$

где  $\bar{Q}_{(i+1)}(\theta_{(i+1)}, \varphi_{(i+1)}, t_B)$  - координаты на поверхности резания, образованной  $i$ -ой режущей кромкой в момент времени  $t_B$ .

3. Находим координаты точки пересечения поверхностей резания, образованных  $i$ -ой и  $(i+1)$ -й режущими кромками (точка  $C$ ) путем решения относительно параметров  $t_C$  и  $t'_C$  системы уравнений:

$$\begin{cases} \bar{i} \cdot \bar{Q}_i(\theta_i, \varphi_i, t_C) = \bar{i} \cdot \bar{Q}_{(i+1)}(\theta_{(i+1)}, \varphi_{(i+1)}, t'_C); \\ \bar{j} \cdot \bar{Q}_i(\theta_i, \varphi_i, t_C) = \bar{j} \cdot \bar{Q}_{(i+1)}(\theta_{(i+1)}, \varphi_{(i+1)}, t'_C), \end{cases} \quad (5)$$

где  $\bar{i}$  - единичный вектор, связанный с координатной осью  $X$  ;

$\bar{j}$  - единичный вектор, связанный с координатной осью  $Y$  .

4. На участках с малой величиной припуска высота гребешка может быть ограничена материалом заготовки, на этих участках координаты точки  $C$  найдем путем решения относительно параметров  $t_C$  и  $\theta_z$  системы уравнений:

$$\begin{cases} \bar{i} \cdot \bar{Q}_i(\theta_i, \varphi_i, t_C) = \bar{i} \cdot \bar{R}_{zag}(\theta_z, h); \\ \bar{j} \cdot \bar{Q}_i(\theta_i, \varphi_i, t_C) = \bar{j} \cdot \bar{R}_{zag}(\theta_z, h), \end{cases} \quad (6)$$

где  $\bar{R}_{zag}(\theta_z, h)$  - поверхность заготовки, которая описывается следующим уравнением:

$$\bar{R}_{zag}(\theta_z, h) = [R_2 \cdot \cos \theta_z \quad R_2 \cdot \sin \theta_z \quad h \quad 1]^T, \quad (7)$$

где  $\theta_z$  - параметрический угол;  $h$  - параметр заготовки.

Координаты точки  $C$  по известным параметрам  $t_C$  и  $\theta_z$  найдем как:

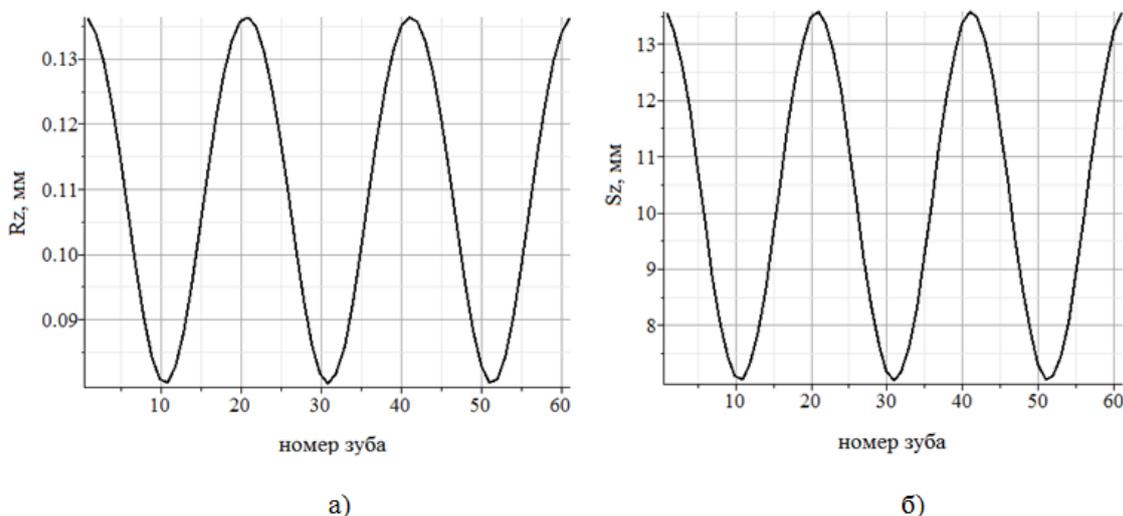
$$\bar{R}_C = [X_C \quad Y_C \quad Z_C \quad 1]^T = \bar{Q}_{(i+1)}(\theta_{(i+1)}, \varphi_{(i+1)}, t_C). \quad (8)$$

Шаг и высоту остаточного слоя можно определить по следующим формулам

$$S_z = |\bar{R}_A - \bar{R}_B|; \quad R_z = \left| \frac{2 \cdot S\Delta_{ABC}}{S_z} \right|, \quad (9)$$

где  $S\Delta_{ABC} = \frac{1}{2} \cdot (|(X_A - X_C) \cdot (Y_B - Y_C) - (X_B - X_C) \cdot (Y_A - Y_C)|)$ . (10)

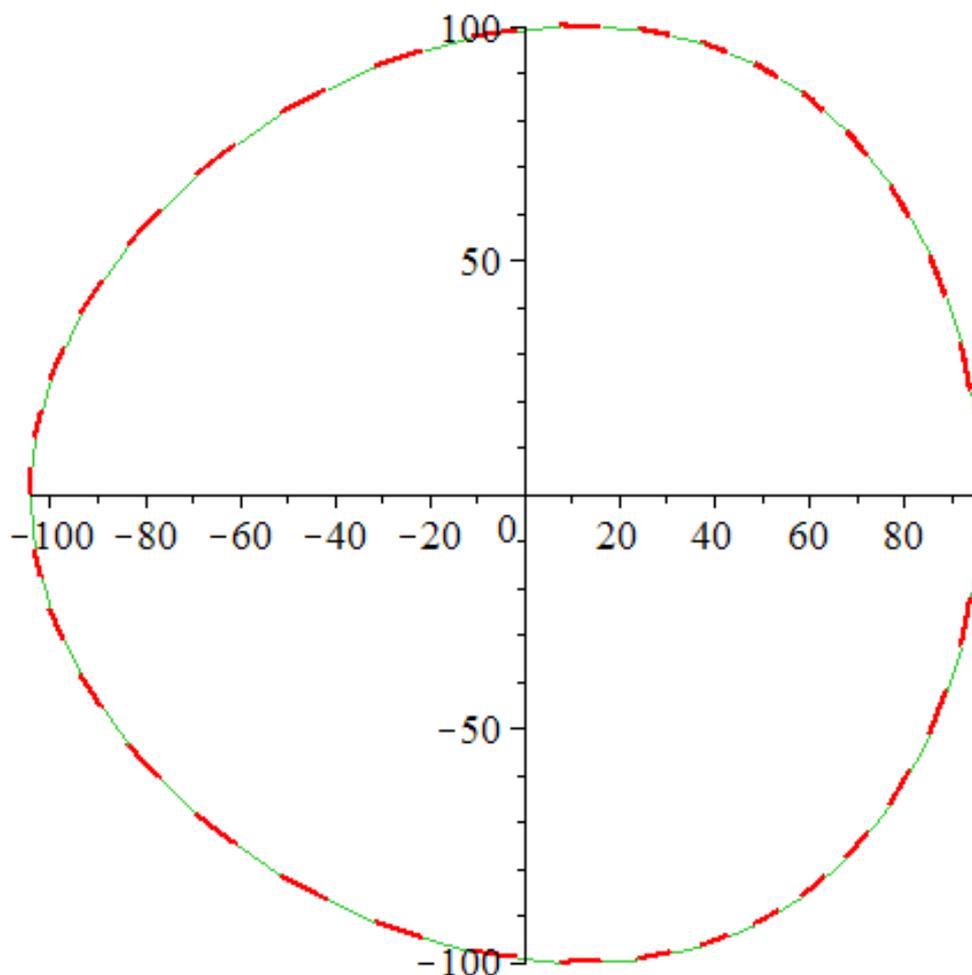
На основе данной методики с использованием созданной программы расчета параметров остаточных слоев фрезой дисковой с переменным радиусом для обработки валов с равноосным контуром, были проведены теоретические исследования изменения шага и высоты остаточного гребешка при частоте вращения вала и фрезы 60 об/мин, подаче 80 мм/мин, радиусе заготовки 100 мм, ширине заготовки 20 мм, эксцентриситета вала 4 мм, среднего радиуса фрезы 200 мм, числе зубьев фрезы 61, позволили получить следующие результаты (рис.3).



**Рисунок 3 - График изменения параметров остаточного гребешка**  
 а) – изменение параметра  $Rz$  ; б) – изменение параметра  $Sz$

Созданная программа расчета параметров остаточных слоев фрезой дисковой с переменным радиусом для обработки валов с равноосным контуром позволяет построить геометрическую модель обработанного РК-профильного вала (рис.4).

Использование предложенной методики позволит учитывать особенность формирования остаточных гребешков при работе фрезы дисковой с переменным радиусом для обработки валов с равноосным контуром, выполнить оценку ее работоспособности и осуществить подбор значений конструктивных параметров.



*Рисунок 4 - Геометрическая модель обработанного РК-профильного вала*

Статья подготовлена по материалам доклада на VI Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимченко, А.И. Технология изготовления деталей профильных бесшпоночных соединений [Текст] / А.И. Тимченко. М.: ВНИИТЭМР, 1988. 160 с.
2. Куц, В.В., Ситнез производящих поверхностей фрез-протяжек для обработки валов с равноосным контуром [Текст] / В.В. Куц, А.Г. Ивахненко, М.Л. Сторублев // Известия Тульского государственного университета. 2012, Вып.8 – С.42-48.
3. Кузьменко, А.П. Моделирование режущих кромок дисковой фрезы с переменным радиусом предназначенной для обработки РК-профильных валов [Текст] / А.П. Кузьменко, В.В. Куц, Ю. А. Максименко // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012, №1(40).ч.1. – С.116-120.
4. Лашнев, С.И. Геометрическая теория формирования поверхностей режущими инструментами: Монография [Текст] /С.И. Лашнев, А.Н. Борисов, С.Г. Емельянов // Курск. гос. техн. ун-т. Курск, 1997. 391с.

5. Емельянов С.Г., Куц В.В. Математическое моделирование сборных фасонных фрез: Монография / Курск. гос. техн. ун-т. Курск, 2008. 254с.

**Максименко Юлия Андреевна**

Юго-Западный государственный университет,  
г. Курск  
Аспирант кафедры «Управление качеством, метро-  
логии и сертификации»  
Тел.: 8-951-333-92-99  
E-mail: [yuliyamaximencko2010@yandex.ru](mailto:yuliyamaximencko2010@yandex.ru)

**Куц Вадим Васильевич**

Юго-Западный государственный университет,  
г. Курск  
Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры  
«Управление качеством, метрологии и сертифика-  
ции»  
Тел.: (4712) 32-61-00  
E-mail: [kuc-vadim@yandex.ru](mailto:kuc-vadim@yandex.ru)

Y.A. MAKSIMENKO, V.V. KUTS

**CALCULATION OF GEOMETRIC PARAMETERS OF RESIDUAL LAYER  
CUTTERS WITH VARIABLE RADIUS AT PROCESSING  
RK-PROFILE SHAFT**

*Experience of development of calculation of the geometric parameters of the residual layer  
cutters when working with a variable radius*

**Keywords:** milling, milling cutters, residual layers, RK-profile shaft

**BIBLIOGRAPHY**

1. Timchenko, A.I. Technology manufacturing details of profile besshponochnyh compounds [Text] / A.Timchenko. M.VNIITEMR 1988. 160.
2. Kuts, V.V., Sitnez producing surface-broaching cutters for machining shafts with equiaxed loop [Text] / V.V. Kutz, A.G. Ivakhnenko, M.L. Storublev // Proceedings of the Tula State University. 2012, Vyp.8-P.42-48.
3. Kuzmenko, A.P. Simulation of cutting edge disc cutter with variable radius designed to handle public relations profile shafts [Text] / A.P. Kuzmenko, V. Kutz, A. Maksymenko // Proceedings of the Southwestern State University. 2012, № 1 (40). P.1. - P.116-120.
4. Lashnev, S.I. The geometric theory of the formation of the cutting tools: Monograph [Text] / S.I. Lashnev, A.N. Borisov, S.G. Emelyanov / / Kursk. State. tech. Univ. Kursk, 1997. 391s.
5. Emelyanov S.G., Vladimir Kuts Mathematical modeling of prefabricated shaped cutters: Monograph / Kursk. State. tech. Univ. Kursk, 2008. 254s.

**Maksimenko J.A.**

Southwestern State University,  
Kursk  
Graduate student of "Quality Control, Metrology and Cer-  
tification"  
Тел.: 8-951-333-92-99  
E-mail: [yuliyamaximencko2010@yandex.ru](mailto:yuliyamaximencko2010@yandex.ru)

**Kuts V.V.**

Candidate Of Sciences, Associate Professor, Quality Con-  
trol, Metrology And Certification Department, SWSU  
Тел.: (4712) 32-61-00  
E-mail: [kuc-vadim@yandex.ru](mailto:kuc-vadim@yandex.ru)

Е.В.ОВЧИННИКОВ

## НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ФТОРСОДЕРЖАЩИЕ ПОКРЫТИЯ

*В статье рассмотрены вопросы формирования фторсодержащих олигомеров на субстратах, формируемых плазмохимическими методами: нитрид титана, алмазоподобные соединения. Установлено влияние подложки на процессы наноструктурирования в получаемых композиционных покрытиях. Проведение термообработки приводит к увеличению микротвердости исследуемых систем.*

**Ключевые слова:** покрытие, нитрид титана, алмазосодержащие соединения, плазма, фторсодержащие олигомеры, структура, свойство.

В современном машиностроении широко применяются тонкопленочные покрытия различного функционального назначения, среди которых особую перспективу имеют покрытия на основе фторсодержащих полимеров и олигомеров [1]. Такие покрытия, толщина которых не превышает 1-3 мкм, удается получать с помощью двух технологий: плазмохимической из активной газовой фазы и растворной, благодаря разработке растворимых фракций фторсодержащих олигомеров. Особый интерес вызывают покрытия, сформированные по растворной технологии, не требующей специального дорогостоящего оборудования. Данные покрытия обладают комплексом уникальных эксплуатационных характеристик, т. к. молекулы олигомеров сочетают в себе высокую химическую стойкость (связи C-F), активность (химически активные концевые функциональные группы), гибкость и подвижность (наличие в структуре молекулярной цепи эфирных связей и сравнительно невысокая молекулярная масса макромолекулы) [2].

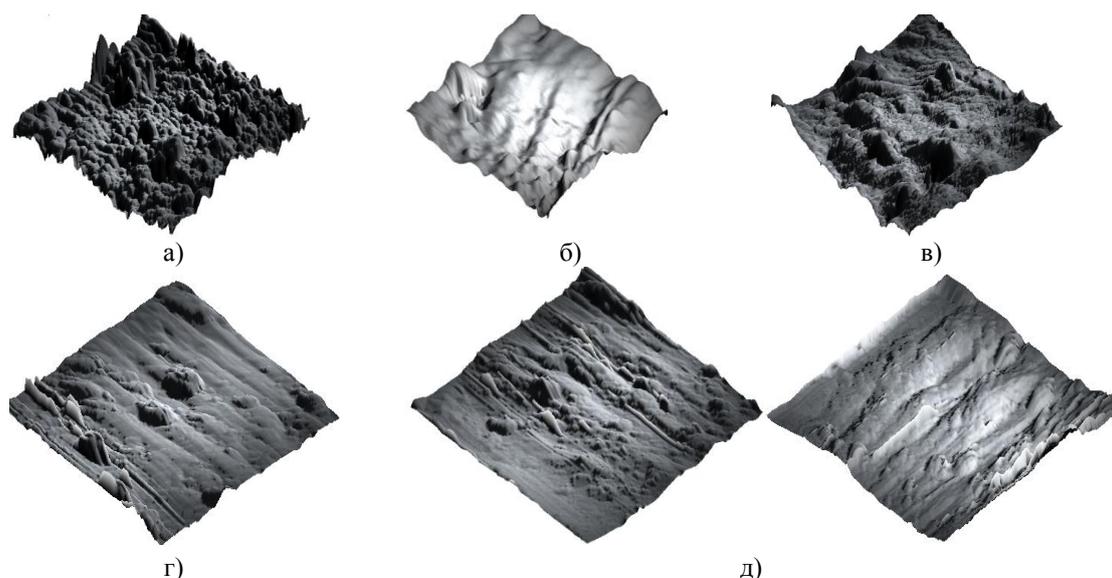
Наиболее эффективными покрытиями, с точки зрения износостойкости и минимального коэффициента трения, состоящие из твердой подложки, воспринимающей нагрузку, и сравнительно мягкого поверхностного слоя с высокой способностью к передеформированию без разрушения. В качестве такого слоя могут быть использованы пластичные материалы: медь, политетрафторэтилен, полиэтилен, наносимые методами плазмохимической обработки или другими методами, применяющимися, например, в технологии переработки пластических масс.

Целью данной работы является изучение структуры и физико-механических свойств наноструктурированных покрытий на базе нитрида титана, алмазоподобного углерода и фторсодержащих соединений, формируемых растворными и плазмохимическими методами.

Формирование базового покрытия из нитрида титана осуществляли методом реактивного электродугового испарения на установке УРМ3.279.048. В качестве подложки использовали стальные пластины или стержни (диаметром 10 мм) из стали 45, закаленные до 58-60 HRC с чистотой поверхности  $R_a=0.25\text{мкм}$ . Подложку очищали и нагревали ионами титана. Скорость нагрева составляла 3,2-3,5 К/с. Покрытие наносили при токе испарителя 110-130 А и напряжении 40-50 В в среде реакционного газа азота. Алмазоподобные покрытия формировались на поверхности углеродистой стали 45. Покрытия формировали путем осаждения из импульсной плазмы катодно-дугового разряда (DVD-CVV) в среде паров углеводородов (ацетилен, метан, пропан). Толщина алмазоподобного покрытия составляла не более 2 мкм. В ряде случаев для проведения модельных экспериментов в качестве подложки использовали полированные пластины из германия. Изучение структуры сформированных покрытий проводили на ИК-спектрофотометре TENSOR-27.

Для получения композиционных тонкопленочных покрытий подложки из стали с покрытием из нитрида титана, окунали в модифицирующий состав. Данный состав представляет собой 1-2 масс.% раствор фторсодержащего олигомера в хладоне-113. В данной работе при модифицировании подложки использовали фолеокс Ф-АК1, Ф1 структурной формулой  $R_F-R_f$ , где  $R_F$  – фторсодержащий радикал,  $-CONH_2$  и  $-COOH$  – концевые группы. Термообработка полученных композиционных покрытий проводилась при 373К, 473К и 523К в течении

часа. Методом атомной силовой микроскопии изучена морфология композиционных покрытий. Поверхностную активность покрытий изучали с помощью прямотеневого метода по величине изменения краевого угла смачивания. Для определения поверхностной энергии покрытий использовали полярную жидкость – воду и неполярную жидкость – вазелиновое масло. Для придания покрытиям гидрофобных свойств проводилась трехкратная обработка в 2% растворе фторсодержащих олигомеров в хладоне. Технологические параметры эксплуатации покрытий моделировали температурной обработкой в интервале от 293 до 573К в течение 1 часа. Морфология формируемых наноконпозиционных покрытий на основе нитрида титана и фторсодержащего олигомера Ф-АК1 представлена на рисунке 1. Исследование строения композиционных покрытий на основе нитрида титана свидетельствует о том, что их морфология существенно зависит от технологических режимов формирования. При углах 30-60° по отношению к нормали рабочей поверхности катода на поверхности подложки формируется покрытие с так называемой капельной фазой. Это покрытие содержит ряд фрагментов с формой, близкой к сферической, размерами от 0,5 до 10 мкм (рис.1). Уменьшение тока и угла расположения подложки обеспечивает формирование гладких покрытий с однородной структурой, не имеющей крупных агрегатов. При нанесении на пленку нитрида титана слоя фторсодержащих олигомеров или политетрафторэтилена (или одновременно обоих слоев) поверхность образца приобретает гладкий однородный характер. Фторокс Ф-АК1 вначале заполняет микронеровности (рис.1), уменьшая количество поверхностных дефектов, а затем формирует собственную структуру, в которой в роли центров кристаллизации выступают поверхностные дефекты подложки. Представляет интерес изучить характер изменений в поведении кривых опорных поверхностей, т.к. опорные кривые позволяют судить о распределении материала в шероховатом слое [3]. Из полученных данных следует, что нанесение фторсодержащих олигомеров приводит к изменению первого участка опорной кривой, который соответствует попаданию в сечение самой высокой впадины. Одновременно увеличивается количество материала на втором участке опорной кривой, уменьшается количество материала в третьем участке кривой, соответствующем наиболее высоким выступам подложки. Значения высотной характеристики при этом составили  $R_a=155,9$  нм,  $R_{max}$  увеличивает свои значения до 2200 нм. Исходя из характера зависимости опорной кривой, видно, что наибольшее количество вещества находится под вторым участком опорной кривой. В пленках ФСО, нанесенных на поверхности нитрида титана, не наблюдается текстурированности. Проведение термообработки приводит к изменению значений  $R_a$  до 62.7 нм,  $R_{max}$  до 600 нм.



**Рисунок 1 - Морфология нитрида титана, модифицированного фторсодержащим олигомером Ф-АК-1**  
 а) нитрид титана; б) нитрид титана+Ф-АК1; в) нитрид титана+Ф-АК1 + термообработка при  $T=373K$ ;  
 г) нитрид титана+Ф-АК1 + термообработка при  $T=473K$ ; д) нитрид титана+Ф-АК1+ термообработка при  $T=523K$ . Площадь сканирования 25x25 мкм.

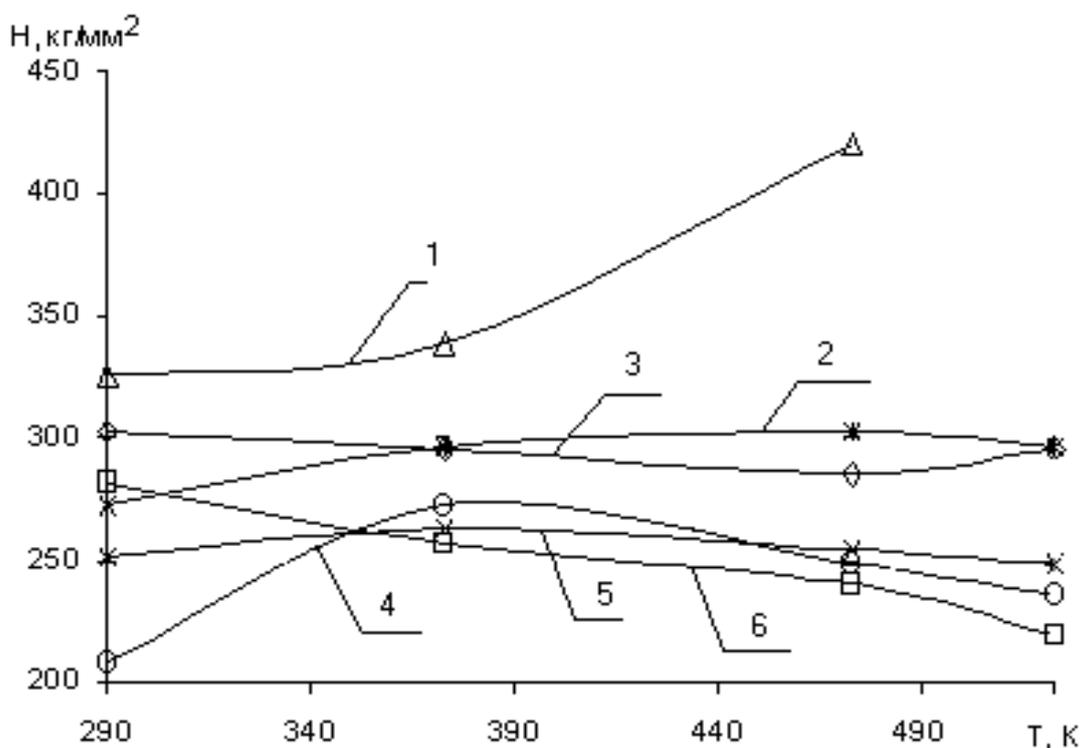
Уменьшаются площади под первым и третьим участками опорной кривой, что свидетельствует о существенном сглаживании поверхности нитрида титана, модифицированного ФСО. В результате термообработки ( $T=373\text{K}$ ) в пленках наблюдается появление ориентации молекул вдоль определенного направления. Ориентация молекул ФСО может существо изменить свойства композиционных покрытий, т.к. известно, что текстурированные образцы обладают повышенными физико-механическими свойствами вдоль направления текстуры. Увеличение температуры до  $T=473\text{K}$  приводит к протеканию кристаллизационных процессов в пленках ФСО. Данный процесс сопровождается увеличением значений  $R_a$  до 120.6 нм,  $R_{\max}$  до 1500 нм. Наблюдается формирование кристаллических структур типа «чешуек» с латеральным размером 4,8×2,4 мкм. Необходимо отметить, что при данной температуре образуется достаточно большое количество «мелких» кристаллических образований латеральным размером от 190 нм до 600 нм. Уменьшается количество впадин, с увеличением количества материала во второй и третьей частях опорной кривой. Текстурированность пленок снижается. Термообработка, проводимая при  $T=523\text{K}$ , приводит к десорбции пленки ФСО, в результате чего частично обнажается исходная поверхность подложки нитрида титана. Одновременно более активно протекает процесс кристаллизации в результате большой подвижности молекул ФСО по поверхности подложки и миграции к центрам кристаллизации. В ходе данного процесса размеры кристаллических образований увеличиваются до 2,4×4,8 мкм. Количество мелких кристаллов резко уменьшается. Значения  $R_a$  и  $R_{\max}$  уменьшаются до 84,4 нм и 1100 нм соответственно. Кристаллические структуры, образованные из молекул ФСО на поверхности подложки из нитрида титана, ориентированы вдоль некоторого направления. Исследования микротвердости образцов нитрида титана, модифицированных ФСО и без модификации, а так же при воздействии энергетических факторов показали, что изменения значений микротвердости имеют неоднозначный характер. Нанесение пленок фторокса Ф-АК1 на покрытие из нитрида титана приводит к уменьшению значений микротвердости до 408 кг/мм<sup>2</sup> (рис.2).

Проведение термообработки приводит к увеличению значений микротвердости в следствие залечивания дефектов поверхности и протекания процесса кристаллизации в пленке фторсодержащего олигомера. Резкое уменьшение микротвердости при термообработке покрытий нитрида титана обусловлено протеканием рекристаллизационных процессов в стальной подложке при температуре  $T=523\text{K}$ , сопровождающихся снижением прочности и твердости покрытий.

Формирование алмазоподобных покрытий на стальных подложках согласно данных работы [4] приводит к появлению полос поглощения, лежащих в области 950-1300 см<sup>-1</sup>, которые можно отнести к валентным колебаниям С-Н групп.

Полосы поглощения, лежащие в области 2200-3000 см<sup>-1</sup>, состоят из пиков валентных колебаний карбонильных групп, одинарных С-С, и двойных С=С связей и деформационных колебаний С-Н-групп. При этом наблюдались пики в области 2100 см<sup>-1</sup>, 1000 см<sup>-1</sup>, отвечающие валентным колебаниям С≡С-связей [4]. В работе [4] было установлено, что в спектрах МНПВО покрытий D1 а-С:Н, синтезированных из разных углеводородов – октана, толуола и циклогексана, не наблюдается каких-либо существенных различий. Они подобны спектрам а-С:Н пленок с  $n \geq 2.0$ , полученных с применением ацетилена. Поэтому делается вывод, что независимо от химической природы исходного углеводорода D1-пленки а-С:Н имеют типичные ИК-спектры МНПВО. Обработка алмазоподобных покрытий фторсодержащими олигомерами (фторокс Ф1) приводит к появлению в спектре композиционного покрытия достаточно большого количества полос поглощения (рис. 3).

Основные полосы поглощения в спектрах ФСО марок Ф1 и Ф14 находятся в области волновых чисел от 700 до 1700 см<sup>-1</sup>. Полоса поглощения при 900 см<sup>-1</sup> может быть отнесена к поглощению CF<sub>3</sub>-групп макромолекул ФСО [4]. Интенсивные полосы поглощения около 1130 – 1340 см<sup>-1</sup> обязаны своим происхождением колебанию связей С-Ф и С-Ф<sub>2</sub> [4]. В спектре Ф1 на алмазоподобной подложке наблюдаются дополнительные полосы поглощения при 1050 и 1670 см<sup>-1</sup> и широкая полоса поглощения около 3500 см<sup>-1</sup>, которые можно отнести к поглощению COOH-групп.



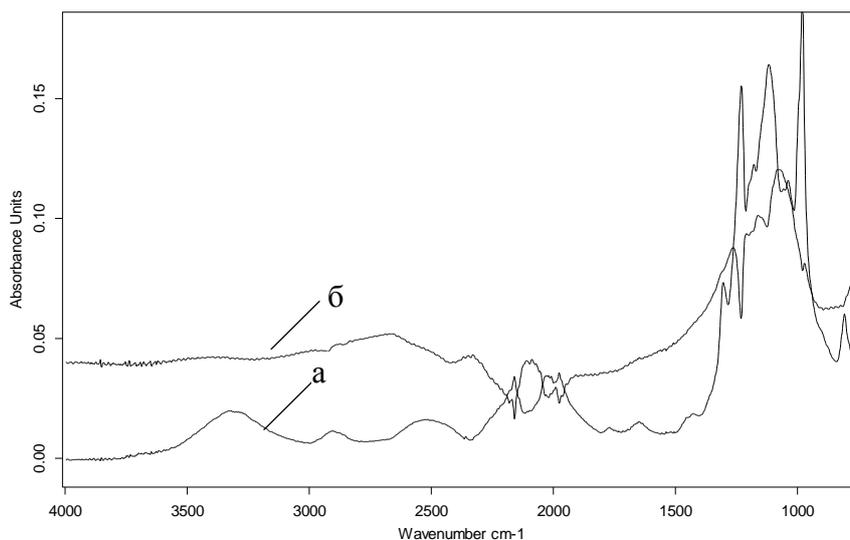
**Рисунок 2 - Зависимость микротвердости от температуры термообработки подложек**  
 1-нитрид титана + фторопласт после коррозионных испытаний; 2-нитрид титана + Ф-АК1; 3-нитрид титана; 4-нитрид титана+Ф-АК2; нитрид титана+Ф-14; нитрид титана + фторопласт

Слабая полоса поглощения при  $780\text{ см}^{-1}$  отнесена к поглощению групп  $\text{CF}_3$  в аморфных областях. Увеличение толщины покрытия ФСО приводит к повышению контрастности спектров МНПВО ФСО. При этом следует отметить неоднозначность изменения оптических плотностей полос поглощения с увеличением толщины слоя ФСО, что свидетельствует об оптической неоднородности слоев ФСО разной толщины, и может быть объяснено ориентационной неоднородностью фторсодержащих олигомеров в зависимости от толщины слоя.

Проведение термической обработки согласно данным работы [4] приводит к существенным визуальным изменениям поверхности. Алмазоподобная пленка, полученная электролитическим способом и отожженная при  $573\text{ К}$  в вакууме меняет цвет со светлорыжевого на темный, почти черный, оставаясь при этом сплошной. Отжиг при  $873\text{ К}$  приводит к более значительному потемнению пленки: она становится черной, глянцевоблестящей. После отжига при  $1173\text{ К}$  пленка становится прозрачной. Согласно данным работы [5] в ИК-спектре алмазоподобных углеродных пленок, сформированных электролитическим способом, наблюдаются две широкие полосы поглощения в области  $1580\text{ см}^{-1}$  и  $1350\text{ см}^{-1}$ . При проведении термообработки при  $573\text{ К}$  ИК-спектр отожженного образца мало чем отличается от ИК-спектра исходного покрытия. Увеличение температуры до  $873\text{ К}$  также не приводит к существенным структурным изменениям.

Проведение термообработки алмазоподобных покрытий (образец 1) при  $393\text{ К}$  в течение одного часа приводит к исчезновению полос в области  $1100\text{-}1300\text{ см}^{-1}$  и образованию размытого пика, находящегося в области  $1000\text{-}1400\text{ см}^{-1}$ . Термообработка алмазоподобного покрытия (образец 2) при  $T=393\text{ К}$  приводит к изменению в ИК-спектре данного образца. Наблюдается увеличение интенсивности пика поглощения с максимумом при  $800\text{ см}^{-1}$ , появление дополнительных полос поглощения в области  $1400\text{-}1600\text{ см}^{-1}$ ,  $1800\text{-}2100\text{ см}^{-1}$ . Термообработка алмазоподобных покрытий, модифицированных фторсодержащими олигомерами в общем случае приводит к исчезновению поглощения в области  $750\text{ см}^{-1} - 900\text{ см}^{-1}$ ,  $1400 -$

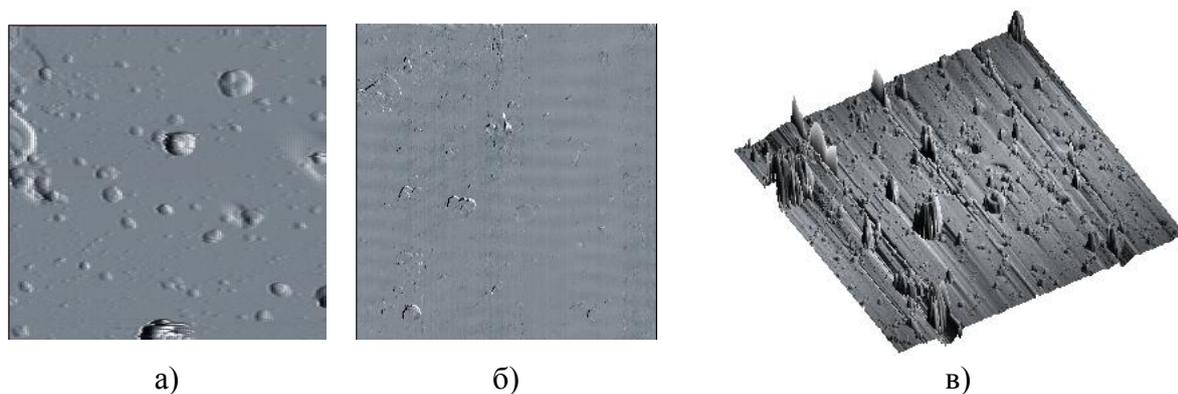
1800  $\text{cm}^{-1}$ . Для алмазоподобного покрытия (образец 1), обработанного ФСО Ф1, при термообработке происходит резкое увеличение интенсивности полос поглощения, находящихся в области 1800 – 2300  $\text{cm}^{-1}$ . Увеличение температуры термообработки до  $T=493$  К фактически не приводит к структурным изменениям в алмазоподобных покрытиях, что подтверждается данными ИК-спектроскопии НПВО. Существенных структурных изменений при данной термообработке не наблюдается в композиционных алмазоподобных покрытиях, модифицированных фторсодержащими олигомерами. Необходимо только отметить о вырождении малоинтенсивных полос поглощения, которые присутствовали в ИК-спектре алмазоподобных покрытий в размытой полосе поглощения, лежащей в области 900 – 1600  $\text{cm}^{-1}$ , и наблюдавшихся при термообработке  $T=373$  К.



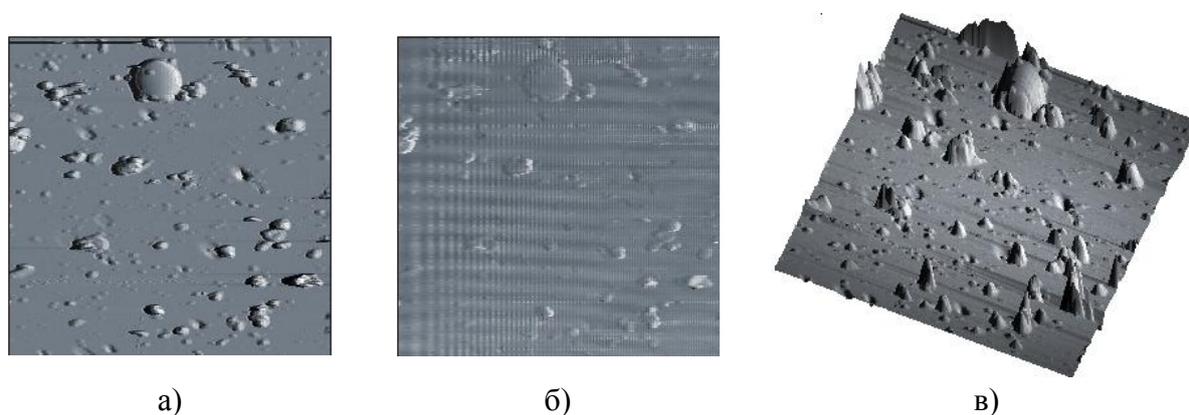
**Рисунок 3 – ИК-спектр алмазоподобного покрытия (образец №1)**  
*а – с пленкой ФСО Ф1, б – исходное покрытие*

Дальнейшее увеличение температуры термообработки ( $T=573$  К) приводит к деструкции фторсодержащих олигомеров с поверхности алмазоподобного покрытия, что подтверждается данными ИК-спектроскопии НПВО, исчезновению полос поглощения в области 1000 – 1800  $\text{cm}^{-1}$  и появлению полос поглощения в области 800  $\text{cm}^{-1}$  (образец 2) и 1000  $\text{cm}^{-1}$  (образец 1). Дальнейшая термообработка алмазоподобных покрытий и их композиций не проводилась, т.к. было установлено, что на стальной подложке при термообработке  $T=573$  К в течение 1 часа уменьшалась адгезия алмазоподобных покрытий и наблюдалось почти полное отслаивание покрытия от подложки. Изменения в структуре алмазоподобных покрытий, сформированных в конечном итоге должны сказываться на морфологии тонкослойных алмазоподобных покрытий. Морфологию алмазоподобных покрытий, изучали на оптическом микроскопе в отраженном свете. Для определения наличия кристаллических образований в покрытиях использовали поляризованный свет.

Исходя из полученных результатов, представленных на рисунке 4 и 5, видно, что морфология алмазоподобных покрытий состоит из совокупности мелкодисперсных частиц латеральным размером 1 – 3 мкм для алмазоподобного покрытия образца 1 и 4 – 8 мкм для алмазоподобного покрытия образца 2. В структуре алмазоподобного покрытия образца 2 содержатся кристаллические образования глобулярной формы размером ~10 – 15 мкм (рис. 5). Проведение термообработки приводит к уменьшению дисперсности наблюдаемых частиц ~1,2 – 1,8 раза для обоих типов покрытий. Увеличение режима термообработки до 493 К приводит к укрупнению размеров частиц при существенном уменьшении их количества на поверхности.



**Рисунок 4 - Алмазоподобное покрытие на стальной подложке (образец №1)**  
 а) топография, б) фазовый контраст, в) 3D-изображение, площадь сканирования 10x10 мкм



**Рисунок 5 - Алмазоподобное покрытие на стальной подложке (образец №2)**  
 а) топография, б) фазовый контраст, в) 3D-изображение, площадь сканирования 25x25 мкм

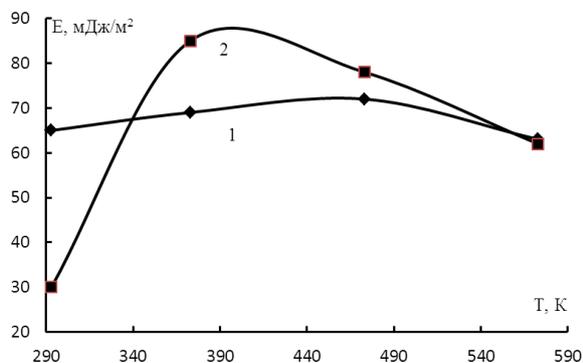
Изменение в структуре морфологии алмазоподобных покрытий и композиций на их основе должны сопровождаться изменением поверхностной энергии. Проведенные исследования, по определению поверхностной энергии алмазоподобных покрытий подвергнутых термообработке (рис.6) показали, что с увеличением температуры термообработки значения поверхностной энергии возрастают.

Изменение значений поверхностной энергии подтверждает результаты о структурной перестройке алмазоподобных покрытий при термообработке. Превышение температуры термообработки свыше 573 К ведет к резкому снижению значений поверхностной энергии в результате разрушения алмазоподобного покрытия.

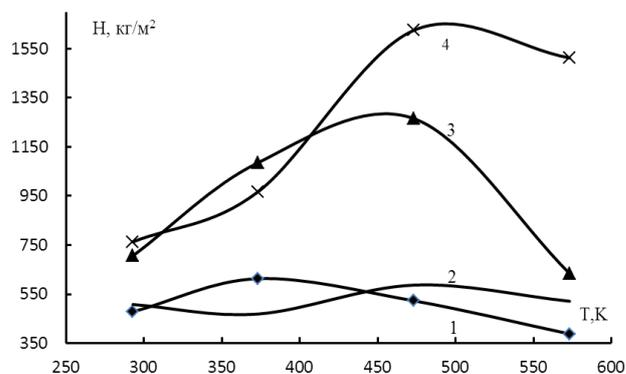
Обработка поверхности алмазоподобных покрытий фторсодержащими олигомерами приводит к уменьшению значений поверхностной энергии (рис.7), что может свидетельствовать об уменьшении адгезионного взаимодействия на поверхности композиционного покрытия. Термообработка композиционного алмазоподобного покрытия приводит к увеличению значений поверхностной энергии, как и в случае не обработанной алмазоподобной подложки. Процессы, приводящие к деструкции фторсодержащего олигомера с поверхности алмазоподобного покрытия снижают значения поверхностной энергии до значений соответствующим чистой алмазоподобной подложке.

Термообработка изменяет процентное содержание дисперсной фазы в алмазоподобных покрытиях. Установлено, что термическое воздействие оказывает неоднозначное влияние на процентное содержание углерода  $sp^2$ -гибридизации и зависит от предыстории образца (режимов формирования покрытия) (рис. 7).

Нанесение фторсодержащих олигомеров на поверхность нанокomпозиционных покрытий с последующей термообработкой также приводит к изменению содержания рассматриваемых частиц в структуре покрытия. Вышеприведенные структурные, морфологические и энергетические изменения, наблюдаемые в алмазоподобных покрытиях, должны приводить к существенным изменениям в механических характеристиках данных покрытий, что и подтверждается результатами измерений микротвердости алмазоподобных покрытий, приведенных на рисунке 7.



**Рисунок 6 - Значения поверхностной энергии для алмазоподобного покрытия в зависимости от различных режимов термической обработки**  
1 – исходная, 2 – обработанные ФСО Ф1



**Рисунок 7 - Значения микротвердости (кг/м²) алмазоподобных покрытий**  
1,3-исходные; 2,4-модифицированные фторсодержащим олигомером Ф1; 1,2- образец №1; 3,4-образец №2

Таким образом, исходя из данных АСМ, видно, что для образования сплошной, не дефектной олигомерной пленки на подложках из нитрида титана необходимо проводить термообработку покрытия при  $T=373\text{K}$ . В результате воздействия повышенных температур увеличивается подвижность макромолекул, вследствие чего они могут мигрировать на большие расстояния, заполняя не закрытые участки поверхности, которые, в свою очередь, при повышенных температурах могут выступать в роли активных центров притягивания к себе молекулы ФСО. Проведение термообработки при более высоких температурах способствует протеканию кристаллизационных процессов, в результате чего пленка на поверхности из нитрида титана становится более дефектной. Изменение в морфологии и структуры пленок ФСО существенным образом сказывается на физико-механических характеристиках композиционных покрытий.

В ходе исследований была изучена структура и морфология алмазоподобных покрытий, сформированных импульсным катодно-дуговым методом на образцах из стали 45. Установлено наличие полос поглощения относящихся к колебаниям групп С–С; С=C; деформационным и валентным колебаниям групп С–Н. В зависимости от режимов формирования покрытий наблюдается образование как мелкодисперсной так и крупнодисперсной структуры, что в конечном счете сказывается на физико-механических и прочностных характеристиках. Превышение режимов термообработки свыше 573 К приводит к деструкции покрытия с поверхности стальной подложки. Обработка покрытий фторсодержащими олигомерами приводит к увеличению гидрофобности покрытий и уменьшению значений поверхностной энергии. Установлено, что покрытия, имеющие крупнодисперсную структуру, обладают более высокими прочностными характеристиками. Проведение термообработки приводит к увеличению микротвердости композиционных покрытий.

Статья подготовлена по материалам доклада на VI Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства».

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Рогачев А.В., Палий О.И., Петрашенко П.Д. Тонкие вакуумные полимерные покрытия: Обзор. информ. / Гомельский политех. ин-т.-Гомель, 1988.-43 с.
2. Струк В.А., Богданович П.Н., Овчинников Е.В., Губанов В.А., Бойко Ю.С. Влияние строения фторсодержащих олигомеров на фрикционные свойства низкоскоростных узлов трения// Трение и износ.-1996.- т.17, № 3.-С. 386-390.
3. Чижик С.А. Трибомеханика прецизионного контакта. Сканирующий зондовый анализ и компьютерное моделирование. Автореферат дис. докт. техн. наук:- Гомель, 1998.- 41 с.
4. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. / H. Gleiter. // Acta mater, 2000. – Vol. 48. – P. 1-29.
5. Андриевский, Р.А. Размерные эффекты в нанокристаллических материалах. Ч. 1 / Р.А. Андриевский, А.М. Глезер // Физика металлов и металловедение. 2000. – Т. 88. Вып. 1. – С. 50-73.

**Овчинников Евгений Витальевич**

УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», г. Гродно, Беларусь  
Кандидат технических наук, доцент,  
заместитель декана факультета инновационных технологий машиностроения  
Телефон (+375152) 484421  
E-mail: [ovchin\\_1967@mail.ru](mailto:ovchin_1967@mail.ru)

E.V.OVCHINNIKOV

**NANOSTRUCTURED FLUORINE-CONTAINING COATINGS**

*The paper deals with the formation of fluorinated oligomers on substrates formed by plasma chemical method: titanium nitride, diamond-like compound. The influence of the substrate on the process of nanostructuring in the resulting composite coatings. Conducting the heat treatment increases the microhardness of the systems.*

**Keywords:** coating, titanium nitride, diamond-compound plasma fluorochemical oligomers structure property.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Rogachev AV, Paly OI, PD Petrashenko Vacuum thin polymer coatings: a review. Inform. / Gomel Polytechnic. in-so-Gomel, 1988.-43 p.
2. VA structure, Bogdanovich PN Ovchinnikov, E., Gubanov VA, Boiko YS Effect of the structure of fluorinated oligomers on the frictional properties of low-speed friction // Friction and iznos.-1996. - V.17, № 3.-S. 386-390.
3. Siskin SA Tribomehanika precision contact. Scanning probe analysis and computer modeling. Abstract of thesis. Doctor. tehn. Sciences: - Gomel, 1998. - 41.
4. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. / H. Gleiter. // Acta mater, 2000. - Vol. 48. - P. 1-29.
5. Andrievskiy, RA Size effects in nanocrystalline materials. Part 1 / R. Andrievskiy, AM Glaser // Physics of Metals and Metallography. 2000. - T. 88. MY. 1. - S. 50-73.

**Evgeny Ovchinnikov**

EE "Grodno State University named Yanka Kupala", Grodno, Belarus  
Ph.D., Associate Dean of the Faculty of Engineering of innovative technologies  
Phone (+375152) 484421  
E-mail: [ovchin\\_1967@mail.ru](mailto:ovchin_1967@mail.ru)

А.В. СЕЛИХОВ, В.Я. ВАРГАШКИН, В.В. МИШИН, С.Н. ТУЛИН

## **АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПОДШИПНИКОВЫХ ОПОР КАЧЕНИЯ ПО ХАРАКТЕРУ СТАТИСТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ**

*Настоящая статья содержит теоретический и экспериментальный анализ ряда особенностей технического диагностирования опор качения, основанного на основе использования электрического сопротивления в качестве контролируемого параметра.*

***Ключевые слова:** подшипник качения, электрическое сопротивление, техническое диагностирование.*

В современной промышленности производят и эксплуатируют многочисленные механизмы и машины, использующие опоры трения, к которым, преимущественно, относят подшипники качения. Диагностирование подшипников на стадиях их изготовления, сборки узлов трения, а также непосредственно в ходе эксплуатации позволяет обеспечивать работоспособность содержащих опоры изделий. Широкое распространение получил метод диагностирования, основанный на использовании разнообразных параметров электрического сопротивления зон трения подшипниковых опор в качестве контролируемых параметров. Преимуществом этого метода является малая инерционность, высокое быстродействие и информативность [1, 2].

Для определения качества контактирующих поверхностей объекта исследования электрическим методом возможно использование методов, основанных на оценке нормированного интегрального времени (НИВ) разрушения смазочного слоя, а также интегральных функций распределения его электрического сопротивления. Эти методы включают использование разнообразного специализированного математического аппарата, такого как вейвлет-преобразование, уравнений систем нейронных сетей и т.п., предназначенного для непосредственного выявления дефектов рабочих поверхностей подшипников.

В условиях производства также часто требуется определение не только текущего состояния опоры трения, но и степени ее изношенности. Для решения подобной задачи оптимальным образом подходит анализ особенностей интегральных функций распределения электрического сопротивления опор, позволяющий минимизировать затраты на разработку программного обеспечения. К недостаткам подобного анализа относится невозможность определения причин изнашивания ввиду того, что многочисленные параметры эксплуатации объекта контроля оказывают одновременное влияние на вид распределения его сопротивления, причем получение выводов о том, какой из факторов является доминирующим, не представляется возможным.

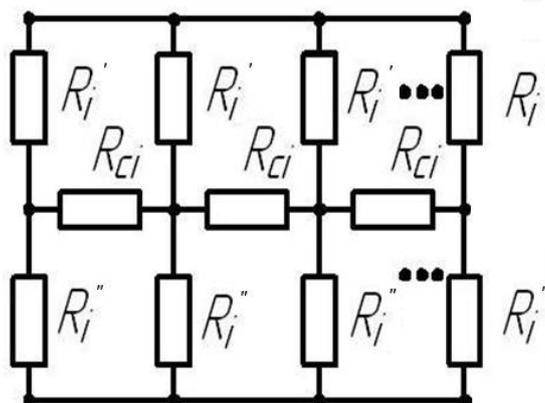
Предпочтительным условием осуществления диагностирования узла трения является возможность [1, 2] получения избыточной информации об объекте контроля путем одновременного измерения нескольких диагностических параметров, что позволит исключить ошибки и повысить достоверность результатов диагностирования. В качестве одновременно измеряемых диагностических параметров предлагается использовать параметры электрического сопротивления зоны трения, ее вибрации, а также температуры.

В работе [3] показана зависимость вида распределения электрического сопротивления подшипника качения от разнообразных параметров эксплуатации. Интегральные функции

распределения для различных качественных состояний подшипника качения, характеризующих степень его пригодности для дальнейшей работы, могут быть определены как аналитическим путем, так и экспериментально. Таким образом, путем построения таблиц, содержащих вид интегральной функции распределения при различных параметрах эксплуатации подшипника качения, с последующим сравнением вида распределения, полученного в ходе диагностирования подшипника, с табличными значениями распределения, можно делать выводы о степени изношенности опоры.

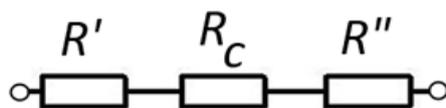
Согласно предлагаемому методу диагностирования для расчета интегральных функций распределения электрического сопротивления подшипник качения заменялся одним эквивалентным сопротивлением.

При этом, полная электрическая эквивалентная схема опор достаточно сложна, что требует обоснования замены подшипника единым эквивалентным сопротивлением. В частности, при исследовании электрических свойств опор их электрическое сопротивление моделируется совокупностью параллельно-последовательно соединенных резисторов и конденсаторов [4]. Использование преобразователей сопротивление-напряжение, работающих на постоянном токе, позволяет пренебречь вкладом емкостей подшипника в работу схемы. При этом электрическая эквивалентная схема упрощается к виду, изображенному на рисунке 1.



**Рисунок 1** - Упрощенная параллельно-последовательная электрическая эквивалентная схема подшипника  $R_i'$  - сопротивления трибосопряжения в зонах контакта тел качения и дорожки внутреннего кольца,  $R_i''$  - сопротивление трибосопряжения в зонах контакта тела качения и дорожки внешнего кольца,  $R_{ci}$  - дополнительное сопротивление трибосопряжения в зонах контакта тел качения и сепаратора

Заменяя параллельно-последовательное соединение сопротивлений их последовательным соединением, можно получить эквивалентную схему, представленную на рисунке 2.



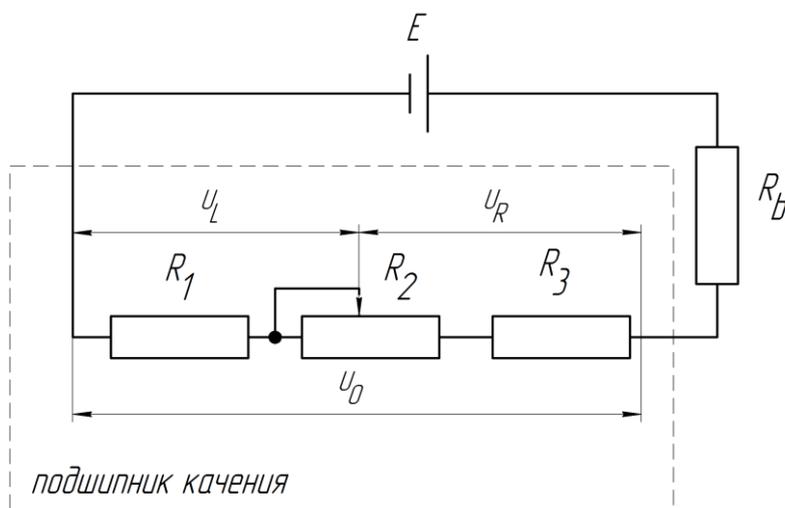
**Рисунок 2** – Упрощенная последовательная электрическая эквивалентная схема подшипника  $R_i'$  – сопротивление внутреннего кольца,  $R_i''$  – сопротивление внешнего кольца,  $R_{ci}$  – сопротивление сепаратора

После получения схемы замещения требуется установить, является ли суммарное сопротивление подшипника качения, измеряемое интегрирующими преобразователями, суммой сопротивлений составляющих его элементов. Гипотеза об этом нуждается в проверке, поскольку применительно к условиям рисунка 1 зоны контакта являются подвижными, а со-

противление - флуктуирующим. Для проверки этой гипотезы была собрана экспериментальная установка, представленная на рисунке 3.



**Рисунок 3 – Установка для моделирования пары трения**



**Рисунок 4 – Электрическая схема подключения узла трения экспериментальной установки**

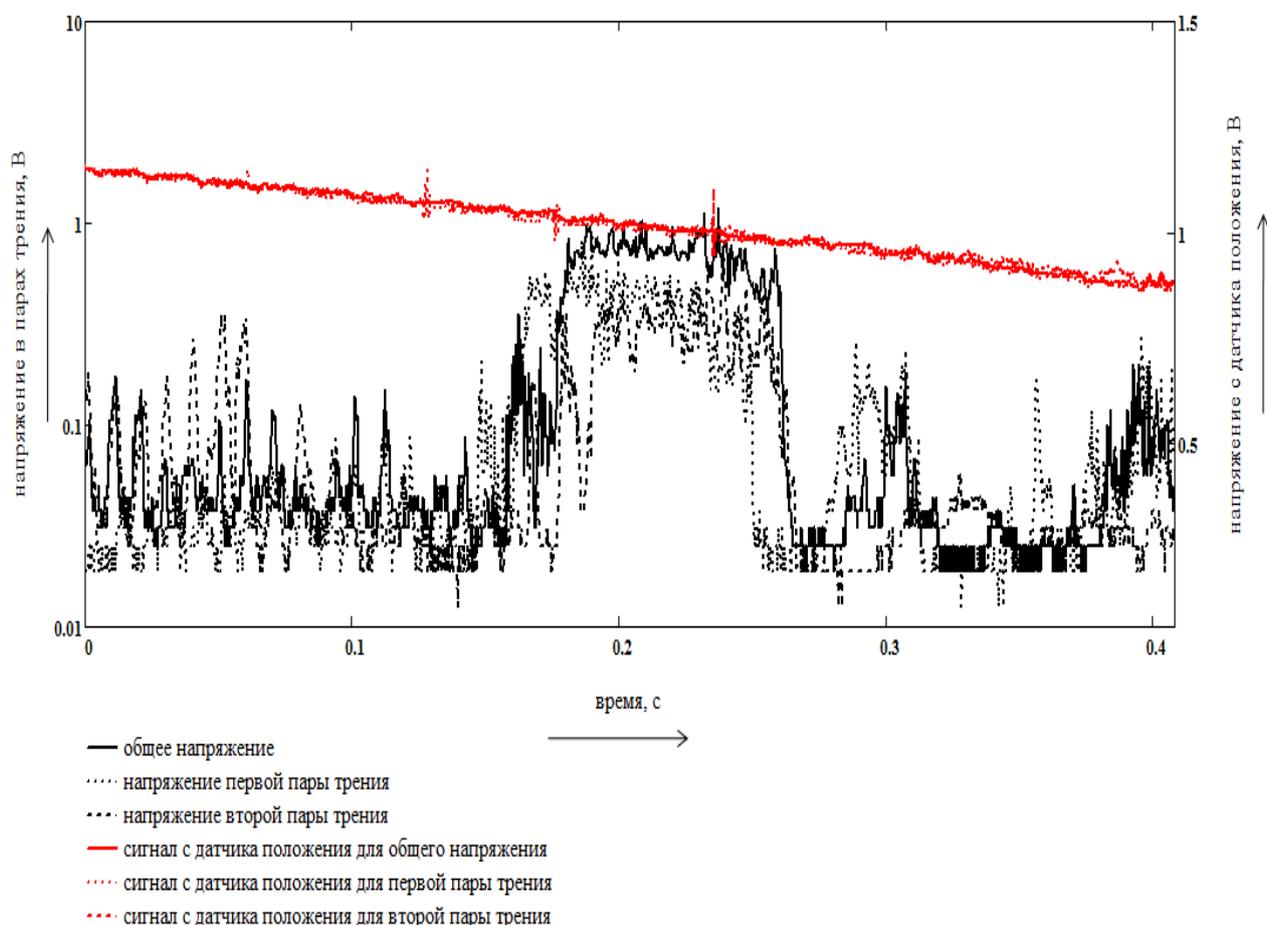
$E$  – напряжение питания,  $R_b$  – балластное сопротивление,  $R_1$  – сопротивление первого кольца,  $R_2$  – сопротивление металлической пластины,  $R_3$  – сопротивление второго кольца,  $U_L$  – напряжение, снимаемое с первой пары трения,  $U_R$  – напряжение, снимаемое со второй пары трения,  $U_0$  – общее напряжение, снимаемое с обеих пар трения

В подшипнике качения присутствует большое количество элементов, причем выделение вклада каждого из них в суммарное сопротивление опоры не представляется возможным из-за значительности количества различных вариантов соприкосновения пар поверхностей трения. Поэтому с целью анализа вклада электрического сигнала, поступающего из какой-либо конкретной зоны трения в суммарный сигнал опоры, конструкция экспериментальной установки была снабжена элементами, моделирующими процессы трения качения двух объ-

ектов. Содержащаяся в конструкции установки металлическая пластина служит при этом аналогом дорожки качения подшипника, а кольца – аналогами его шариков. Для того, чтобы контактная нагрузка действовала равномерно, кольца выполнены не закрепленными жестко на вдоль осей вращения, что позволяло им самоустанавливаться собственное положение при движении относительно плоскости пластины.

Подвижная металлическая пластина нагружается силой давления в  $10\text{ Н}$ , передаваемой на два подвижных металлических кольца. Пластина совершает возвратно-поступательные движения с частотой  $15\text{ мин}^{-1}$ . На поверхность пластины нанесены два макродефекта, приходящиеся на траектории поступательного движения колец. Длина дефектов составляет  $3\text{ мм}$ , что соответствует ширине колец. Кольца электрически соединены последовательно друг с другом через пластину. К ним также последовательно подключено балластное сопротивление в  $96\text{ Ом}$ . Цепь подключена к источнику напряжения в  $1,4\text{ В}$ . Электрическая схема подключения узла трения экспериментальной установки представлена на рисунке 4.

Каждое из колец и металлическая пластина, изображенные на рисунке 3, образуют пару трения. Для непосредственного проведения экспериментов контактирующие поверхности были подготовлены следующим образом: поверхности были отшлифованы с помощью пасты ГОИ №2 до зеркального блеска. Кроме того, поверхности были очищены от загрязнителей с использованием средства «Гексан». Последующее шлифование позволило снизить степень шероховатости пар трения, в результате чего она оказывала пренебрежимо малое влияние на результаты измерений напряжений. Основное же изменение электрического сигнала, поступающего из зон трения, вызвалось искусственно созданными дефектами при их попадании в зоны трения.



**Рисунок 5 – Временные диаграммы изменения измеряемых напряжений**

Целью эксперимента являлось измерение напряжений  $U_L$ ;  $U_R$ ;  $U_O$  трёх участков изображенной на рисунке 4 цепи с последующим пересчётом напряжений в соответствующие сопротивления. Предварительный анализ показал, что повторяемость во времени электрических сигналов, поступающих из зон трения установки при многочисленных последовательных возвратно-поступательных движениях пластины, является достаточно высокой. Сигналы повторяются благодаря наличию в них детерминированной составляющей. Случайные же составляющие последовательно принимаемых сигналов при их совмещении в ходе анализа оказываются частично скомпенированными, чем также достигается их частичное устранение из полного совмещенного сигнала.

Достаточная повторяемость электрических сигналов обеспечила не только возможность совмещения сигналов, относящихся к различным моментам времени, но также дала возможность одновременного выполнения отсчетов значений каждого из измеряемых напряжений. Поэтому после запуска установки производились последовательные измерения напряжений между различными точками электрической цепи согласно рисунку 4. В начале измерялось падение напряжения на первой паре трения, далее - на второй, а затем, - на обоих парах трения, соединенных электрически последовательно.

На рисунке 5 представлены графики изменения сигналов напряжения, получаемых согласно рисунку 4, а также графики изменения сигнала с датчика положения, с помощью которых были синхронизированы относящиеся к различным моментам времени сигналы напряжений при их наложении.

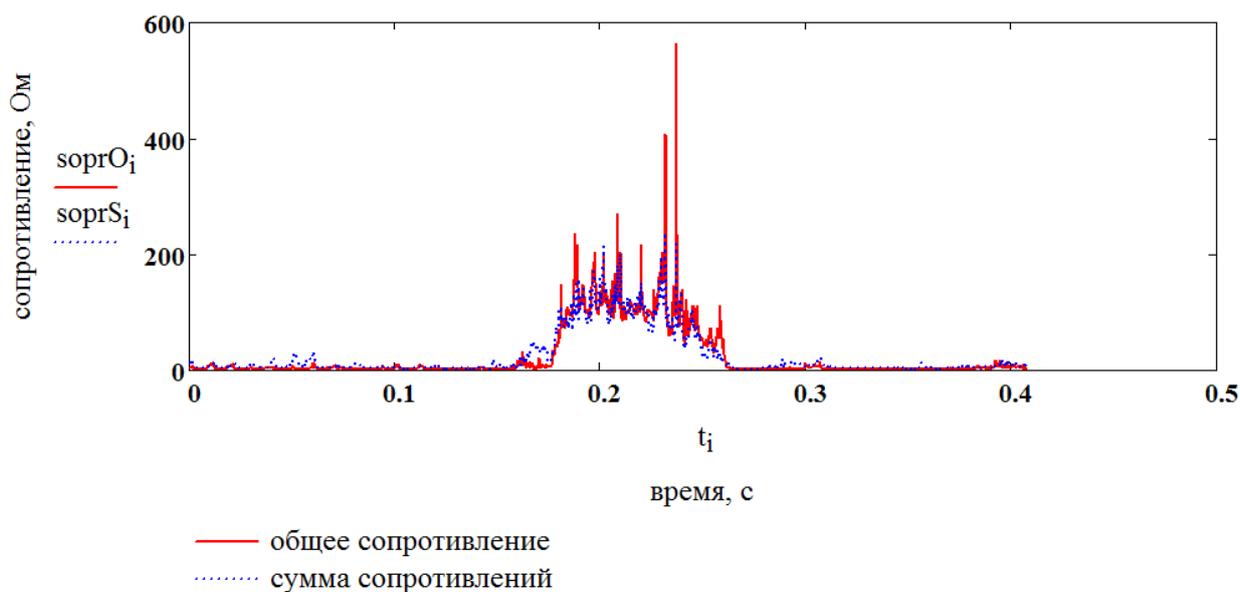
Далее измеренные напряжения были пересчитаны в сопротивление.

Так как элементы схемы соединены последовательно, то их суммарное сопротивление равно:

$$\text{sopr}S = R_1 + R_2, \quad (1)$$

где  $R_1$  – сопротивление пары трения, состоящей из первого кольца, а также части пластины, расположенной между зоной ее трения с первым кольцом и местом токосъема;

$R_2$  – сопротивление пары трения, состоящей из второго кольца, а также части пластины, расположенной между зоной ее трения со вторым кольцом и местом токосъема.

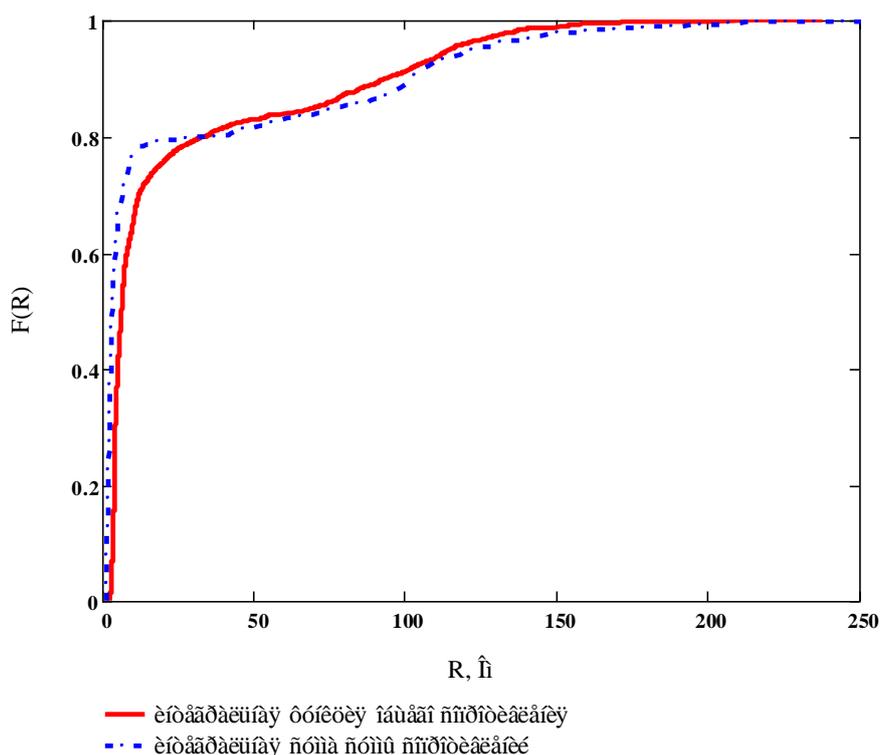


*Рисунок 6 – Иллюстрация близости формы временных диаграмм суммарного и полного электрического сопротивления*

Графики рассчитанного на основании (1) суммарного сопротивления, а также косвенно измеренного согласно схеме рисунка 4 общего сопротивления опоры, представлены на рисунке 6. Графики следует считать различающимися незначительно. Близость их формы характеризуется достаточно высоким коэффициентом корреляции, достигавшим значения 0,941. Всплеск сопротивления соответствует созданным искусственно дефектам поверхности металлической пластины.

Анализ графиков выявил также близость интегральных функций распределения электрического сопротивления. На рисунке 7 представлены интегральные функции распределения полученных сигналов сопротивлений. Их различие обусловлено, в основном, наличием нескомпенсированных случайных составляющих электрического сигнала, которые не были учтены вследствие раздельного измерения сигналов напряжения.

Достаточно высокий коэффициент корреляции мгновенных значений суммарного и полного электрического сопротивления, а также близость формы экспериментально оцененных интегральных функций их распределений, позволяют сделать вывод о том, что флуктуирующее во времени сопротивление двух последовательно соединенных пар трения, измеряемых интегрирующими преобразователями, практически равно сумме флуктуирующих же сопротивлений каждой из пар трения. Следовательно, интегральные функции распределения суммы сопротивлений и суммарного сопротивления следует считать одинаковыми.



*Рисунок 7 – Иллюстрация близости формы интегральных функций распределения мгновенных значений суммарного и полного электрического сопротивления*

На форму графиков интегральных функций распределения значений сопротивления при этом оказывает влияние лишь качество соприкасающихся поверхностей обеих пар трения. В случае полного износа поверхностей до нерабочего состояния интегральная функция распределения будет стремиться к прямолинейной с непрерывным множеством мгновенных значений сопротивления в пределах некоторого диапазона, уложенного между минимальным и максимальным значениями мгновенного сопротивления.

В случае практически идеального состояния поверхностей график интегральной функция распределения приобретает дискретную форму, близкую к форме единичного скачка, при мгновенном нарастании этого графика из области минимального значения сопротивления в область максимальных его значений.

Выводы:

1. Электрический сигнал предложенной экспериментальной модели зоны трения, состоящий из тела качения и пластины, является многокомпонентным. При минимизации вклада случайной составляющей детерминированная составляющая электросопротивления несет диагностическую информацию о макродефектах, поступающую непосредственно из зон трения;

2. Интегральная функция распределения электрического сопротивления трибосопряжения может выступать в качестве диагностического признака и характеризовать свойства поверхности трения;

3. Полученные выводы следует распространить на узлы трения с подшипниковыми опорами качения. Практическое диагностирование конкретных опор, находящихся в конкретных условиях эксплуатации, требует при этом выполнения дополнительных исследований граничной формы распределения сопротивления, соответствующей переходу опоры в неработоспособное состояние.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.132.21.1603.

Статья подготовлена по материалам доклада на VI Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства».

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Селихов, А.В. Экспериментальное исследование электрического сопротивления (проводимости) подшипника качения как диагностического параметра [Текст] / А.В. Селихов, В.В. Мишин, М.В. Майоров, А.А. Катыхин, К.В. Шаталов, В.И. Некрасов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. - №6-2/(284). – с. 25-34.

2. Селихов А.В. Результаты экспериментального исследования параметров комплексной оценки технического состояния подшипника качения [Текст] / А.В. Селихов, В.В. Мишин, В.В. Семёнов, Е.И. Родькин, С.Н. Тулин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. - № 1 (291). – с. 112-119.

3. Селихов А.В. Экспериментальное исследование состояния смазочного слоя и температурного режима при различных условиях смазывания и установки подшипника качения в посадочное место [Текст] / А.В. Селихов, М.В. Майоров, В.Н. Чернышов, Подмастерьев А.К., В.В. Мишин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. - №-2/2(286). – с. 137-143

4. Мишин, В.В. Метод и средство контроля состояния подшипников электродвигателя на этапе ввода в эксплуатацию [Текст] / В.В. Мишин // Известия ТулГУ. – 2011. - №5. – с. 296-304.

**Селихов Алексей Владимирович**  
ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК»  
Аспирант  
Тел. (4862) 41-98-76

**Мишин Владислав Владимирович**  
ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК»  
к.т.н., доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
Тел. (4862) 41-98-76  
E-mail: [vlad89290@gmail.com](mailto:vlad89290@gmail.com)

**Варгашкин Владимир Яковлевич**  
ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК»  
к.т.н., доцент кафедры «Физика»  
Тел.: (4862) 41-98-89

**Тулин С.Н.**  
ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК»  
Магистр  
Тел. (4862) 41-98-76

A.V. SELIHOV, V.J. VARGASHKIN, V.V. MISHIN, S.N. TULIN

**EVALUATION OF DIAGNOSIS' FEATURES OF BALL BEARING'S  
TRIBOUNIT'S BY PARAMETERS OF CUMULATIVE DISTRIBUTION  
FUNCTION OF ELECTRICAL RESISTANCE**

*The article is devoted to the development and substantiation of the concept of a method of diagnostics of ball bearings on the basis of use electrical resistance as a diagnostic parameter.*

**Keywords:** ball bearing, electrical resistance, series connection.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Selihov, A.V. Experimental research of electric resistance (conductivity) of bearing as diagnostic parameter [Text] / A.V. Selihov, V.V. Mishin, M.V. Mayorov, A.A. Katyhin, K.V. Shatalov, V.I. Nekrasov // Fundamental and Applied Problems of Technics and technology. – 2010. - №6-2 (284). – с. 25-34.
2. Selihov, A.V. The results of experimental research of parameters of complex assessment of ball bearing's technical state [Text] / A.V. Selihov, V.V. MISHIN, V.V. SEMENOV, E.I. ROD'KIN, S.N. TULIN // Fundamental and Applied Problems of Technics and technology. – 2012. - №1 (291). – с. 112-119.
3. Selihov, A.V. Experimental research of lubricant layer's study and temperature mode under different conditions of lubrication and installation of rolling bearing into the housing [Text] / A.V. Selihov, M.V. Mayorov, V.N. Chernyshov, A.K. Podmasteriev, V.V. Mishin // Fundamental and Applied Problems of Technics and technology. – 2011. - №2-2 (286). – с. 137-143.
4. Mishin, V.V. The method and the device for control of condition of bearings OF the electric motor at assemblage stages and commissioning [Text] / V.V. Mishin // Tidings of Tula State University. – 2011. - №5. – с. 296-304.

**Selihov Aleksey Vladimirovich**

State University – ESPC

Postgraduate

Tel. (4862) 41-98-76

**Mishin Vladislav Vladimirovich**

State University – ESPC,

Candidate of technical science, professor of department  
“Instrument engineering, metrology and certification”,

Tel. (4862) 41-98-76

E-mail: [vlad89290@gmail.com](mailto:vlad89290@gmail.com)

**Vargashkin Vladimir Jakovlevich**

State University – ESPC

Candidate of technical science, associate professor of  
department «Physics »

Tel. (4862) 41-98-89

**Tulin Sergej Nikolaevich**

State University – ESPC

Postgraduate

Tel. (4862) 41-98-76

А.А. СИМАКОВ, Ю.В. ВАСИЛЕНКО, М.А. БУРНАШОВ

## АНАЛИЗ ФОРМ КОЛЕБАНИЙ ВОЗМУЩАЮЩЕЙ СИЛЫ ПРИ ПЛОСКОМ ВИБРОШЛИФОВАНИИ

*Проведен анализ основных форм колебаний возмущающей силы осциллирующих приспособлений, используемых при процессе плоского шлифования с сообщением заготовке поперечных колебаний. На основе аналитических зависимостей произведены расчеты средних значений и построены диаграммы сил, скоростей, перемещений и развиваемой мощности для четырех основных форм колебаний и выбрана оптимальная форма с точки зрения эффективности обработки.*

**Ключевые слова:** плоское шлифование, вибрация.

Одним из актуальных научных направлений в технологии машиностроения является совершенствование известных и разработка новых методов и способов обработки, обеспечивающих формирование на обработанной поверхности детали регулярного микрорельефа или ненаправленного микрорельефа. Формирование данных микрорельефов значительно улучшает эксплуатационные свойства обработанной поверхности.

Установлено, что формирование ненаправленного микрорельефа, как правило, происходит за счет совершенствования кинематики процесса, в частности плоское шлифованием периферией круга с наложением поперечных колебаний (осцилляций) позволяет достичь увеличения длины дуги контакта абразивного зерна с заготовкой до 24% и скорости съема металла до 76% с сообщением синусоидальных колебаний с частотой  $f = 85$  Гц, амплитудой  $a = 0,6$  мм [1]. Совершенствование метода предполагает увеличение скорости, а также рациональный выбор формы сообщаемых заготовке колебаний.

В свою очередь, скорость и форма колебаний определяются конструкцией приспособления для осуществления виброшлифования и источника вибраций – осциллятора. На рисунке 1 представлена конструкция установки с инерционным осциллятором, создающим синусоидальные колебания с частотой до 350 Гц. В колебательных системах подобных осциллирующих приспособлений, не содержащих пружин (рис. 1), присутствуют лишь возмущающая (от осциллятора) сила  $F_o(t)$  и сила трения  $F_{mp}$ , причем в случае использования в качестве горизонтальной опоры плоских несмазываемых металлополимерных подшипников  $F_{mp}$  постоянна, не зависит от значения скорости перемещения плиты и противоположна ей по знаку. Так как коэффициент трения данных подшипников  $\mu < 0,05 F_{mp}$ , можно считать  $F_{mp} \approx 0$ . В этом случае получаем функцию [2]:

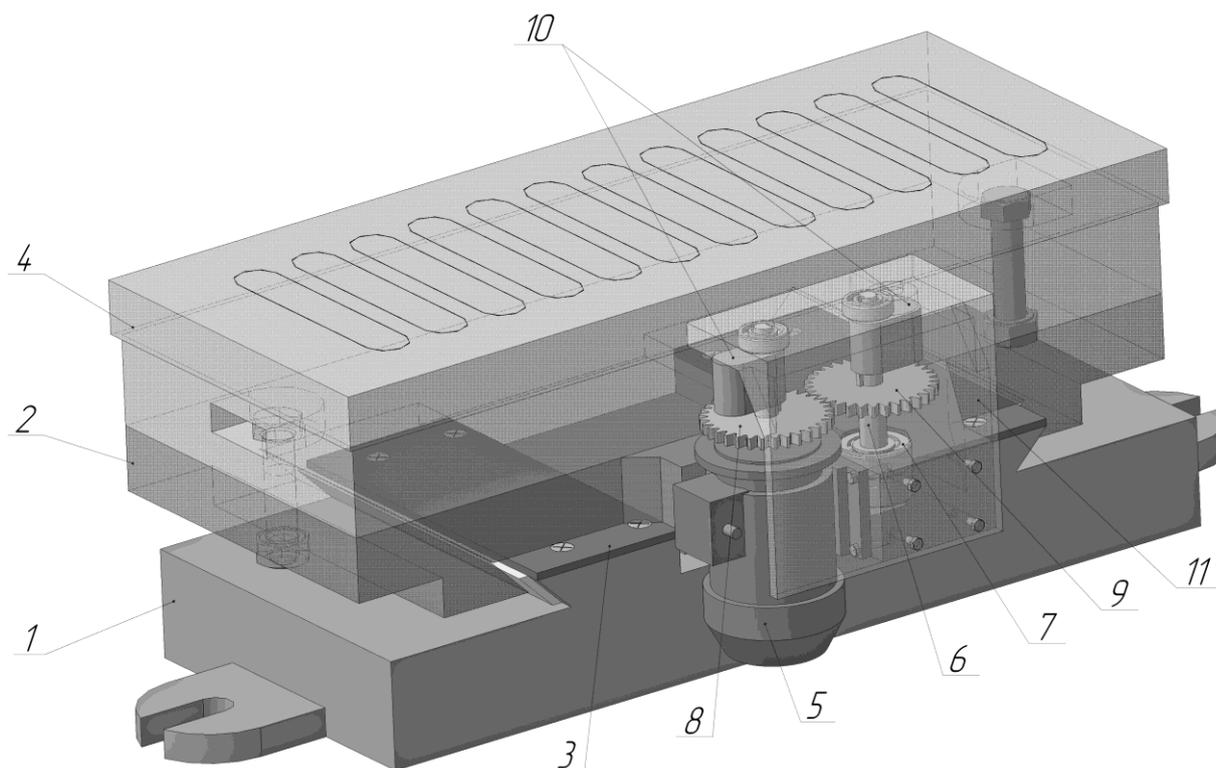
$$F_o(t) = m \cdot a(t), \quad (1)$$

где  $m$  – масса колебательной системы, включающей в себя плиту с заготовкой, кг;

$a(t)$  – ускорение колебательной системы, сообщаемое ей суммой приложенных сил, м/с.

Из (1) получим функцию изменения ускорения колебательной системы (2), проинтегрировав которую, можно получить функцию изменения скорости (3):

$$a(t) = \frac{F_o(t)}{m} \quad (2)$$



**Рисунок 1 – Инерционная установка для виброшлифования:**

1 – основание; 2 – промежуточная плита; 3 – плоские металлополимерные подшипники скольжения; 4 – магнитная плита; 5 – электродвигатель; 6 – ось; 7 – подшипниковый узел; 8 – шестерня; 9 – зубчатое колесо; 10 – маховик-эксцентрик; 11 – крышка

В данной статье рассматриваются осцилляторы, создающие знакопеременную силу, изменяющуюся по периодическому закону. Рассматривать другие случаи нецелесообразно, т.к. такие системы не будут технологичными в случае использования в методе плоского виброшлифования. В соответствии с этим, для определения среднего значения скорости  $v_{cp}$  можно воспользоваться интегрированием функции (2) по времени на характерном участке ее периода и делением полученного значения на длину участка. Аналогично вычисляется координата  $x$  положения колебательной системы (5).

$$v(t) = \int a(t)dt = \frac{1}{m} \int F_o(t)dt \quad (3)$$

$$v_{cp} = \frac{1}{m(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} F_o(t)dt \quad (4)$$

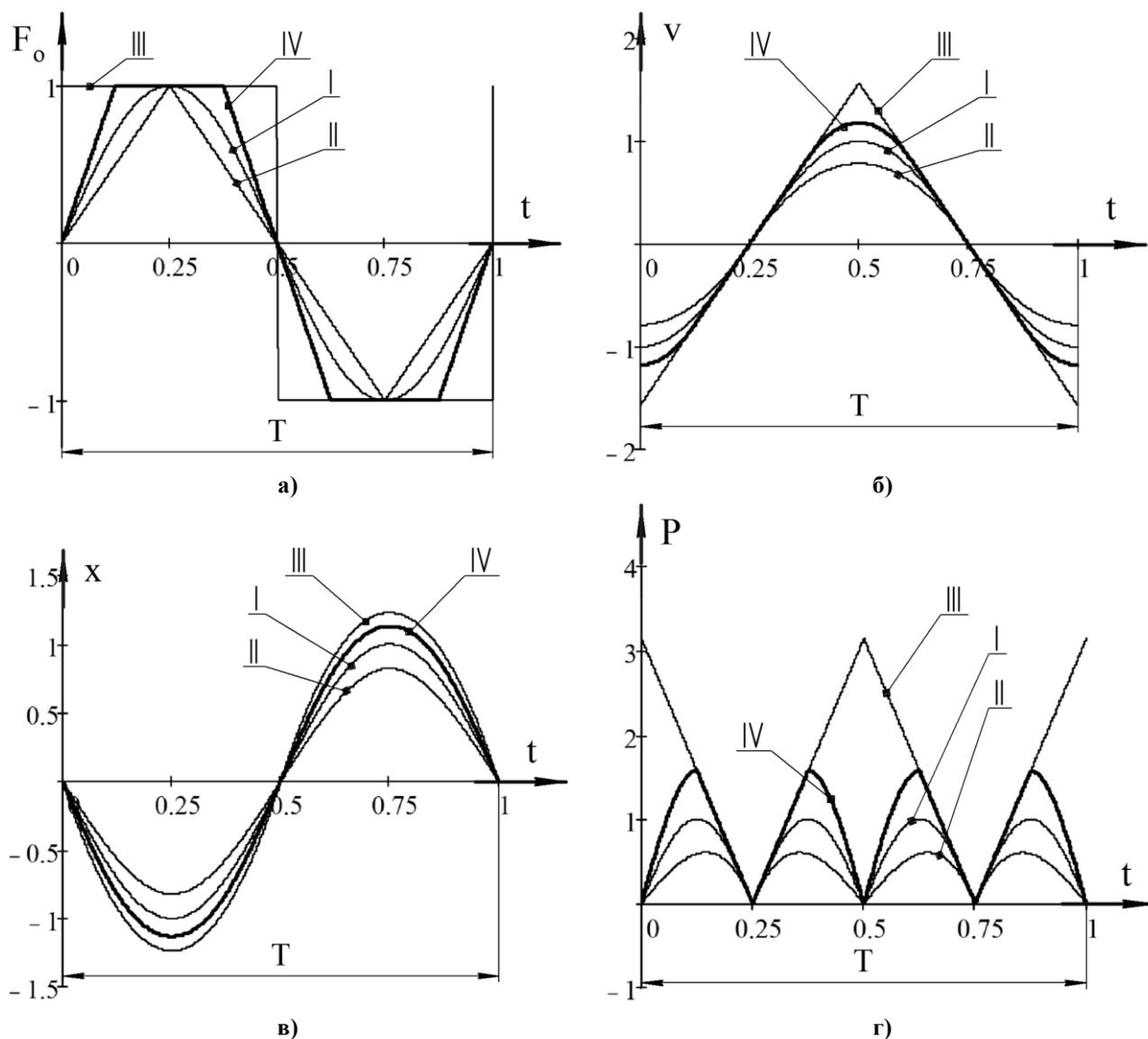
$$x(t) = \int v(t)dt = \frac{1}{m} \iint F_o(t)dt \quad (5)$$

Мощность, развиваемую осциллятором, можно определить как абсолютное значение произведения мгновенной скорости на приложенную силу:

$$P(t) = F_o(t) \cdot v(t) \quad (6)$$

Как упоминалось выше, в зависимости от конструкции применяемого приспособления и осциллятора закон колебаний плиты с заготовкой может принимать любую форму: от синусоидальной до хаотичной. С точки зрения эффективности виброшлифования актуальным является вопрос анализа различных периодических законов колебаний возмущающей силы и выбор на его основе оптимального варианта.

Для использования в методе плоского виброшлифования рассматривалось использование осцилляторов, способных сообщать следующие законы изменения возмущающей силы  $F_o(t)$ : синусоидальный, пилообразный, прямоугольный и трапецеидальный (протяженность участка с постоянной силой равна 1/2 периода). Синусоидальная функция непрерывна, тогда как остальные три являются кусочно-заданными, поэтому интегрирование также проводится кусочно, с расчетом постоянных интегрирования для каждого участка. На рисунке 2 приведены диаграммы изменения возмущающей силы, скорости, координаты и мощности при поперечных колебаниях колебательной системы по заданным законам в течение одного периода времени  $T$ .



**Рисунок 2 – Диаграммы изменения возмущающей силы (а), скорости (б), координаты (в) и мощности (г) при поперечных колебаниях колебательной системы по законам I – синусоидальному; II – пилообразному; III – прямоугольному; IV - трапецеидальному**

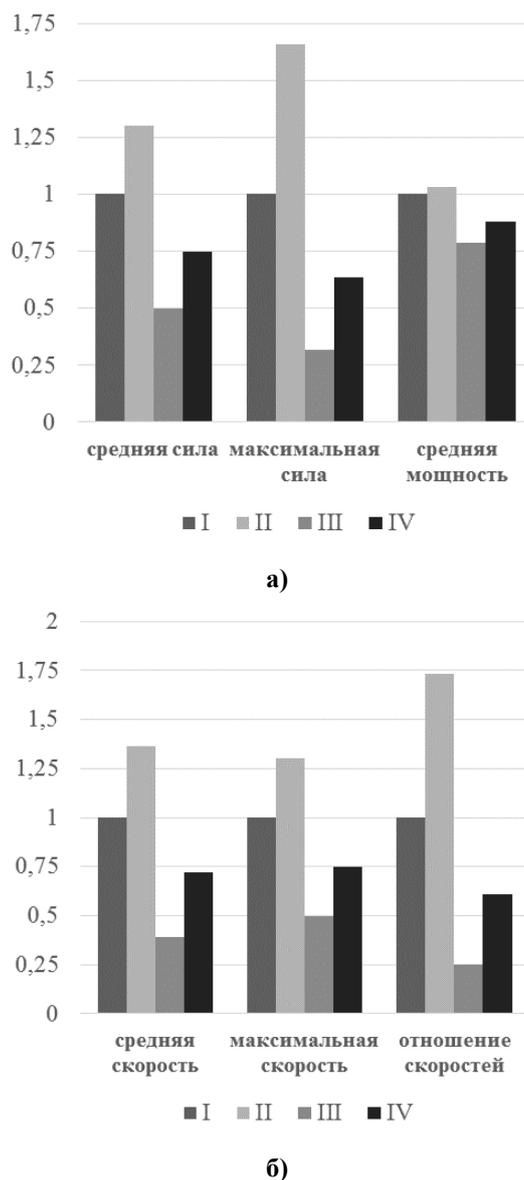
Анализ законов выполняется по следующим критериям.

1. На образование ненаправленного микрорельефа и производительность обработки основное влияние оказывает скорость поперечных колебаний [1]. Целесообразно принять во

внимание среднее абсолютное значение скорости колебаний  $v_{cp}$  и его отношение  $\Delta v$  к максимальному (амплитудному)  $v_{max}$ .

2. Возмущающая сила  $F_0$ , вызывающая поперечные колебания системы, позволяет осуществлять процесс резания металла в поперечном направлении, и, как следствие, необходим расчет максимального  $F_{max}$  и среднего  $F_{cp}$  значений осциллирующей силы.

3. Выбор оборудования и конструктивных элементов для осциллятора определяет амплитудную мощность  $P_{max}$ , развиваемую устройством, а среднее значение мощности  $P_{cp}$  – его энергоэффективность.



**Рисунок 3 – Величины средних и максимальных возмущающей силы и потребляемой мощности(а) и скорости (б) при поперечных колебаниях колебательной системы по законам I – синусоидальному; II – пилообразному; III – прямоугольному; IV - трапецеидальному**

Бóльшие значения  $\Delta v$ ,  $F_{cp}$  и  $P_{cp}$  определяют более эффективные законы колебаний осциллятора.

Для адекватности проводимого анализа необходимо приведение всех рассматриваемых показателей к единой мере. В данной статье изначально расчет ведется по амплитудному значению возмущающей силы, однако целесообразно использовать отношение всех пара-

метров к максимальной мощности устройства ( $\frac{\Delta v}{P_{\max}}, \frac{F_{cp}}{P_{\max}}$  и т.д.). Также, для наглядности приводимых диаграмм, используется соотношение полученных величин для различных законов с величинами, рассчитанными для синусоидального закона, которые принимаются за единицу.

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что наиболее эффективным законом изменения возмущающей силы  $F_o$  является пилообразный, по большинству показателей превышающий базовый синусоидальный закон более, чем на 25%. Наименее эффективный закон – прямоугольный, значительно уступающий остальным рассматриваемым по всем показателям. Эффективность промежуточных между ними синусоидального и трапецеидального закона зависит, соответственно, от разности их форм с пилообразной.

Однако, для пилообразной формы изменения возмущающей силы амплитудная скорость движения заготовки также максимальна, а с точки зрения процесса шлифования это нежелательно, т.к. повышенная скорость в короткие периоды времени может вызывать появление прижогов. Также для практической реализации данного осциллятора используются более сложные электронные и электромеханические схемы привода. Поэтому выбор пилообразного или близкого к нему закона для решения конкретной технологической задачи должен быть экономически оправдан.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Воронков, А.В. Повышение эффективности плоского шлифования периферией круга путем поперечной осцилляции обрабатываемой заготовки [Текст] / А.В. Воронков. - Автореферат дис. канд. тех. наук: 05.02.08. – Орел, 2012. – 16 с..
2. Дронг, В.И. Курс теоретической механики. Учебник для вузов / В.И. Дронг, В.В. Дубинин, М.М. Ильин и др. – 3-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 736 с.

#### **Симаков Александр Александрович**

Аспирант

ТИ ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»

Тел: +7-953-811-6536

E-mail: [mactepnew@gmail.com](mailto:mactepnew@gmail.com)

#### **Василенко Юрий Валерьевич**

Кандидат технических наук, доцент, директор Технологического института им. Н.Н. Поликарпова ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»

Тел: (4862) 55-55-24

E-mail: [vyuv-post@yandex.ru](mailto:vyuv-post@yandex.ru)

#### **Бурнашов Михаил Анатольевич**

Доктор технических наук, профессор.

ФГОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»

Тел: (4862) 54-14-51

E-mail: [af@au.ru](mailto:af@au.ru)

A.A. SIMAKOV, YU.V. VASILENKO, M.A. BURNASHOV

## **AN ANALYSIS OF OSCILLATION FORMS OF DISTURBING FORCE AT FLAT VIBROGRINDING**

*An analysis of main oscillation forms of disturbing force of oscillating devices used at flat vibrogrinding with cross-oscillated giving performed. Based on the analytical dependences calculated the mean values of force, velocities, displacements, amounted power and diagrams made for four main oscillation forms and selected optimal form for machining efficiency*

**Keywords:** flat grinding, vibration.

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Voronkov, A.V. Increasing of efficiency of flat grinding by the ring periphery with cross-oscillation of machined blank [Text] / A.V. Voronkov. - Abstract of Cand.Tech.Sci. Orel, 2012. – 16 p.
2. Drong, V.I. Theoretical mechanics course. Textbook for high schools / V.I. Drong, V.V. Dubinin, M.M. Ilyin and others. – 3-th edition, ster. – M.: N.E. Bauman MSTU Publishing house, 2005. – 736 p.

#### **Simakov Aleksandr Aleksandrovich**

Graduate student

Polikarpov Technological Institute

FSEI HVT «State University – ESPC», Orel

Phone: +7-953-811-6536

E-mail: [mactepnew@gmail.com](mailto:mactepnew@gmail.com)

#### **Vasilenko Yuriy Valerievich**

Associate Prof., director of the Polikarpov Technological Institute

FSEI HVT «State University – ESPC», Orel

Phone: (4862) 55-55-24

E-mail: [vyuv-post@yandex.ru](mailto:vyuv-post@yandex.ru)

#### **Burnashov Mikhail Anatolievich**

Doctor of Technical Sciences, Professor.

Polikarpov Technological Institute

FSEI HVT «State University – ESPC», Orel

Tel: (4862) 54-14-51

E-mail: [af@au.ru](mailto:af@au.ru)

---

# **МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ** **И ИНСТРУМЕНТЫ**

УДК 621.924

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

## **РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ МОДИФИКАЦИИ ВТОРИЧНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ АБРАЗИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ГИДРОАБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ**

*Авторами статьи проанализированы основные закономерности диффузии в твердых телах и её основные механизмы, что позволило разработать технологию модификации вторичных техногенных абразивных материалов для гидроабразивного резания.*

**Ключевые слова:** гидроабразивное резание, абразив, абразивные материалы, вторичные техногенные абразивные материалы.

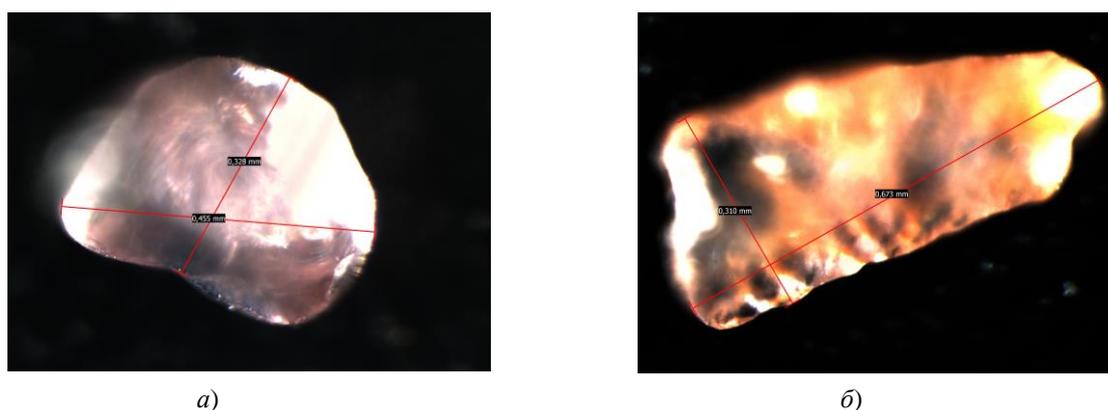
Свойства и характеристики абразивного зерна при гидроабразивном резании значительно влияют на скорость подачи сопла относительно материала и определяют производительность обработки [1].

Абразивные материалы разделяются на три класса: искусственные (синтетические), естественные и из побочных продуктов

К естественным абразивным материалам относятся природные алмазы, естественный корунд, гранат, кремнь и др.

Традиционно в качестве абразива используется гранат, позволяющий резать металлы и другие жесткие, ломкие или хрупкие материалы. Гранат имеет приемлемую твердость для резания большинства металлов и причиняет меньший износ соплу по сравнению с электрокорундом и карбидом кремния [2].

При статическом изучении большой партии абразивных частиц граната было выявлено 50-60 % изометричных зерен от всей массы, сравнительно мало пластинчатых – около 10 %, немного больше мечевидных частиц около 30 % (рис. 1).



**Рисунок 1 - Форма абразивного зерна**  
*а – изометрическая, б – мечевидная (микроскоп Leico MZ 16, увеличение  $\times 150$ )*

Типоразмер содержит 85 % основной, 10 % мелкой и 5 % крупной фракции. При изучении геометрии частиц, было определено, что более 80% зерен имеют углы заострения в пределах от  $85^\circ$  до  $115^\circ$ . При этом процент острых углов составляет 12- 25%.

К искусственным абразивным материалам относятся электрокорундовые абразивные материалы, электрокорунды (нормальный, белый и легированные), монокорунд; спеченные корунды (формокорунды); карбидокремниевые абразивные материалы — карбиды кремния

зеленый и черный; карбид бора; синтетические алмазы и материалы на основе кубического нитрида бора (эльбор, гексанит, кубонит и другие марки), выделяющиеся в самостоятельную группу абразивных материалов, называемую сверхтвердыми материалами (табл. 1).

Из-за сложности технологических процессов производств искусственных абразивных материалов, их стоимость выше граната.

Таблица 1 – Свойства искусственных и естественных абразивных материалов

Материал	Твердость, По шкале Мооса	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Микротвёрдость, ГПа	Механическая прочность, Н	Насыпная способность, г/см <sup>3</sup>
Гранат	6,5...7,5	3,5...4,4	13,7...16,7	7,6...12,7	2,0...2,1
Песок	5,0...6,0	2,5...2,62	12,6...16	0,01	1,2
Карбид кремния:					
зелёный	9,2	3,15...3,25	32,4...35,3	11,0...14,7	1,46
чёрный	9,2	3,15...3,25	32,4...35,3	11,0...14,7	1,4
Электрокорунд нормальный	9,0...9,1	3,85...3,95	18,9...19,6	8,8...10,7	1,76
Монокорунд	9,0	3,94...4,00	22,6...23,5	11,7...13,7	1,99
Сферокорунд	9,0	3,90...3,95	19,6...20,9	1,0...4,0	-
Корунд	9,0	3,90...4,12	17,7...23,5	5,5...5,76	1,54...1,85
Карбид бора	9,3	2,48...2,52	39,2...48,5	-	1,33...1,37

Исходя из этого, можно сделать следующие выводы:

- абразивные материалы, удовлетворяющие требованиям гидроабразивной обработки, имеют большую или меньшую твёрдость в сравнении с гранатом;
- себестоимость производства искусственных абразивных материалов значительно выше стоимости граната;
- возникает потребность в создании абразивного материала по своим свойствам, не уступающим гранатовому абразиву, но более дешёвом [3].

Для получения материалов сопоставимых гранатовому абразиву выбираем дешёвые абразивные материалы с последующей модификацией – вторичные техногенные материалы (техногенные побочные продукты промышленности) при обработке которых формируются новые свойства материала.

Абразивные материалы на основе побочных продуктов являются результатом производственных процессов. Среди них шлак, получаемый при выплавке металла или при производстве электроэнергии.

Главными компонентами шлаков производства железа и стали являются оксид кремния ( $SiO_2$ ), оксид алюминия ( $Al_2O_3$ ), оксид кальция ( $CaO$ ) и оксид магния ( $MgO$ ), содержание которых в составе этих шлаков достигает 95%. К неосновным компонентам состава этих шлаков относятся оксиды марганца и железа, соединения серы с металлами, а также следовые количества некоторых других веществ. Физические свойства, такие как плотность, пористость и размеры частиц, зависят от скорости охлаждения шлака и его химического состава.

Химический состав доменных шлаков представлен в основном четырьмя оксидами:  $CaO$  (29 - 30%),  $MgO$  (0-18%),  $Al_2O_3$  (5-23%) и  $SiO_2$  (30-40%). В небольшом количестве в них содержатся оксиды железа (0,2-0,6%) и марганца (0,3-1%), а также сера (0,5-3,1%). Сталепла-

вильные шлаки характеризуются более высоким содержанием оксидов железа (до 20%) и марганца (до 10%) (табл. 2).

Химический состав значительно влияет на физические свойства шлаковых расплавов, структуру и свойства затвердевших шлаков. Так, увеличение содержания оксида кальция в шлаках обуславливает повышение температуры их плавления и понижение текучести.

Для шлаков цветной металлургии характерны пониженное содержание  $CaO+MgO$  (7-13%) и высокое содержание  $FeO$  (21-61%). Кроме основных компонентов шлаки цветной металлургии могут содержать в небольших количествах неизвлеченные металлы — медь, цинк, свинец, никель и др. [4]

Таблица 2 – Содержание оксидов в искусственных и естественных абразивных материалах

	$Al_2O_3$	$FeO$	$Fe_2O_3$	$SiO_2$	$SiC$
Гранат	36	30	2	36	6
Корунд	40		3		
Наждак	95		0,5	1,15	
Электрокорунд нормальный	95				
Электрокорунд белый	99		0,4		
Электрокорунд хром-тинанистый	97				
Карбид кремния черный					97-99
Сфорокорунд	99				
Формокорунд	80-87		1,5		
Медный шлак			68,4	25	
Никелевый шлак	7		21,12	48	

Из шлаков цветной металлургии наибольшее имеют медеплавильные и никелевые шлаки. Отвальные медеплавильные шлаки имеют черный цвет. Они не подвержены распаду. Средняя плотность шлаков составляет 3300-3800 кг/м<sup>3</sup>, водопоглощение 0,1-0,6%, предел прочности при сжатии 120-300 МПа. Никелевые шлаки обладают такими же высокими показателями физико-механических свойств, как и медные. По химическому составу они относятся к кислым. Никелевые гранулированные шлаки, несмотря на стекловатое строение, практически не обладают гидравлической активностью.

При переплавке алюминиевых сплавов получают алюминиевые (вторичные) шлаки. Химический состав их следующий:  $KCl$ —38-59%,  $NaCl$ — 11,4-34,1,  $CaCl_2$ —3,0-4,2,  $MgO$ —6,2-7,2,  $Al_2O_3$  —6,5-12,6,  $SiO_2$ —1,8-3,5%. Водорастворимые соединения в шлаке составляют 75-85% массы. При длительном нахождении шлаков в воде водорастворимые соединения выщелачиваются. Средняя плотность шлаков 1800-2000 кг/м<sup>3</sup>. Предел прочности их 40-45 МПа.

Задачей модификации вторичных техногенных абразивных материалов является повышение твердости абразивного материала. Модифицирование поверхностного слоя материала может обеспечить прочностные характеристики абразивного материала при одновременном увеличении их пластичности. Одним из методов создания таких материалов является

образование покрытия, образуемого при химико-термической обработке поверхности абразивного зерна в результате диффузии в поверхностные слои неметаллов или металлов из внешней активной среды при высокой температуре. Процесс диффузионного насыщения изменяет фазовый состав и структуру поверхности абразива.

При нанесении покрытий этого типа на поверхности абразивного материала создают слой, либо полностью состоящий из тугоплавкого соединения, либо с высоким содержанием тугоплавких фаз, что достигается насыщением поверхности бором, углеродом, азотом, кремнием и другими металлами и неметаллами. Такое насыщение, как правило, сопровождается реакционной диффузией, то есть образованием в поверхностном слое абразива простых и сложных тугоплавких химически стойких индивидуальных фаз.

Процесс формирования покрытия в этом случае определяется доставкой насыщающего материала к насыщаемой поверхности, его реакционной диффузией в поверхностный слой, а также теми изменениями основы, которые происходят при температурах, необходимых для доставки материала и реакционного насыщения. Таким образом, в данном случае существенное значение имеет технология насыщения, а также глубокие изменения поверхностного слоя основы, происходящие при насыщении.

Свойства насыщенной поверхности определяются структурой, физико-химическими характеристиками, коррозионной стойкостью образующихся при насыщении фаз, поэтому в общем случае может быть произведен достаточно уверенный выбор основного насыщающего агента (бора, углерода, азота, кремния, хрома и др.) для обеспечения образования тех или иных фаз на насыщаемой поверхности. Для получения диффузионных покрытий вторичные техногенные материалы помещают в выбранную насыщающую среду и нагревают, как правило, без доступа воздуха, до высоких температур (1200–1700 К), при которых могут протекать фазовые и структурные изменения. Кроме температуры, являющейся основным параметром любого термического и химико-термического процесса, на скорость диффузионного насыщения в определённых условиях влияют такие параметры как давление, концентрация насыщающего элемента в рабочем пространстве, агрегатное состояние и степень активности этого элемента. В замкнутом пространстве при получении диффузионных покрытий можно выделить процессы, протекающие: 1) в веществе – носителе диффундирующего элемента и на его поверхности; 2) в объеме рабочего пространства; 3) на поверхности и в поверхностном слое насыщаемой основы.

В первом случае на поверхности вещества–носителя диффундирующего элемента идут процессы образования и перехода элемента в активную форму, диффузии элемента к насыщаемой поверхности. При цементации, например, на поверхности карбюризатора образуется оксид углерода (II), который на поверхности стали диссоциирует на активный углерод и оксид углерода (IV). Свободный углерод диффундирует в сталь, а диоксид углерода, взаимодействуя с карбюризатором вновь образует оксид углерода (II). Следует учесть, что при добавлении активаторов на поверхности карбюризатора протекают более сложные процессы.

Во втором случае в рабочем пространстве идут процессы ионизации, взаимодействия с атомами других веществ, повышения энергетического уровня атомов диффундирующего элемента и др.

В третьем случае происходят процессы адсорбции, хемосорбции атомов и молекул диффундирующего вещества поверхностью основы, а так же процессы осаждения и конденсации. Кроме того, не получив достаточного числа связей, диффундирующий атом может сублимировать с поверхности насыщаемой основы в рабочее пространство. И, наконец, самый важный процесс на поверхности насыщаемой основы – это поверхностная, объемная и граничная диффузия адсорбированных и сконденсированных атомов.

В большинстве случаев любой из перечисленных процессов можно интенсифицировать повышением температуры. Скорость процесса диффузионного насыщения определяется скоростью достижения заданной концентрации диффундирующего элемента на поверхности и достижения требуемой глубины диффузионного слоя. В общем случае скорость процесса диффузионного насыщения, а следовательно, и процесса химико-термической обработки лимитируется наиболее медленной стадией – диффузионной, при прочих равных условиях.

Чтобы увеличить скорость перечисленных выше процессов, при диффузионном насыщении необходимо одновременно воздействовать на каждый из них.

Повышение температуры является наиболее действенным способом ускорения диффузионного насыщения, так как параметры диффузии и константы скорости химических реакций связаны с температурой экспоненциальной зависимостью (уравнения 1 и 2).

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

где  $D$  - коэффициент диффузии при заданных условиях, м<sup>2</sup>/с;

$D_0$  - коэффициент диффузии при стандартных условиях, м<sup>2</sup>/с;

$Q$  - энергия активации, Дж/моль;

$R$  - универсальная газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(моль·К);

$T$  - абсолютная температура, К.

Такого рода температурная зависимость отмечается не только в случае диффузии, но и при многих других процессах. В частности значение константы скорости  $K$  для многих химических реакций подчиняется зависимости Аррениуса [5]:

$$K = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

где  $A$  - предэкспоненциальный множитель, по физическом смысле отражающий вероятность благоприятных для осуществления реакций взаимных ориентаций активных молекул при соударении.

Продолжительность процесса насыщения диффузионных покрытий складывается из времени нагрева садки, времени изотермической выдержки, при которой достигаются заданные глубина слоя и содержание элементов на поверхности, и времени охлаждения деталей до заданной температуры.

На скорость реакции в твердой фазе также влияют дефекты в фазе реагента или продукта, так как высокая скорость переноса через такое вещество способствует ускорению процесса. Реакционную способность контактирующих поверхностей при получении диффузионных покрытий можно изменять в широких пределах в результате варьирования условий их получения, обработки, введения микропримесей, механического или радиационного воздействия. В большинстве случаев повышение активности контактирующих материалов при этом связано с возникновением дефектов, природа и концентрация которых определяют поведение реагентов в любых твердофазных процессах, будь то химическая реакция, спекание, рекристаллизация и т.п. Рассмотрение образования конкретных неравновесных дефектов в зоне контакта разнородных материалов позволяет произвести дифференцированную оценку влияния элементарных нарушений на возникновение активного центра и развитие на его базе очага взаимодействия.

Нашей задачей было получение карбидов в поверхностном слое абразивного материала, в промышленных условиях карбид кремния  $SiC$  получают из кремнезема  $SiO_2$  и кокса  $C$  путем нагревания в электропечах Ачессона до температуры 2000-2200°С. В печи протекают сложные реакции, сводящиеся к уравнению:



Сущность процесса образования карбида кремния сводится к тому, что в результате взаимодействия двух исходных твердых продуктов  $SiO_2$  и  $C$  образуется фаза  $SiC$ . Химическая реакция сопровождается перестройкой одной структуры в другую.

Реакция (3) протекает в 2 фазы:



Взаимодействие кварца с углеродом начинается уже около 1000°С, при 1600°С оно становится заметным и ускоряется с дальнейшим повышением температуры.

С целью выведения вредных примесей ( $Al_2O_3$  и  $Fe_2O_3$ ) добавляют поваренную соль, для улучшения вывода  $CO$  и обеспечения плавного хода реакции добавляют древесные опилки или древесную муку.

При протекании реакции (3) возможны образование и разложение промежуточного продукта – оксикарбоната кремния по реакциям:



При взаимодействии твердых частиц кремния и углерода на их контактах сравнительно быстро образуется слой твердого  $SiC$ , тормозящий развитие реакций между компонентами. При взаимодействии твердого углерода с адсорбированными на нём  $SiO_2$  и  $SiO$  реакция образования  $SiC$  идет хотя и медленно, но проходит во всей толще углеродистых частиц, что весьма важно для скорости процесса.

Расчет основан на определении модуля шихты  $M$ , представляющее собой отношение содержания углерода  $[C]$  во всех компонентах к содержанию кремнезёма  $[SiO_2]$  в шихте:

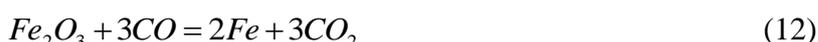
$$M = \frac{\Sigma[C]}{[SiO_2]} \quad (8)$$

Исходя из стехиометрического соотношения для основной реакции (3), модуль должен быть равен 0,6. Практически его принимают равным от 0,58 до 0,62 в зависимости от особенностей сырья и технологии.

Очевидно, что из-за очень высокого содержания  $Fe_2O_3$ ,  $CaO$  и  $MgO$  использовать классическую технологию получения карбида кремния невозможно из-за протекания реакций:



Процесс восстановления железа из оксида  $Fe_2O_3$  можно выразить суммарным уравнением:



Кроме того при температуре около  $1000^\circ C$  протекают реакции:



Указанные процессы, в конечном итоге приводят к спеканию шихты и образованию чугуна, что для наших целей крайне нежелательно. Имеющиеся и образующиеся основные оксиды разрушают карбид кремния: оксиды щелочноземельных металлов ( $MgO$ ,  $CaO$ ) – при температуре  $1300-1370^\circ C$ , оксиды тяжелых металлов ( $FeO$ ) – при температуре  $1000-1200^\circ C$ . Положительной стороной в сложившейся ситуации можно считать возможность образования цементита  $Fe_3C$  (карбида железа), который плавится при температуре  $1250-1260^\circ C$ . Цементит имеет сложную кристаллическую структуру, содержит 6,67% (масс) углерода и характеризуется высокой твердостью ( $>800$  НВ, царапает стекло) и хрупкостью.

Учитывая вышеизложенное, принято решение об использовании минерализаторов – веществ любые малые добавки которых, независимо от агрегатного состояния, физически или химически ускоряют реакцию, но не входят в состав конечной фазы.

Необходимость преодоления энергетического барьера зародышеобразования определяет медленность процессов фазовых переходов, а в некоторых случаях эти переходы вообще трудно или даже невозможно реализовать практически. Вместе с этим давно установлено, что образование зародышей новой фазы ускоряется, если в системе имеются какие-то инициаторы зародышеобразования, например, стенки сосуда, коллоидные включения, примеси, пылинки и

пр. Поэтому в практике нашёл применение метод искусственного введения примесей, облегчающих кристаллизацию и изменяющих структуру закристаллизованного вещества.

По способу действия на реакции между твердыми веществами Барта делит все минерализаторы на три группы, оказывающие влияние на:

- 1) образование зародышей (центров кристаллизации);
- 2) скорость кристаллизации (в частности, путем изменения вязкости системы и отвода тепла от неё);
- 3) структуру и соответственно свойства кристаллических тел (в том числе так называемые поверхностные, структурные и диффузионные минерализаторы).

Кроме добавок ускорителей (минерализаторов) существуют добавки избирательного действия. Так, торможение процесса минералообразования вызывают добавки, которые носят название замедлителей, или ингибиторов; задержку модификационных превращений обеспечивают добавки, которые называют стабилизаторами.

В частности, известно, что скорость перекристаллизации  $\gamma-Al_2O_3$  в  $\alpha-Al_2O_3$  увеличивается в присутствии минерализаторов – соединений фтора, бора, хлора и некоторых других элементов. В их присутствии те же скорости процесса достигаются при более низких температурах. Так, если при обжиге гидроксида алюминия в промышленных вращающихся печах при 1200°C в течение 20-30 мин. степень превращения  $\gamma-Al_2O_3$  в  $\alpha-Al_2O_3$  составляет 20-30%, то в присутствии, например 0,5-1,0%  $Al_2O_3$  или 0,1-0,2%  $B_2O_3$ , она достигает > 80%. В присутствии этих количеств добавок степень превращения равную 20-30%, можно достигнуть за такое же время при 950-1000°C.

После получения опытных образцов модифицированного абразивного материала провели рентгенофазовые исследования этих материалов, которые подтвердили наличие карбидов, упрочняющие данные материалы, как следствие увеличение твёрдости данных абразивных материалов (рис. 2), после чего провели лабораторные исследования абразивных свойств новых материалов.

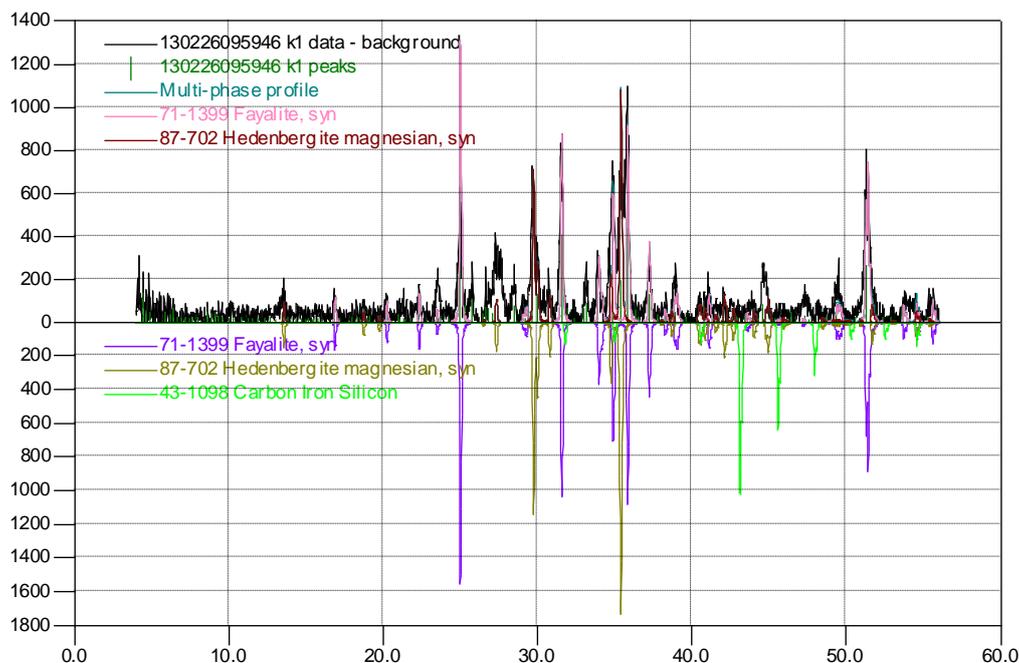
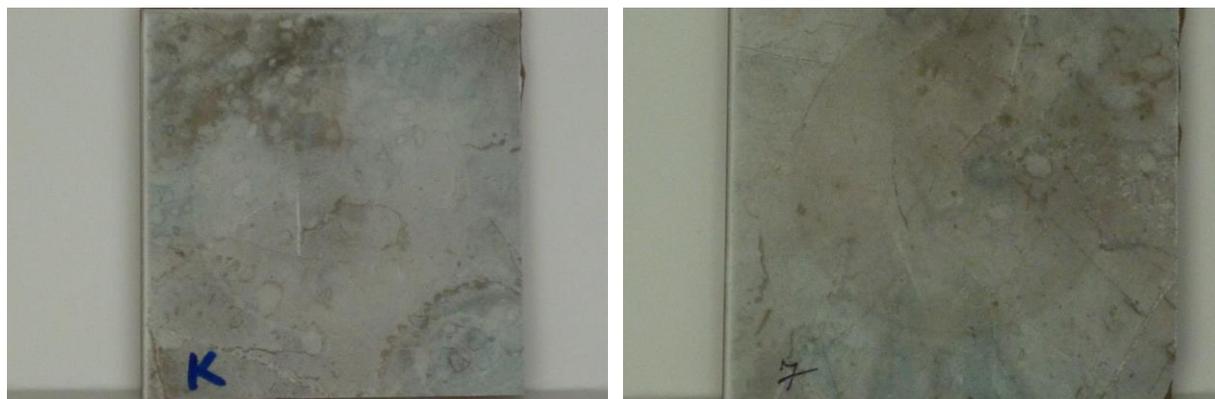


Рисунок 2- Рентгенофлуоресцентный анализ образцов модифицированного материала



а)

б)

**Рисунок 3 – Фотография образца, обработанного составом модифицированного абразивного материала**  
а – образец полученный при использовании корунда; б – образец полученный при использовании модифицированного абразивного материала.

Выводы:

1. Поскольку во вторичном техногенном неорганическом материале высокое содержание  $Fe_2O_3$ ,  $CaO$  и  $MgO$ , является возможным образование цементита  $Fe_3C$  (карбида железа), который имеет сложную кристаллическую структуру, содержит 6,67% (масс) углерода и характеризуется высокой твердостью ( $>800$  НВ), твердость исходного материала возрастает при одновременном увеличении пластичности абразивного зерна.

2. Проанализированы 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.

Статья подготовлена по материалам доклада на VI Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанов, Ю.С. Математическое моделирование процессов сверхзвукового удара и проникания тел в металлические преграды [Текст] / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, А.В. Михеев – Орел: «Издательский дом «Орлик», 2012. – 160 с.
2. Барсуков, Г.В. Определение компонентного состава масс абразивной смеси для резания материалов сверхзвуковой гидроабразивной струей [Текст] / Г.В. Барсуков, А.А. Александров // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – № 2-3. - 2012. – С. 74 – 81.
3. Галиновский, А.Л. Минимизация технологической себестоимости гидроабразивного резания с учетом стоимостных и технологических параметров процесса обработки [Текст] / А.Л. Галиновский, В.А. Тарасов, В.М. Елфимов // *Известия высших учебных заведений «Машиностроение»*.-2011.-№4.- с. 46-54.
4. Полубелова, А.С. Производство абразивных материалов [Текст] / А.С. Полубелова, В.Н. Крылов, В.В. Карлин / Под ред. проф. В.Н. Крылова. – Л.: Машиностроение, 1968 –180 с.
5. Елютин, В.П. Взаимодействие оксидов металлов с углеродом [Текст] / В.П. Елютин, Ю.А. Павлов, В.П. Аоляков, С.Б. Шеболдаев.– М.: Металлургия. 1976. – 360с.

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

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

**Александров Артем Александрович**  
Госуниверситет - УНПК, г. Орел  
Аспирант кафедры ТМиКТИ  
Тел. (4862) 54-14-51  
E-mail: awj@list.ru

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

## **MODIFICATION OF SECONDARY DEVELOPMENT TECHNOLOGY TECHNOLOGICAL ABRASIVE MATERIALS WATERJET CUTTING**

*The authors of the article the basic laws of diffusion in solids and its underlying mechanisms leading to the development of man-made technology to modify the secondary abrasive waterjet cutting.*

**Keywords:** *abrasive waterjet cutting, abrasive, abrasives, abrasive technological secondary.*

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Stepanov, JS Mathematical modeling of supersonic shock and penetration of bodies in metal barriers [Text] / JS Stepanov, GV Barsukov, AV Mikheev - Eagle: "Publishing House" Orlik ", 2012. - 160 c.
2. Badgers, GV Defining the component composition of the masses abrasive mixture for waterjet cutting materials supersonic jet [Text] / G. Barsukov, AA Alexandrov // Fundamental and applied problems of engineering and technology. - № 2-3. - 2012. - S. 74 - 81.
3. Galinovsky, AL Minimizing the cost of waterjet cutting technology with the cost and process parameters treatment [Text] / AL Galinovsky, VA Tarasov, VM Elfimov // Proceedings of the institutions of higher learning "Machine». -2011. - № 4. - S. 46-54.
4. Polubelova, AS Production of abrasive materials [Text] / A. Polubelova, VN Krylov, VV Carlin / Ed. prof. VN Krylov. - L.: Mechanical Engineering, 1968 -180 p.
5. Elyutin, VP The reaction of metal oxides with carbon.

**Gennady V. Barsukov**

State University - ESPC, Orel  
Professor, Head. Department TMIKTI  
Tel. (4862) 54-14-51  
E-mail: awj@list.ru

**Frolenkov Konstantin**

State University - ESPC, Orel  
Ph.D., assistant professor of chemistry  
Tel. (4862) 54-14-51  
E-mail: awj@list.ru

**Aleksandrov Artyom**

State University - ESPC, Orel  
Graduate student TMIKTI  
Tel. (4862) 54-14-51  
E-mail: awj@list.ru

## **МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОДВЕРГАЕМЫХ ПОВРЕЖДЕНИЯМ ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ**

*В статье рассматриваются анализ часто повреждаемых деталей роторов турбин, а также основные применяемые методы восстановления деталей энергетического оборудования магистральных газопроводов.*

**Ключевые слова:** ремонт энергетического оборудования, газопроводы, наплавка

Энергетическая безопасность современной мировой экономики, государств Европы, Азии и Америки напрямую связана с развитием и стабильным функционированием систем транспорта нефти и газа, обеспечивающим поставку углеводородного сырья потребителям. Сегодня, более 80 % всего добываемого в России газа и каждый экспортный кубометр газа принимается и перекачивается благодаря эксплуатации системы газопроводов.

Магистральные газопроводы, компрессорные станции оснащены всеми средствами энергообеспечения, автоматизации, технологической связи и другими собственными системами и источниками жизнеобеспечения, позволяющими функционировать газопроводам в автономном режиме. Учитывая эти факторы, а также то, что в течение ближайших лет нагрузка на газотранспортную систему будет только расти, уделяется самое серьезное внимание вопросам капитального ремонта линейной части газопроводов, реконструкции и технического перевооружения компрессорных станций (КС). Определяющее значение для эффективного развития трубопроводного транспорта имеет научно обоснованная политика внедрения инновационных технических решений, материалов, применение современных методик анализа текущего состояния оборудования магистральных газопроводов.

Посредством сбора и обработки информации о надежности оборудования решаются следующие задачи: определение причин отказов; выявление тех деталей и узлов оборудования, которые лимитируют его надежность; оптимизация норм расхода запасных частей и системы планово-предупредительных ремонтов; выявление условий и режимов эксплуатации, влияющих на надежность; определение экономической эффективности мероприятий по повышению надежности.

Анализ отказов проводится на основе актов расследования отказов и других форм отчетности. Результаты анализа во многом зависят от качества заполнения этих первичных документов. Результаты статистического анализа информации дают достаточный объем информации для качественного анализа возможных дефектов узлов турбин и признаков, по которым можно судить о возникновении этих дефектов. Достоверность результатов такого анализа в значительной мере зависит от количества объектов, по которым собиралась информация.

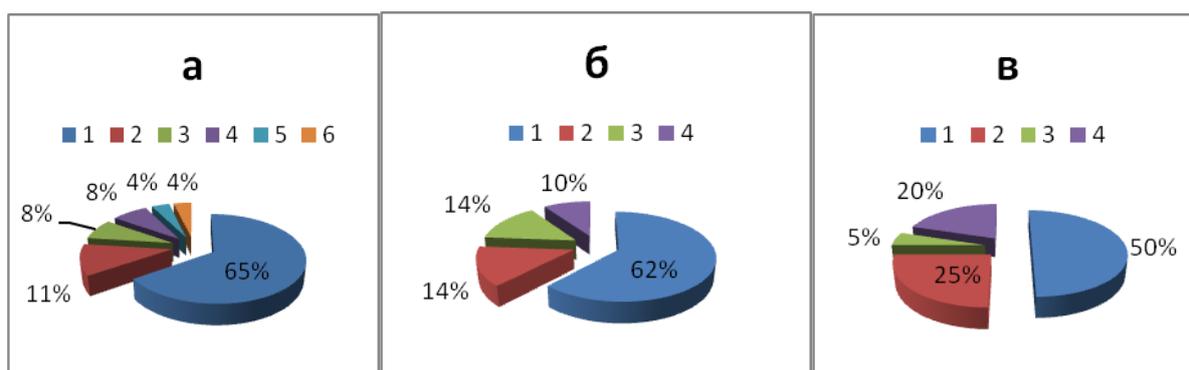
Ниже представлены результаты анализа причин отказов турбин и турбинного оборудования более чем по 800 турбинным установкам мощностью от 100 до 800 МВт разных типов и разных заводов-изготовителей, произошедших за последние 15 лет и вызвавших останов турбоагрегата, на основе обобщения статистического материала, а также форм отчетности предприятий".

Для выполнения анализа все отказы турбин подразделялись в соответствии с их причинами на следующие группы: повреждения проточной части, повреждения системы регулирования, повреждения подшипников, повреждения маслосистемы, повреждения трубопроводов и арматуры, повреждения прочих элементов.

При проведении анализа была применена следующая методика: для турбин каждого типа общее число отказов за исследуемый период принято за 100 % и затем, на основе этих данных, определена доля отказов, вызванных повреждениями элементов в соответствии с принятой выше классификацией. Аналогичные расчеты выполнены для определения доли времени восстановления из-за повреждений каждой группы элементов.

Результаты анализа показали, что доля отказов и доля времени восстановления из-за повреждений элементов каждой группы практически для всех типов турбин имеют близкие значения. Наибольшее время восстановления требуется при отказах из-за повреждений лопаточного аппарата, уплотнений и повреждений подшипников (повреждения баббита, повышенный нагрев, перекос подшипника). Ниже представлены результаты анализа наиболее часто встречающихся повреждений отдельных узлов турбин: роторов, подшипников, рабочих лопаток, элементов маслосистем и так далее.

При анализе повреждений ротора отдельно рассматривались следующие детали: вал ротора, муфты, диски, уплотнения, рабочие лопатки. Наибольшее число повреждений приходится на долю рабочих лопаток (47 %). Повреждаемость вала ротора составляет 17 %. Рабочие и направляющие лопатки газовых турбин являются одними из наиболее ответственных элементов, в значительной мере определяют экономичность и надежность всей турбины. Большинство повреждений рабочих лопаток (до 65 %), распределение которых представлено на рисунке 1, а, связано с обрывом пера рабочей лопатки в прикорневой зоне и в сечении отверстий под демпферную проволоку. В ряде случаев обнаружены трещины в лопатке («12% общего числа повреждений рабочих лопаток) и повышенный эрозионный износ рабочих лопаток («8 % повреждений рабочих лопаток). Обрыв рабочих лопаток практически всегда сопровождается заметными изменениями в состоянии турбины (рис. 1, б). В большинстве случаев (62 %) происходит изменение вибрационного состояния турбины. В 14 % случаев останова турбин с поврежденными рабочими лопатками наблюдается сокращение времени выбега ротора (как правило, из-за высокого уровня вибрации). Во многих случаях эти признаки наблюдаются одновременно в различных комбинациях. Большинство дефектов рабочих лопаток (рис. 1, в) связано с исчерпанием запасов прочности и усталостью металла (50 % повреждений). Второй основной причиной дефектов является эрозионный износ входных и выходных кромок (25 % повреждений).

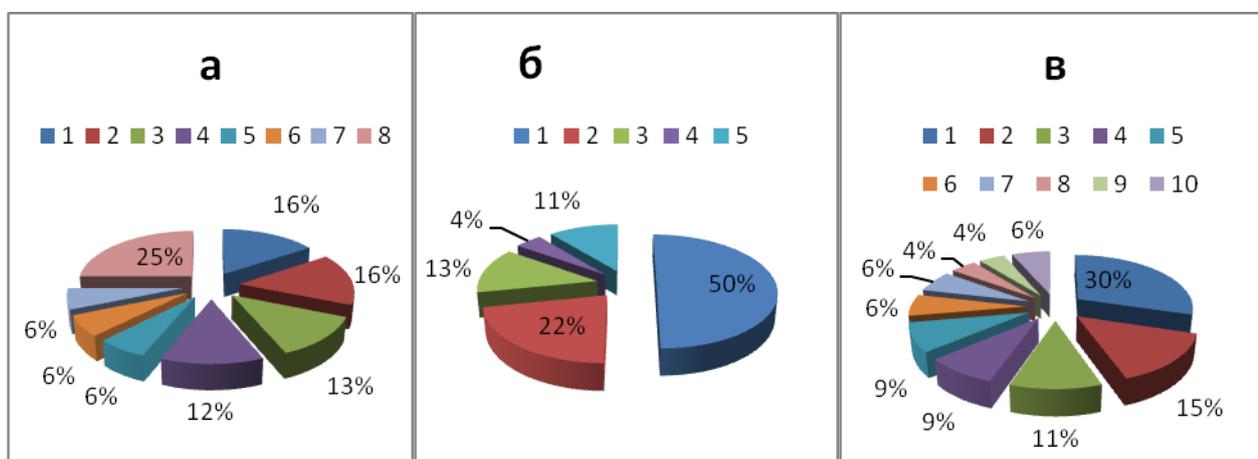


**Рисунок 1 - Повреждения рабочих лопаток:**

*а — распределение повреждений рабочих лопаток (1 — обрыв рабочих лопаток; 2 — трещины в лопатках; 3 — эрозионный износ лопаток; 4 — повреждения бандажа; 5 — подрезка шипов рабочих лопаток; 6 — разрушение демпферной проволоки); б — признаки наблюдаемые при повреждениях рабочих лопаток (1 — нарушение нормального вибросостояния; 2 — шум в проточной части; 3 — сокращение времени выбега ротора; 4 — увеличение жесткости конденсата вследствие повреждения трубок конденсатора оторвавшимися рабочими лопатками или их частями); в — распределение причин повреждений рабочих лопаток (1 — исчерпание запасов прочности и усталость металла; 2 — эрозионный износ; 3 — коррозионный износ; 4 — прочее)*

Анализ причин и характера повреждаемости подшипников проводился отдельно для опорных, упорных и упорно-опорных подшипников, уплотняющих подшипников генератора. При этом повреждения опорных подшипников составляют 42 % от общего числа повреждений подшипников, а повреждения упорных (упорно-опорных) — 45 %. Анализ причин и характера повреждаемости подшипников проводился отдельно для опорных, упорных и упорно-опорных подшипников, уплотняющих подшипников генератора. При этом повреждения опорных подшипников составляют 42 % от общего числа повреждений подшипников, а повреждения упорных (упорно-опорных) — 45 %.

Дефекты опорных подшипников (рис. 2, а) сводятся в основном к различным повреждениям баббита вкладышей. Наиболее часто происходят выкрашивание баббита (»16 % всех повреждений); подплавление его (»16 %); натяг (12,5 %); отслоение, скол, растрескивание (12,5 %). Дефекты опорных подшипников сопровождаются заметными изменениями в состоянии турбоагрегата (рис. 2, б). Наиболее характерными признаками являются: изменение вибросостояния подшипников (при 50 % повреждений); повышение температуры баббита (»22 %), течь масла (13 %). Одними из основных причин повреждений опорных подшипников, распределение которых представлено на рисунке 2, в, являются проблемы с маслом — ухудшение маслоснабжения (» 30 % всех причин) и низкое качество масла из-за его обводнения (»6 %). Ухудшение маслоснабжения происходило как из-за малой (меньше формулярной) величины зазоров в подшипнике, так и из-за дефектов маслосистемы (прекращение подачи масла или временный срыв масляного клина из-за повреждения масляных насосов и их позднего включения, снижение давления масла, перекрытие напорных маслопроводов посторонним предметом). В ряде случаев наблюдались значительные протечки масла из корпуса подшипника, их причиной были увеличенные зазоры по масляным уплотнениям подшипника, перекрытие посторонними предметами сливных маслопроводов и засорение дренажных отверстий.

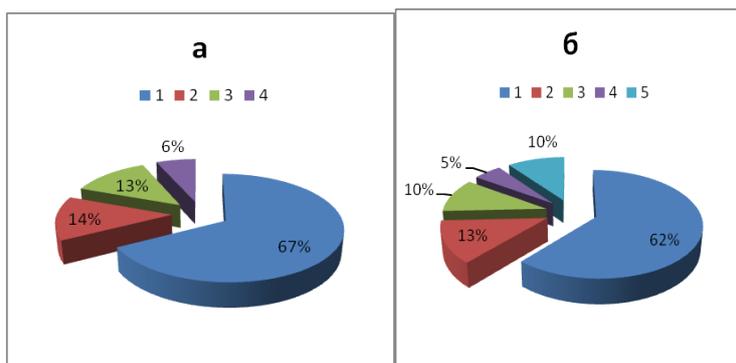


**Рисунок 2 - Повреждения опорных подшипников:**

*а — распределение повреждений опорных подшипников (1 — подплавление баббита; 2 — выкрашивание баббита; 3 — отслоение баббита; 4 — натяг баббита; 5 — натирания на баббите; 6 — местные выработки в баббите; 7 — следы попадания посторонних предметов; 8 — прочее); б — признаки, наблюдаемые при повреждении опорных подшипников (1 — изменение вибросостояния; 2 — повышение температуры баббита вкладышей; 3 — течь масла; 4 — дым из подшипника; 5 — прочее); в — распределение причин повреждений опорных подшипников (1 — ухудшение маслоснабжения; 2 — расцентровка опор и роторов; 3 — нарушение нормального вибросостояния; 4 — некачественная заливка и повреждения баббита; 5 — стесненное перемещение подшипника; 6 — низкое качество масла; 7 — попадание инородного предмета; 8 — качество сборки и работы муфт; 9 — отклонение величины натяга; 10 — прочее)*

При повреждениях упорных и опорно-упорных подшипников происходит в основном подплавление или выплавление баббита колодок (39 % повреждений), а также их механиче-

ское повреждение и износ (49 %). В большинстве случаев (64 %) повреждения упорных подшипников вызывают увеличение осевого сдвига ротора часто до срабатывания защиты (рис. 3, а). Характерными признаками повреждений упорных подшипников являются также повышение температуры баббита упорных колодок (18 %) и увеличение уровня вибрации (12 %). В ряде случаев при повреждениях упорных подшипников все эти признаки наблюдаются одновременно. Причины повреждений упорных колодок представлены на рис. 3, б. Основная причина — увеличение величины осевого усилия (« 62 % повреждений). Причиной 13 % повреждений признается низкое качество масла из-за его обводнения. Третья по частоте проявления группа причин (10 %) связана с дефектами ремонта (высокие или малые натяги на сферу, неправильная подгонка вкладышей, неравномерное усилие на колодки).



**Рисунок 3 - Повреждения упорных (опорно-упорных) подшипников:**

а — признаки, наблюдаемые при повреждении упорных подшипников (1 — увеличение осевого сдвига; 2 — повышение температуры баббита вкладышей; 3 — течь масла; 4 — нарушение нормального вибросостояния); б — распределение причин повреждений упорных подшипников (1 — увеличение осевого усилия; 2 — низкое качество масла; 3 — дефекты ремонта; 4 — стесненное перемещение подшипника; 5 — прочее)

Как показывает анализ, практически все повреждения подшипников и деталей роторов приводят к unplanned останову турбины. Только 12,5 % повреждений вала ротора и 28 % повреждений рабочих лопаток были обнаружены во время плановых ремонтов. Эти дефекты не вызвали заметного изменения в состоянии турбины. Среди них: трещины в осевом канале вала ротора, эрозионный износ рабочих лопаток, трещины в пере рабочей лопатки и отрыв части пера. Так как состояние подшипников во многом определяет вибронадёжность и безаварийность работы турбинных установок, то они также как и лопатки, являются одним из наиболее ответственных узлов турбины. Следовательно, своевременный ремонт данных элементов, выполненный в соответствии с требованиями нормативно-технической документации и результатами диагностики, обеспечивает надёжную работу оборудования.

При ремонте изделий технологические процессы сварки и наплавки занимают ведущее место, поскольку, с их помощью восстанавливают почти 70 % всех деталей. Большое разнообразие материалов, форм и размеров деталей обуславливает необходимость применения в ремонтном производстве различных видов сварки и наплавки.

Особенностью наплавки в среде углекислого газа является то, что дуга между электродом и наплавляемым изделием горит в струе углекислого газа, вытесняющего воздух из плазменного пространства, и защищающего расплавленный металл от воздействия кислорода. Механизированная наплавка в среде углекислого газа (рис.4) имеет следующие преимущества:

- 1) При наплавке отсутствуют вредные выделения и шлаковые корки;
- 2) Открытая дуга даёт возможность наблюдать и корректировать процесс, проводить наплавку при любом пространственном положении наплавляемой плоскости;
- 3) Механизация наплавки, выполняемой на мелких деталях (например, на валах диаметром 10 мм).



*Рисунок 4 – Наплавка в среде углекислого газа*

Сущность электроконтактной наплавки состоит в том, что изношенная поверхность детали высаживается электромеханическим способом. В образовавшуюся высаженную спиральную канавку приваривается дополнительный металл в виде стальной проволоки. В целом процесс восстановления детали этим способом состоит из трёх операций:

- 1) Электромеханическая высадка изношенной поверхности (рис.4);
- 2) Приваривание дополнительного металла в ранее высаженную спиральную канавку (рис.5);
- 3) Механическая обработка поверхности восстановленной детали до необходимого размера.



*Рисунок 4 - Высадка изношенной поверхности*



*Рисунок 5 – Приваривание дополнительного материала*

Приваривание дополнительного металла осуществляется следующим способом:

между высаженной поверхностью детали и роликовым инструментом помещают стальную проволоку и пропускают электрический ток большой силы (1400-2000 А) и низкого напряжения (4-6 В) - в этом случае имеет место интенсивный разогрев металла в месте контакта; под действием усилия инструмента (50-60 кгс) происходит пластическая деформация проволоки и заполнение высаженного профиля. Скорость вращения детали при этом должна быть от 0,4 до 1 м/мин. При большем диаметре проволоки применяются меньшая скорость.

Преимущества электроконтактной наплавки:

- 1) Высокая производительность процесса (до 100 см<sup>2</sup>/мин покрытия толщиной 1,0 мм);
- 2) Небольшие потери присадочной проволоки;
- 3) Небольшая зона термического влияния (не более 0,3 мм);
- 4) Возможность наплавки черных и цветных металлов при восстановлении деталей, изготовленных из стали и чугуна различных марок.

### НАНЕСЕНИЕ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

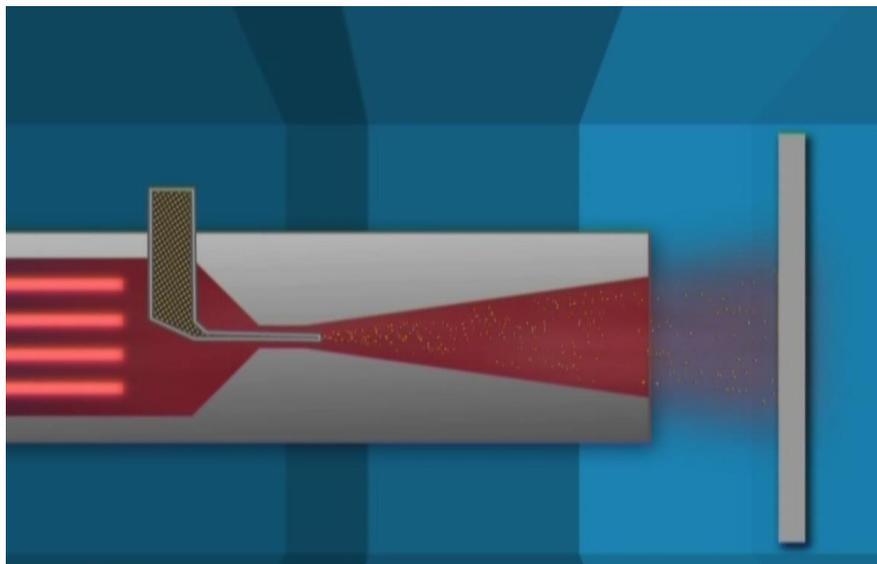
Нанесение газотермических покрытий является чрезвычайно эффективным техническим решением, поскольку, получаемые поверхности с уникальными свойствами, позволяют продлить межремонтные циклы, сократить простои, быстро и экономно отремонтировать дорогостоящее оборудование, существенно повысить сроки службы оборудования, а значит, предотвратить аварии, существенно сократить ремонтные затраты.

### ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ

Плазменное напыление является одним из наиболее эффективных способов нанесения защитных и упрочняющих покрытий на поверхность детали. Это процесс, при котором наносимый материал в виде порошка или проволоки, вводится в струю плазмы, нагревается в процессе движения в потоке газа до температур, превышающих температуру его плавления и разгоняется в процессе нагрева до скоростей порядка нескольких сотен м/с. Подбор оптимального материала покрытия детали для конкретных условий работы позволяет не только восстановить изношенную деталь, но и увеличить срок её службы в несколько раз. Нагрев детали при восстановлении не более 150 С°. Тем самым гарантируется отсутствие температурных деформаций и структурных изменений металла восстанавливаемых деталей.

### ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Технология нанесения покрытий включает в себя нагрев сжатого газа или воздуха; подачу его в сверхзвуковое сопло и формирование в этом сопле сверхзвукового воздушного потока; подачу в этот поток порошкового материала; ускорение этого материала в сопле сверхзвуковым потоком воздуха и направление его на поверхность обрабатываемого изделия (рис.6).



*Рисунок 6 - Газодинамический метод нанесения покрытий*

В качестве порошковых материалов используются порошки металлов и сплавов или их смеси с керамическими порошками. Изменением режимов работы можно менять пористость и толщину напыляемого покрытия. В технологии нанесения покрытий газодинамическим методом с твердой подложкой взаимодействуют частицы, находящиеся не в расплавленном состоянии, но обладающие очень высокой скоростью. Этот метод обладает рядом технологических, экономических и экологических преимуществ:

1) Покрытие наносится в воздушной атмосфере при нормальном давлении, при любых значениях температуры и влажности атмосферного воздуха;

- 2) При нанесении покрытий оказывается незначительное тепловое воздействие на покрываемое изделие;
- 3) Технология нанесения покрытий экологически безопасна;
- 4) Поток напыляемых частиц является узконаправленным и имеет небольшое поперечное сечение;
- 5) Возможность нанесения многокомпонентных покрытий с переменным содержанием компонентов по его толщине.

#### **ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ЭЛЕКТРОНАТИРАНИЕМ.**

Электролитические покрытия получили широкое применение в ремонтном производстве. Они имеют ряд преимуществ перед наплавкой металлов, а именно:

- не вызывают структурных изменений в металле, так как деталь при восстановлении практически не нагревается
- позволяют восстановить даже незначительные износы
- процесс поддаётся механизации и автоматизации

Электронатирание – это один из способов внеанодного нанесения гальванических покрытий. Эта технология может применяться для восстановления наружных поверхностей валов, внутренних поверхностей корпусных деталей, плоских поверхностей и так далее. Сущность процесса заключается в том, что к детали, установленной в станке или специальном устройстве, подключают провод, соединенный с отрицательным полюсом источника питания постоянного тока. Анодом служит угольный стержень, который обертывают специальным адсорбирующим материалом, пропитывают электролитом и соединяют с положительным полюсом источника питания. Электролит поступает из емкости через шланг, а его расход регулируется краном. Непрерывное поступление свежего электролита на анод, обёрнутый адсорбирующим материалом, и перемещение анода по покрываемой поверхности дают возможность применять высокую плотность электрического тока и получать, таким образом, высокую производительность процесса. Для покрытия большой поверхности применяют плоские аноды большой ширины.

За счёт выявления деталей газотурбинных установок, наиболее часто подвергающихся повреждениям, обеспечивается своевременный ремонт данных элементов, выполненный в соответствии с требованиями нормативно-технической документации и результатами диагностики, обеспечивающий надежную работу оборудования. Одним из эффективных видов ремонтных мероприятий является восстановление изношенных поверхностей деталей.

Каждый из перечисленных способов обладает своими преимуществами. Выбор наиболее приемлемого способа состоит в техническом, экономическом и организационном анализе требований к восстановленным деталям, с учётом условий их работы в сопряжениях, производственной программой, оснащённости предприятия, обеспеченности материалами, энергией и так далее. Причём, всё это необходимо учитывать в период технологической подготовки предприятий, на основе анализа накопленного опыта эксплуатации и ремонта, а также с учётом современных технологий восстановления.

Статья подготовлена по материалам доклада на VI Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства».

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Шайхутдинов А.З. Повышение энергетических показателей проточных частей нагнетателей газоперекачивающих агрегатов, применяемых на предприятиях ОАО «Газпром»: Автореф. Дис...канд. техн. наук.– Казань, Казан. гос. Технол. ун–т.–2000.– 18 с.
2. ГОСТ 28567–90. Компрессоры. Термины и определения. М.: изд. Стандартов.– 26 с.

3. Апанасенко А.И., Малюшенко В.В. Газоперекачивающие агрегаты для газовой промышленности. Обзорная информация. Серия ХМ-5. Москва, ЦИНТИхимнефтемаш, 1985.-53 с.
4. ГОСТ 2.701-84. Виды и типы схем. Требования к выполнению схем.
5. Типовые технические требования к газотурбинным ГПА и их системам.– М.: ВНИИГАЗ, 1997.-68 с.

**Герова Светлана Валерьевна**

Магистрант

Брянский государственный технический университет

Тел. +7 920 860 28 89

E-mail: [svetger111@gmail.com](mailto:svetger111@gmail.com)

---

S.V. GEROVA

## **RECOVERY METHOD SUBJECTED DAMAGE CRITICAL POWER EQUIPMENT PARTS OF GAS PIPELINE**

*Experience of development analysis damaged parts of turbine rotors and the main methods used restoration of parts of gas mains power equipment.*

*Keywords: repair of electrical equipment, piping, welding.*

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Shaikhutdinov AZ Improving energy performance of pumped-flow parts teley pumping units used at "Gaz-prom": Author. Dis ... Candidate. tech. Science. - Kazan, Kazan. State. Technological. University t-2000. - 18.
2. GOST 28567-90. Compressors. Terms and definitions. M. Ed. Standards. - 26.
3. Apanasenko AI Malyushenko VV Gas compressor units for the gas industry. Review. ХМ-5 series. Moscow, TsINTIhimneftemash, 1985.-53 p.
4. GOST 2.701-84. Kinds and types of schemes. Requirements for the implementation of schemes.
5. Typical technical requirements for gas turbine compressor units and their systems. - Moscow VNIIGAZ, 1997.-68 p.

**Gerova Svetlana Valer'yevna**

Magistrant of Bryansk State Technical University

Phone: +7 920 860 28 89

E-mail: [svetger111@gmail.com](mailto:svetger111@gmail.com)

---

Д. О. ДОРОХОВ, А. А. КИСЛОВСКИЙ

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО ЛОКАЛЬНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ К ИЗГОТОВЛЕНИЮ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ

*В статье рассмотрены вопросы повышения ресурсов работоспособности подшипников скольжения методами комплексного локального нагружения. Приведена оригинальная материалоёмкая технология изготовления биметаллических подшипников скольжения. Представлено перспективное направление развития технологии комплексного локального деформирования.*

**Ключевые слова:** подшипники скольжения; осесимметричные изделия; комплексное локальное деформирование; упрочнение; биметаллические подшипники.

Повышение ресурса подшипников скольжения – важная задача современного машиностроения. Подшипники данного типа занимают определенную нишу в конструкции машин и механизмов, однако их применение сдерживается рядом существенных факторов (по сравнению с подшипниками качения): меньшие возможные радиальные нагрузки, более высокий коэффициент трения, сложности при установке и замене. Перечисленные аспекты наиболее существенно влияют на выбор конструкторов в сторону применения подшипников качения: шариковых, роликовых, игольчатых. В текущей тенденции развития машиностроения у подшипников скольжения осталось одно неоспоримое преимущество: малые радиальные размеры. Однако и по данной позиции конкуренцию составляют игольчатые подшипники. В целом с технической и, что немало важно, экономической точек зрения подшипники качения существенно выгоднее подшипников скольжения.

Иная ситуация при использовании материалов, из которых изготавливают подшипники качения, в качестве направляющих – тут замена трения скольжения трением качения хоть и принципиально возможна, но на практике не используется. В то же время вопросы износа направляющих и повышения их ресурса также актуальны.

Таким образом, принципиально необходимо решить задачи по повышению нагрузочной способности, как радиальной, так и осевой, и вопросы обеспечения максимальной ремонтной пригодности данных узлов.

Очевидное решение по использованию более прочных и износостойких материалов наталкивается на необходимость обеспечения максимально низкого коэффициента трения, поэтому выбор сплавов существенно ограничен. В отечественной практике важнейшими подобными материалами являются бронзы на основе систем Cu-Sn, Cu-Al, Cu-Si.

Решение по повышению радиальной нагрузочной способности подшипников скольжение приведено в работах [1-4], которое реализуется путем создания градиентной от наружной поверхности структуры. Процесс упрочнения протекает за счет пластической деформации от внедрения кольцевого выступа в металл заготовки и его винтовом перемещении в результате возвратно-поступательного перемещения ролика (6) в осевом направлении, при этом ролик(и) (5) создают квазигидростатическое давление.

Совершенно аналогично может быть реализована и обработка втулок от внутренней поверхности [6, 7]. В работах [1-4] показан рост механических свойств (в частности микротвердости), их градиентное распределение по сечению (принципиальная схема по распределению приведена на рисунке 2) исследуемых образцов.

В то же время подобные технологии не решают проблемы прочности подшипника в осевом направлении и простоты его установки и замены [8]. Одним из возможных решение является изготовление биметаллических втулок или биметаллических пластин, используемых в качестве элементов трения (подшипников и направляющих), и последующая обработка их многоцикловым комплексным локальным деформированием (КЛД).

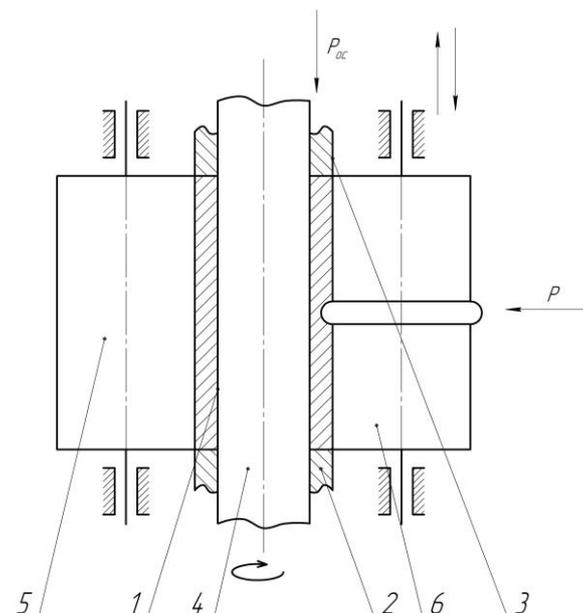


Рисунок 1 - Схема способа получения полых осесимметричных изделий с градиентным от наружной поверхности субмикро- или наноструктурным состоянием материала:

1 - заготовка, 2 - упор, 3 - прижим, 4 - оправка, 5, 6 - ролики [5]

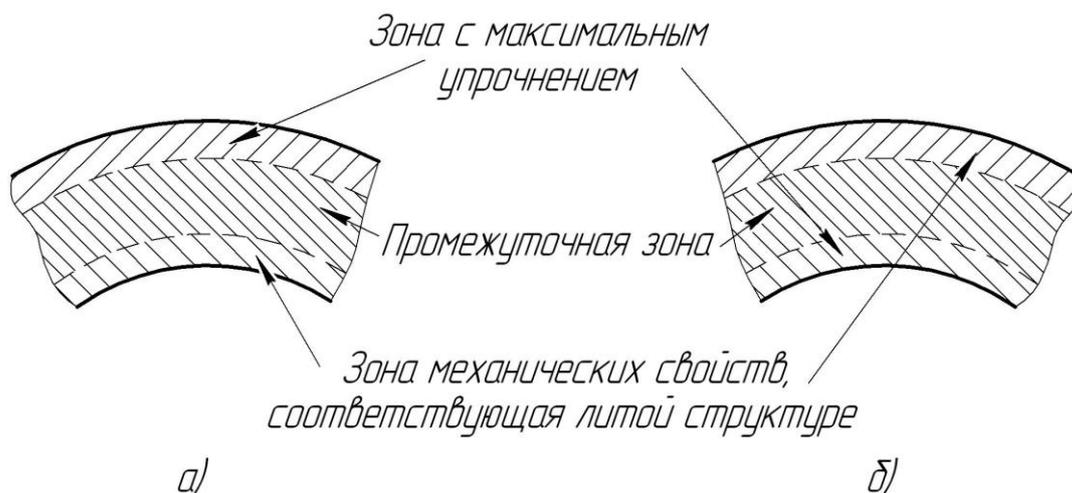


Рисунок 2 - Принципиальная схема по распределению механических свойств втулок, обработанных по способам [5, 6]

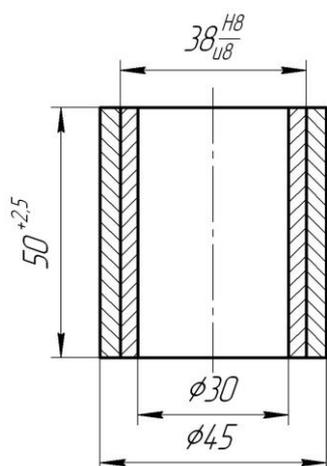
а) - от внешней, б) - от внутренней поверхностей

Примерная технология изготовления биметаллического подшипника скольжения  $\text{Ø}45 \times 30-50$  мм, обработанного по схеме многоциклового КЛД, выглядит следующим образом:

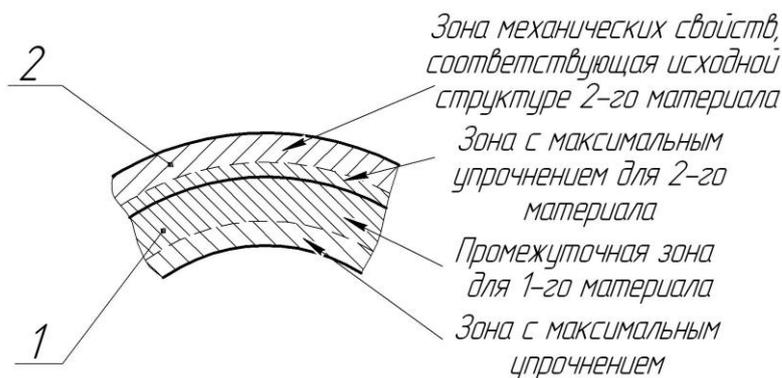
1. Изготовление элемента трения (материал – 1, например БрО5Ц5Ц5С5) размерами  $\text{Ø}38 \times 8 \times 30^{+0,1} - 50^{+2,5}$  мм;
2. Изготовление оболочки (материал – 2, например сталь 40Х) размерами  $\text{Ø}45 \times 38 \times 8-50^{+2,5}$  мм;
3. Запрессовка элемента трения в оболочку (см. рис. 3);
4. Обработка многоцикловым КЛД от внутренней поверхности биметаллической втулки;
5. Обработка в окончательные размеры согласно чертежа.

Альтернативной технологией будет являться способ заливки расплавленного металла (материал – 1) в готовую оболочку (материал – 2) методами наполнительного или центробежного литья.

Таким образом, по аналогии с рисунком 2 имеем следующую картину распределения механических свойств после обработки по схеме многоциклового КЛД (рис. 4).



**Рисунок 3 - Эскиз запрессованной втулки**



**Рисунок 4 - Принципиальное распределение механических свойств биметаллических втулок, обработанных по способу [6].**

Следует отметить, что место соединения двух материалов будет в процессе обработки по схеме многоциклового КЛД претерпевать сжимающие напряжения, что позволит создать биметаллическое соединение сравнимое по прочности с плакированными холодной прокаткой лентами. Граница между разнородными металлами будет существенно размыта.

Очевидно, что подобная технология приведет к существенному удорожанию подшипников скольжения даже, несмотря на, замену его части более дешевым материалом. Однако его нагрузочная способность возрастет, а так же появится возможность реализовать более простую сборку – разборку, так как оболочку можно изготовить таким образом, чтобы она простым способом соединялась с корпусом (по резьбе, через специальные фланцы, шлицы, шпонки и т.д.).

С другой стороны можно в качестве оболочки использовать более дешевый цветной металл или сплав, который будет служить лишь для поддержания осевой прочности (нагрузки значительно меньше радиальных), что приведет наоборот к удешевлению втулки.

В целом поставленная проблематика актуальна, а ее решение основано на синтезе двух известных технологий: биметаллических подшипниках и многоциклового КЛД, что позволит повысить общую конкурентность «традиционных» подшипников скольжения по сравнению с углепластиковыми и с подшипниками качения.

**Работа создана при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых-кандидатов наук (Конкурс – МК-2013).**

**Статья подготовлена по материалам доклада на VI Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства».**

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голенков, В. А. Научные основы упрочнения комплексным локальным деформированием [Текст] / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов, Г.П. Короткий. – М.: ООО «Издательство Машиностроение», Орел: Госуниверситет - УНПК, 2013. – 122 с.
2. Голенков, В. А. Создание градиентных структур на основе метода валковой штамповки [Текст] / В. А. Голенков, С. Ю. Радченко, О. В. Дорофеев, Д. О. Дорохов // Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – Орел: ОрелГТУ, 2009. – № 3/275(561). – С. 42 – 46.
3. Голенков, В. А. Специальные технологические процессы и оборудование обработки давлением [Текст] / В. А. Голенков, А. М. Дмитриев, В. Д. Кухарь, С. Ю. Радченко, С. П. Яковлев, С. С. Яковлев. – М.: Машиностроение, 2004. – 464 с.
4. Голенков, В. А. Применение комплексного локального нагружения при формировании градиентных механических свойств [Текст] / В. А. Голенков, С. Ю. Радченко, О. В. Дорофеев, Д. О. Дорохов / Заготовительные производства в машиностроении. – 2009. – № 10. – С. 22 – 25.
5. Пат. 2340423 Российская Федерация, В24В 39/04. Способ получения металлических втулок [Текст] / В.А. Голенков, В.Г. Малинин, С.Ю. Радченко, Г.П. Короткий, Д.О. Дорохов; заявитель и па-тентообладатель ГОУ ВПО «ОрелГТУ». – № 2007110990/02; заявл. 26.03.2007; опубл. 10.12.2008, Бюл. № 13.
6. Пат. 2389580 Российская Федерация, В21D 51/02. Способ получения металлических втулок с градиентным субмикро- и нано-кристаллическим состоянием материала [Текст] / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, Д.О. До-

рохов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ОрелГТУ». – № 2008146754/02; заявл. 26.11.2008; опубл. 20.05.2010, Бюл. № 14.

7. Пат. 2387514 Российская Федерация, B21D 51/02. Способ получения металлических втулок с градиентной субмикро- и нано-кристаллической структурой [Текст] / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ОрелГТУ». – № 2008146756/02; заявл. 26.11.2008; опубл. 27.04.2010, Бюл. № 12.

8. Подшипники из алюминиевых сплавов [Текст]. - М.: Транспорт, 1974.-256с.

**Дорохов Даниил Олегович**

Мценский филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Государственный университет — учебно-научно-производственный комплекс», г. Мценск

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: [ddostu@mail.ru](mailto:ddostu@mail.ru),

**Кисловский Александр Алексеевич**

Мценский филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Государственный университет — учебно-научно-производственный комплекс», г. Мценск

Студент гр. Тм-5-56

E-mail: [thethe99@mail.ru](mailto:thethe99@mail.ru),

---

D.D. DOROKHOV, A.A KISLOVSKY

**PROSPECTS OF COMPREHENSIVE LOCAL DEFORMATION THE CONSTRUCTION BIMETALLIC BEARINGS**

*The questions of increasing resource efficiency bearings integrated local loading methods. See the original material-technology manufacturing bimetal bearings. A perspective direction of technology for integrated local deformation.*

**Keywords:** bearings; axially symmetric products; integrated local deformation; hardening; bimetal bearings.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Golenkov, VA Scientific basis of complex local deformation hardening [Text] / VA Golenkov, SJ Radchenko, DO Dorohov, GP Short. - Moscow: OOO "Publishing Engine", Orel: State University - ESPC, 2013. - 122.

2. Golenkov, VA Creating gradient structures on the basis of the roll forming [Text] / VA Golenkov, SY Radchenko, O. Dorofeyev DO Dorohov // News OrelGTU. Series "Fundamental and applied problems of engineering and technology." - Orel: Orel State Technical University, 2009. - № 3/275 (561). - S. 42 - 46.

3. Golenkov, VA Special processes and forming equipment [Text] / VA Golenkov, A. M. Dmitriev, V. Kuhar, S. Yu Radchenko, SP Yakovlev, S. Yakovlev. - M.: Mechanical Engineering, 2004. - 464.

4. Golenkov, VA An integrated local loading in the formation of the gradient of the mechanical properties [Text] / VA Golenkov, SY Radchenko, O. Dorofeyev DO Dorohov / Provision of industrial manufacture. - 2009. - № 10. - S. 22 - 25.

5. Pat. 2340423 Russian Federation, B24B 39/04. A method for producing metal sleeves [Text] / VA Golenkov, VG Malinin, SJ Radchenko, GP Short, DO Dorohov, the applicant and the pas-tentoobladatel HPE "OrelGTU." - № 2007110990/02;

appl. 26.03.2007, publ. 10.12.2008, Bull. Number 13.

6. Pat. 2389580 Russian Federation, B21D 51/02. A method for producing metal bushings with a gradient submicron and nano-crystalline state of the material [Text] / VA Golenkov, SJ Radchenko, DO Dorohov applicant and patentee HPE "OrelGTU." - № 2008146754/02; appl. 26.11.2008, publ. 20.05.2010, Bull. Number 14.

7. Pat. 2387514 Russian Federation, B21D 51/02. A method for producing metallic bushings with gradient submicron and nano-crystalline structure [Text] / VA Golenkov, SJ Radchenko, DO Dorohov applicant and patentee HPE "OrelGTU." - № 2008146756/02; appl. 26.11.2008, publ. 27.04.2010, Bull. Number 12.

8. Bearings made of aluminum alloys [text]. - Moscow: Transport, 1974.-256s.

**Dorokhov Daniel Olegovich**

Federal State Budget financed Educational Institution of Higher Education "State university - educational - scientific – production complex" Mtsensk Branch, Mtsensk

Candidate of technical science, docent

E-mail: [ddostu@mail.ru](mailto:ddostu@mail.ru),

**Kislovsky Alexander Alekseevich**

Federal State Budget financed Educational Institution of Higher Education "State university - educational - scientific – production complex" Mtsensk Branch, Mtsensk

Student gr. Tm-5-56

E-mail: [thethe99@mail.ru](mailto:thethe99@mail.ru),

В.Е. ИНОЗЕМЦЕВ, МО НАИНГ У

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЧИСТОВОЙ ОБРАБОТКИ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ СПЛАВОВ

*В статье описываются возможности повышения качества поверхности при чистовой обработке таких сплавов, как силумин и металлокерамика. Улучшить качество поверхности возможно за счёт оптимизации режимов резания, а также, благодаря способу комбинированной отделочной механической обработки. Применение этого способа позволяет получать при обработке алюминиевых и медных сплавов более высокие параметры качества получаемой поверхности.*

**Ключевые слова:** *металлокерамика, силумин, чистовая обработка, шероховатость, пористость, комбинированная обработка, параметры качества.*

Применение высокотехнологичных материалов позволяет обеспечить требуемый уровень качества продукции машиностроения. Заготовки из данных материалов получают максимально приближенными к размерам самих деталей, окончательные геометрические параметры детали приобретают после чистовой механической обработки.

К труднообрабатываемым сплавам относятся металлокерамика, силумины и другие легкоплавкие материалы. Силумины применяются в авиационной и автомобильной промышленности, из них изготавливают поршни, картеры и блоки цилиндров двигателей. Пористые металлокерамические материалы применяются для изготовления самосмазывающихся подшипников скольжения, которые находят успешное применение в бытовой технике, а также в автомобильной и нефтедобывающей промышленности.

Пористая металлокерамика получается в порошковой металлургии с помощью пресования металлических порошков с добавлением порообразователя [1] и спеканием при соблюдении ряда условий. Основные свойства спечённых пористых подшипников скольжения [2], определяющиеся их эксплуатационными качествами: самосмазываемость, хорошая прирабатываемость, износостойкость и прочность. Самосмазываемость пористых подшипников заключается в смазке трущейся пары маслом, содержащимся в порах подшипника.

К качеству поверхности изделий из высокотехнологичных легкоплавких материалов предъявляются высокие технические требования, к металлокерамическим материалам предъявляются особые требования. Таким образом, кроме соответствующей шероховатости, антифрикционные втулки из металлокерамики должны обладать требуемой пористостью поверхностного слоя, с помощью которого удерживается смазка.

В процессе обработки металлокерамики резанием поверхностные поры замазываются под действием режущей кромки инструмента. Пористость поверхностного слоя в результате применения лезвийной обработки сокращается по сравнению с первоначальной в 1,7 – 2 раза. В связи с этим возникает необходимость определения режимов и условий обработки, позволяющих максимально снизить затягивание пор на полученной поверхности.

Перечнем научных исследований были сформулированы основные положения и рекомендации, связанные с определением соответствующих режимов обработки, выбором условий среды резания и требования, которым должен отвечать применяемый режущий инструмент.

С целью повышения пористости поверхности металлокерамических спечённых материалов необходимо использовать рациональные режимы резания. Установлено, что на изменение пористости при механической обработке существенное влияние оказывают такие факторы, как вид материала применяемого режущего инструмента, скорость резания, величина подачи, глубина резания, геометрические параметры режущего инструмента, наличие и вид

применяемой смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС) [3]. Таким образом, при исследовании процесса резания бронзографита и железографита установлено, что для пористых металлокерамических материалов с пористостью поверхности от 18% до 25 % наиболее рациональным является использование высоких скоростей резания, применение твёрдосплавного инструмента с износостойким покрытием с минимальным радиусом вершины, имеющим минимальное округление режущей кромки [4]. Передний и задние углы режущего инструмента должны находиться в рекомендуемых пределах – соответственно  $\gamma = 4-5^\circ$ ,  $\alpha = 7-8^\circ$ , подача не должна превышать 0,05 мм/об, глубина резания должна быть минимальной, но не менее, чем величина радиуса вершины режущего инструмента. Для чистовой механической обработки металлокерамических материалов рекомендуется использовать водорастворимые СОТС: Укринол-1М, Велс-1М. Данных мер возможно будет достаточно, если на полученной поверхности пористость и шероховатость будут соответствовать техническим требованиям к поверхности пористых металлокерамических материалов.

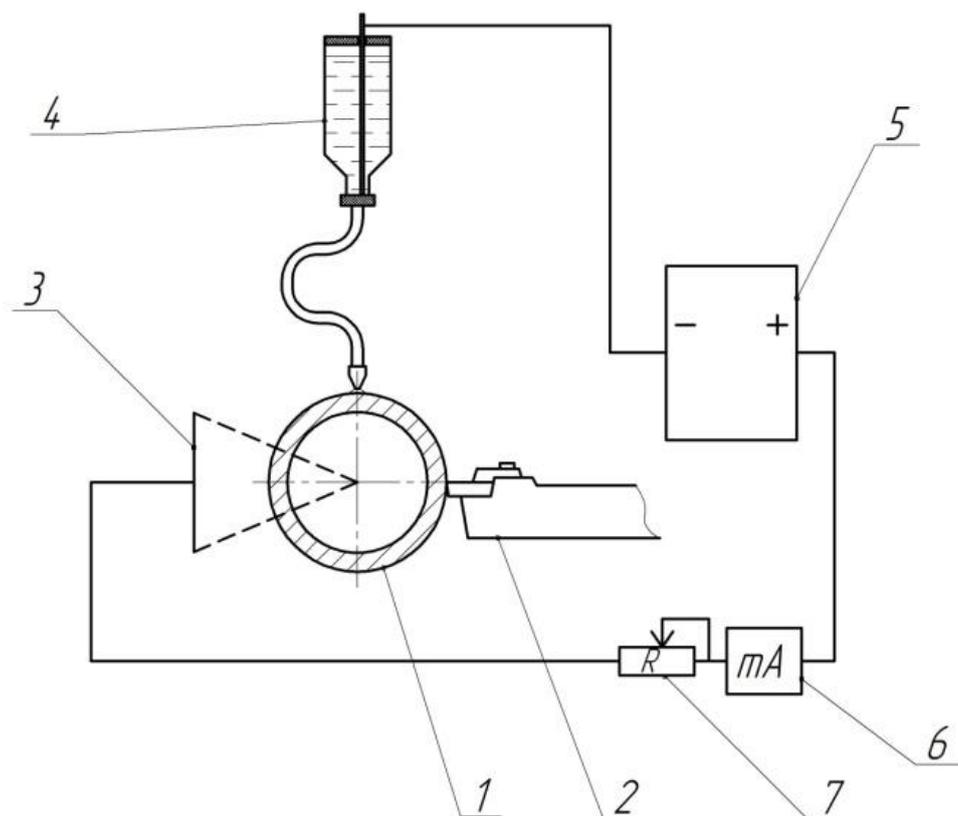
Пористость и шероховатость поверхности готовых изделий указываются в сертификате качества продукции и являются основополагающими показателями качества поверхности для антифрикционных вкладышей и втулок [5]. На практике не всегда чистовая механическая обработка позволяет получить необходимую шероховатость поверхности, даже если в процессе формообразования пористость соответствует предъявляемым требованиям. Применение СОТС при механической обработке позволяет увеличить влияние на изменение пористости и шероховатости поверхности.

Также существуют нетрадиционные способы формообразования, представляющие собой комбинированную обработку, которая может включать механическое, электрическое, химическое воздействие.

Существует большое разнообразие способов комбинированной обработки, сочетающих методы воздействия на поверхность с наложением электрического поля. К их числу относится и электрохимикомеханический комбинированный метод обработки [6]. Данный метод представляет обработку поверхности за счёт анодного процесса, основными видами воздействия здесь являются механическое силовое и химическое. Как показывают исследования, электрохимикомеханический комбинированный метод обработки является эффективным для достижения требуемых значений шероховатости поверхности деталей из металлокерамических спечённых материалов; металлокомпозитов, получаемых литьём; силуминов и других материалов.

Установлено [7], что чистовую анодно-механическую обработку рекомендуется осуществлять при малых плотностях электрического тока, поэтому основное значение при её выполнении имеют механизмы анодного растворения и механического снятия плёнки движущимся инструментом. Эти процессы происходят преимущественно по вершинам микронеровностей, которые подвержены наиболее интенсивному электрохимическому воздействию и только на них происходит непрерывное механическое удаление плёнки. Во впадинах микронеровностей формируется толстый слой плёнки, играющей защитную роль. В совокупности это приводит к непрерывному уменьшению шероховатости, достижению высокой точности и чистоты поверхности.

Экспериментально подтверждено, что эффективным способом для получения требуемых параметров качества поверхностного слоя деталей из пористых металлокерамических материалов является комбинированная механоэлектрохимическая обработка с СОТС. Принципиальная схема установки для механоэлектрохимической обработки представлена на рисунке 1.



**Рисунок 1 - Принципиальная схема установки для комбинированной электрохимической обработки:**  
 1 – заготовка; 2 – режущий инструмент; 3 – динамическое токосъёмное устройство; 4 – подача раствора;  
 5 – источник тока; 6 – микроамперметр; 7 – резистор с регулируемым сопротивлением

В качестве анода служит поверхность обрабатываемой пористой металлокерамики, в качестве катода используется металлический стержень, помещённый в ёмкость с химически активным раствором [8, 9]. Величина тока и напряжения зависит от режимов резания, марки обрабатываемой металлокерамики, от вида материала инструмента и его геометрических параметров. Подключение анода к источнику питания осуществляется через динамическое токосъёмное устройство. Эффективность обработки повышается при использовании в роли СОТС химически активного раствора с хорошей токопроводностью.

Механическая обработка материалов на основе алюминия сопровождается задирами на поверхности [10], выходящей из-под резца, а также налипанием удаляемого материала на режущую кромку инструмента, что приводит к снижению эффективности процесса резания, повышенному тепловыделению и износу инструмента. Для достижения высокого качества поверхности при резании силуминов рекомендуется использовать специальные режущие пластины с алмазоподобным углеродным покрытием и другими износостойкими покрытиями. При этом режущий инструмент должен обладать большим передним углом, малым радиусом округления режущей кромки  $r$  и малым радиусом вершины инструмента  $r$ . В целях снижения шероховатости возможно добавление в СОТС химических реактивов, снижающих прочность удаляемого слоя материала. Таким образом анодно-механическая обработка силумина с применением раствора каустической соды позволила получить поверхность с шероховатостью  $Ra$  0,6 - 0,7, скорость резания  $V$  составила 214 м/мин, подача  $S$  - 0,05 мм/об, глубина резания  $t$  - 0,5 мм. в качестве режущего инструмента использовалась сменная твёрдосплавная пластина чашечной формы.

Электрохимикомеханическая обработка металлокерамики и силумина совместно с рациональными режимами резания способствует улучшению качества формируемой поверхности. Данный комплекс мер, направленный на достижение требуемых параметров качества позволяет регулировать интенсивность съёма удаляемого металла за счёт изменения концентрации электролита применяемого в качестве смазочно-охлаждающей технологической среды, за счёт увеличения силы электрического тока, варьирования режимов резания, применения режущего инструмента с другими геометрическими параметрами.

Статья подготовлена по материалам доклада на VI Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства».

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Бабич Б.Н., Вершинина Е.В., Глебов В.А. Металлические порошки и порошковые материалы. Справочник. – М.: ЭКОМЕТ, 2005. С. 450.
2. Кипарисов С.С., Либенсон Г.А.. Порошковая металлургия. Москва Металлургия, 1980. С.382.
3. Куликов М.Ю.; Иноземцев В.Е.; Мо Наинг У. Способ улучшения качества поверхностного слоя с помощью комбинированной механо-электрохимической обработки. Сборник научных трудов «Високі тенологіі в машинобудуванні» Харьковський політехнічний інститут. №1 2012. С. 168 – 170.
4. Куликов М.Ю., Иноземцев В.Е.. Исследование воздействия условий резания на качество формирования поверхности металлокерамических изделий при их чистовой токарной обработке. Мир транспорта №2 2012 С. 44 – 49.
5. Иноземцев В.Е.. Использование и обработка металлокерамики. Журнал «Мир транспорта» № 4/2010. МИИТ. С. 44 – 48.
6. Афонин А.Н., Гапоненко Е.В., Еренков О.Ю. и другие. Прогрессивные машиностроительные технологии. Москва. Спектр. 2012. С.191.
7. Подураев В.Н.. Резание труднообрабатываемых материалов. М. Высшая школа. 1974. С. 469-470, С. 494.
8. Иноземцев В. Е.. Факторы, влияющие на технологические возможности металлокерамических спечённых материалов, в процессе лезвийной чистовой обработки. Научно – технический журнал «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» Государственного университета – учебно-научно-производственного комплекса (ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»). № 4/2 (288) 2011. Орёл 2011. С. 61 – 66.
9. Иноземцев В.Е., Куликов М.Ю.. Исследование влияния условий чистовой механической обработки металлокерамических спечённых материалов на качество образуемой поверхности. Межвузовский сборник научных трудов «Физика, химия и механика трибосистем» Ивановского государственного университета. Трибологический центр ИвГУ. Выпуск X. Иваново 2011. С. 88 - 93.
10. Ковенский И.М., Кусков В.Н., Прохоров Н.Н.. Структурные превращения в металлах и сплавах при электролитическом воздействии. Тюмень ГНГУ, 2001. С.115.

---

#### **Иноземцев Виталий Евгеньевич**

Кандидат технических наук,  
ФГБ ОУ ВПО Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ)  
Тел: 8 (495) 684-24-53  
E-mail: vitalin-85@mail.ru

#### **Мо Наинг У**

Аспирант  
ФГБ ОУ ВПО Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ)  
E-mail: myonaingoo27@mail.ru

V.E. INOZEMTSEV, MYO NAING OO

## **QUALITY INCREASE FINISHING OF INTRACTABLE ALLOYS**

*The article describes the opportunities to improve the surface quality at finishing alloys such as silumin and cermets. Improve the quality of the surface is possible by optimizing the cutting conditions, and also, because of the way the combined finish machining. Application of this method allows to obtain the processing of aluminum and copper alloys higher quality settings obtained surface.*

**Keywords:** *metallceramic, silumin, finishing, surface roughness, porosity, combined treatment, quality parameters.*

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Babich B. N.; Vershinin E. B; Glebov B. A. Metal powdes and powder materials. Reference book-ECOMET, 2005. Pg.450
2. Супаресов С.С.; Кипарисов С.С.; Libenson G. A. Powder metallurgy. Moscow Metallurgy, 1980. Pg.382
3. Kulikov M.U.; Inozemtsev V. E.; Myo Naing Oo. Method for improving the surface layer quality by the combination of mechanical-electrochemical processing.Способ улучшения качества поверхностного слоя с помощью комбинированной механо-электрохимической обработки. Collecting of scientific works “The high technology in mechanical engineering” Kharkov polytechnic institute . №1 2012. Pg. 168 – 170.
4. Kulikov M.U.; Inozemtsev V. E.. Research the effects of cutting condition in the surface formation quality of metal-ceramic products during their finishing turning process. Journal“World transport” №2 2012 Pg. 44 – 49.
5. Inozemtsev V. E.. Using and processing of ceramic-metal. Journal “World transport” № 4/2010. МИИТ. Pg. 44 – 48.
6. Afonin A.N., Gaponenko E.B., Erenkov O.U. and others . Progressive mechanical engineering technology. Moscow. Spectrum. 2012. Pg.191.
7. Poduraev B.N.. Cutting hard-to-cut materials. M. M. Higher school. 1974. Pg. 469-470, Pg. 494.
8. Inozemtsev V. E.. Factors influencing in the technological capabilities of metal-ceramic sintered materials, during the finishing process. Science-technological magazine “Fundamental and applied problems of engineering and technology” State university- education-scientific-industrial complex (FGBOU VPO “State university”) № 4/2 (288) 2011. Eagle 2011. Pg. 61 – 66.
9. Inozemtsev V. E., Kulikov M.U.. Research the effects of finishing mechanical processing condition of metal-ceramic sintered material on the formed surface quality. Interuniversity collection of scientific papers “ Physic, chemistry and mechanic tribosystem” Ivanovo state university. Tribological center- ivanovo state university. Issue X.Ivanovo 2011. Pg. 88 - 93.
10. Kovensky I.M., Kuskov B.N., Prohorov N.N.. Structural transformation of metal and alloy by electrolytic action. Tyumen GNGU. 2001. Pg.115.

#### **Inozemtsev Vitaliy Evgenevich**

Candidate of technical sciences  
Moscow State University of Railway Engineering (МИИТ)  
Phone: 8 (495) 684-24-53  
E-mail: vitalin-85@mail.ru.

#### **Myo Naing Oo**

Postgraduate  
Moscow State University of Railway Engineering (МИИТ)  
E-mail: myonaingoo27@mail.ru.

УДК 621.99

Р.А. ЗУЙКИН, А.Н. АФОНИН

**ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПАРАМЕТРОВ РЕЖУЩЕ-ДЕФОРМИРУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ  
ТРАПЕЦЕИДАЛЬНЫХ РЕЗЬБ НА ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ  
И СИЛЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

*Описана методика моделирования режущо-деформирующей обработки резьб методом конечных элементов. Выявлен характер влияния шага и угла резьбы, диаметра инструмента и заготовки, формы припуска под накатывание при режущо-деформирующей обработке трапецеидальных резьб на эквивалентные деформации и силы деформирования. Даны рекомендации по выбору величины припуска.*

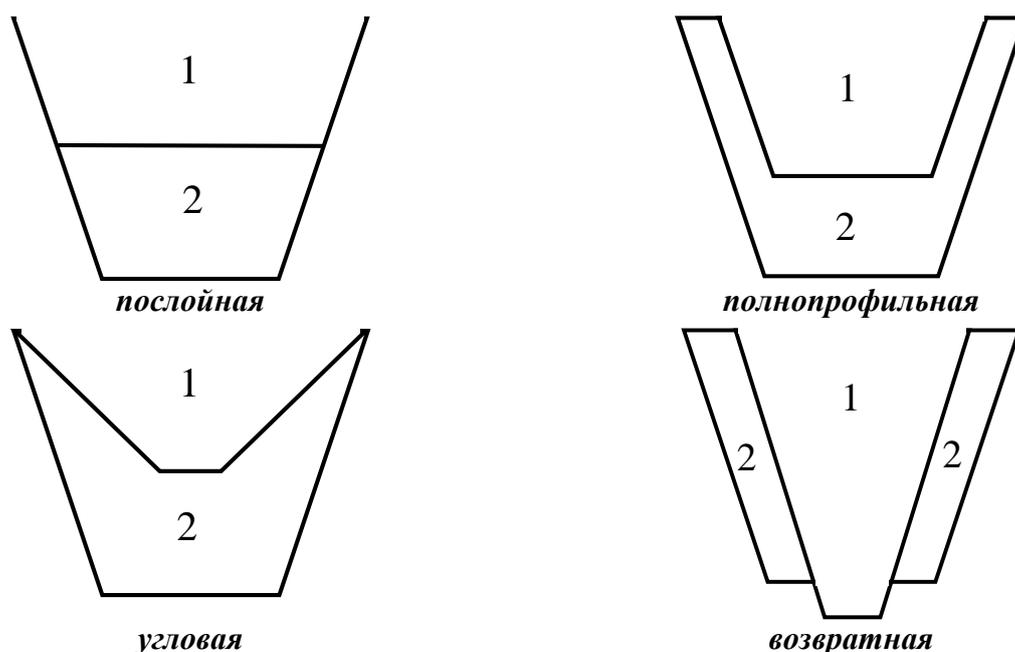
**Ключевые слова:** резьба, накатывание, режущо-деформирующая обработка, метод конечных элементов

Перспективным способом формообразования и упрочнения резьб является обработка пластическим деформированием – накатыванием. Накатывание обеспечивает существенное повышение статической и, в особенности, усталостной прочности резьбы. Однако, накатывание резьб имеет достаточно жесткие ограничения по размерам винтовой поверхности и механическим свойствам обрабатываемого материала. При накатывании крупных резьб возникают значительные силы деформирования. Накатывание резьб на предварительно упрочненной термической обработке заготовке приводит к значительному снижению стойкости инструмента, что делает ее экономически нецелесообразной. Особенности технологические трудности вызывает накатывание трапецеидальных резьб, которые нашли широкое применение в машиностроении.

При изготовлении крупных трапецеидальных резьб и трапецеидальных резьб на заготовках из малопластичных материалов наиболее целесообразным является применение комбинированной режущо-деформирующей обработки (накатывания резьб по предварительно нарезанной винтовой канавке) [4, 6]. Срезание части припуска при комбинированной обработке позволяет уменьшить степень деформации при последующем накатывании и снизить силы деформирования. Однако, режущо-деформирующая обработка резьб не нашла широкого применения в промышленности. Причинами этого является недостаточная изученность данного технологического процесса. В частности отсутствуют научно-обоснованные рекомендации по выбору схем деформирования, конструктивных и технологических параметров режущо-деформирующей обработки.

Для выявления характера влияния схем деформирования, конструктивных и технологических параметров режущо-деформирующей обработки трапецеидальных резьб на эквивалентные деформации и силы деформирования необходимо исследование полей напряжений и деформаций в заготовке при накатывании. Наиболее целесообразным для проведения подобных исследований представляется использование метода конечных элементов (МКЭ) [4, 5]. Одним из мировых лидеров в области моделирования технологических процессов обработки давлением и резанием с помощью МКЭ является система DEFORM, обладающая возможностью моделирования значительных объемных пластических деформаций при сложной кинематике движения инструмента.

Задача моделирования режущо-деформирующей обработки решалась в трехмерной постановке в модуле DEFORM 3D. Моделировалось внедрение двух витков инструмента в заготовку. Моделировалось накатывание по целому и с предварительной лезвийной обработкой, обеспечивающей получение различных схем деформирования (рис.1) [1-3] при варьировании шага резьбы  $p$  от 5 до 10 мм, диаметра заготовки  $d$  от 100 до 110 мм, диаметра накатного ролика  $D$  от 50 до 80 мм, угла профиля трапецеидальной резьбы  $\alpha$  от 30° до 90°.



**Рисунок 1 – Основные схемы деформирования при режущо-деформирующей обработке резьб в осевом сечении**  
 1- прорезанная канавка; 2- припуск под накатывание

Поскольку остаточные деформации после резания незначительны по сравнению с деформациями после накатывания, моделирование нарезания канавок не производилось. Канавки на заготовке получали при моделировании в CAD системе. Величина припуска под накатывание в соответствии с рекомендациями [3] принималась равной половине глубины профиля резьбы.

Поскольку упругая составляющая деформации заготовки при резьбонакатывании составляет не более 0,1%, заготовка для ускорения времени расчета принимается жесткопластичной. Инструмент при расчете полей напряжений и деформаций в заготовке принимается идеально жестким. Подобные упрощения не вносят существенной погрешности в результаты расчета.

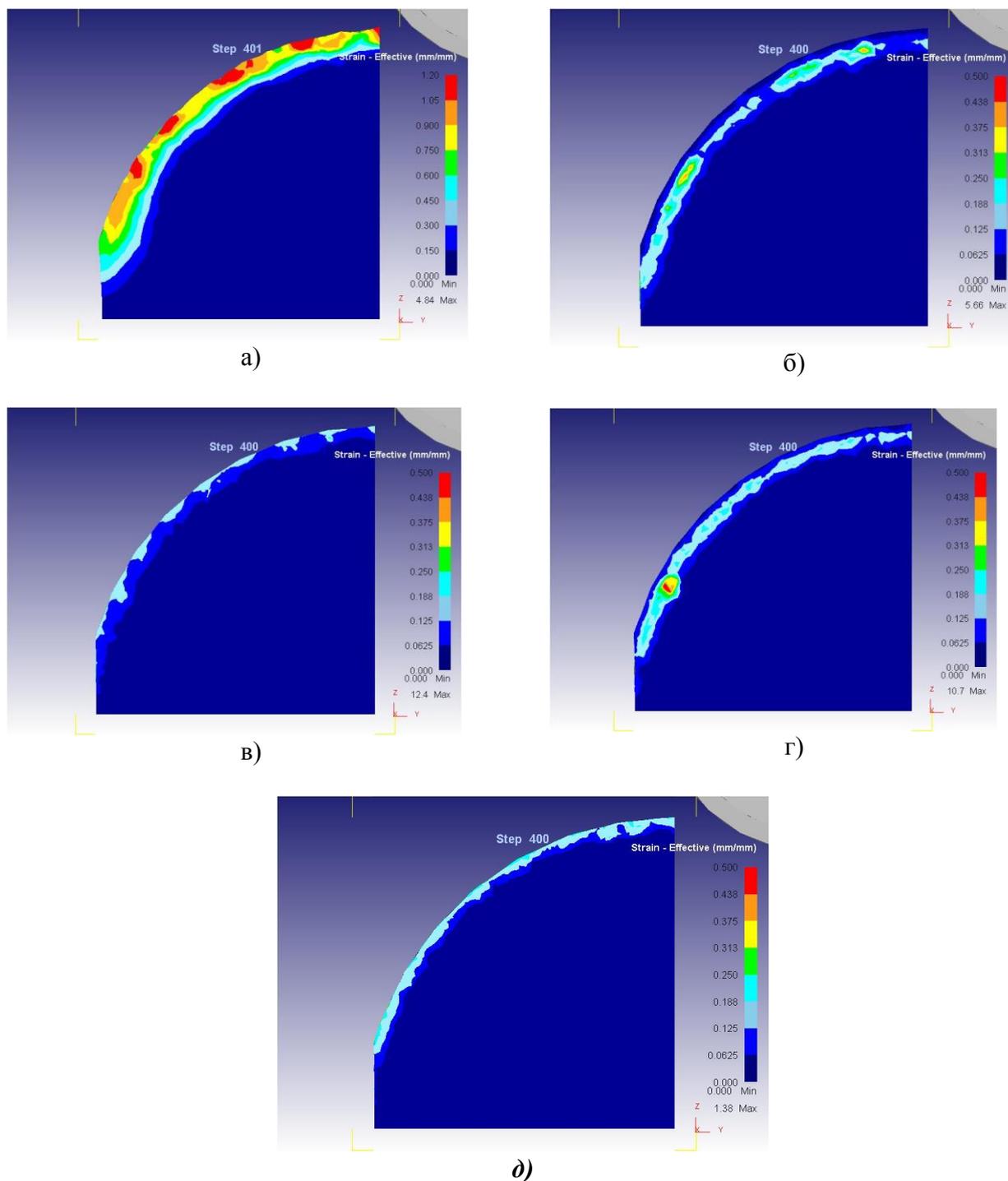
Механические свойства материала заготовки и инструмента задаются путем выбора соответствующей стали из имеющихся в программном комплексе библиотек материалов. При этом используется мультилинейная модель упрочнения. Материал заготовки – сталь 45. Деформации заготовки после обработки резанием не учитывались как несущественные.

При определении характеристик контактного взаимодействия объектов модели между заготовкой и инструментом задается кулоново трение с коэффициентом 0,08. Для учета при моделировании возможности образования на вершинах резьбы складок - закатов необходимо задать возможность возникновения контакта заготовка-заготовка и задать трение с коэффициентом 0,12.

Поля эквивалентных деформаций, полученные в результате моделирования при различных схемах деформирования представлены на рисунке 2. Из результатов моделирования хорошо видно, что деталь, не подвергающаяся лезвийной обработке, имеет после накатывания резьбы наибольшие деформации, по сравнению с остальными. При режущо-деформирующей обработке наибольшую степень деформации обеспечивают послойная и угловая схемы деформирования.

На рисунке 3 представлены графики зависимости сил деформирования от времени накатывания при обработке резьбы шагом 5 мм и углом профиля 30°, с диаметром заготовки 100 мм и диаметром ролика 50 мм (рис. 3,а); резьбы шагом 5мм и углом профиля 30°, с диаметром заготовки 100 мм и диаметром ролика 80 мм (рис 3,б); резьбы шагом 10 мм и углом профиля 30° с диаметром заготовки 100 мм и диаметром накатного ролика 50 мм (рис. 3,в); резьбы шагом 10 мм и углом профиля 30°, с диаметром заготовки 100 мм и

диаметром ролика 80мм (рис. 3, г). Из данных графиков следует, что использование режуще-деформирующей обработки позволяет снизить силы деформирования в 2 и более раза. При режуще-деформирующей обработке наибольшие силы деформирования возникают при послойной и угловой схемах деформирования, а наименьшие при возвратной.



*Рисунок 2 – Поля эквивалентных деформаций в детали при накатывании по целому (а) и при режуще-деформирующей обработке с послойной (б), полнопрофильной (в), угловой (г) и возвратной (д) схемами деформирования*

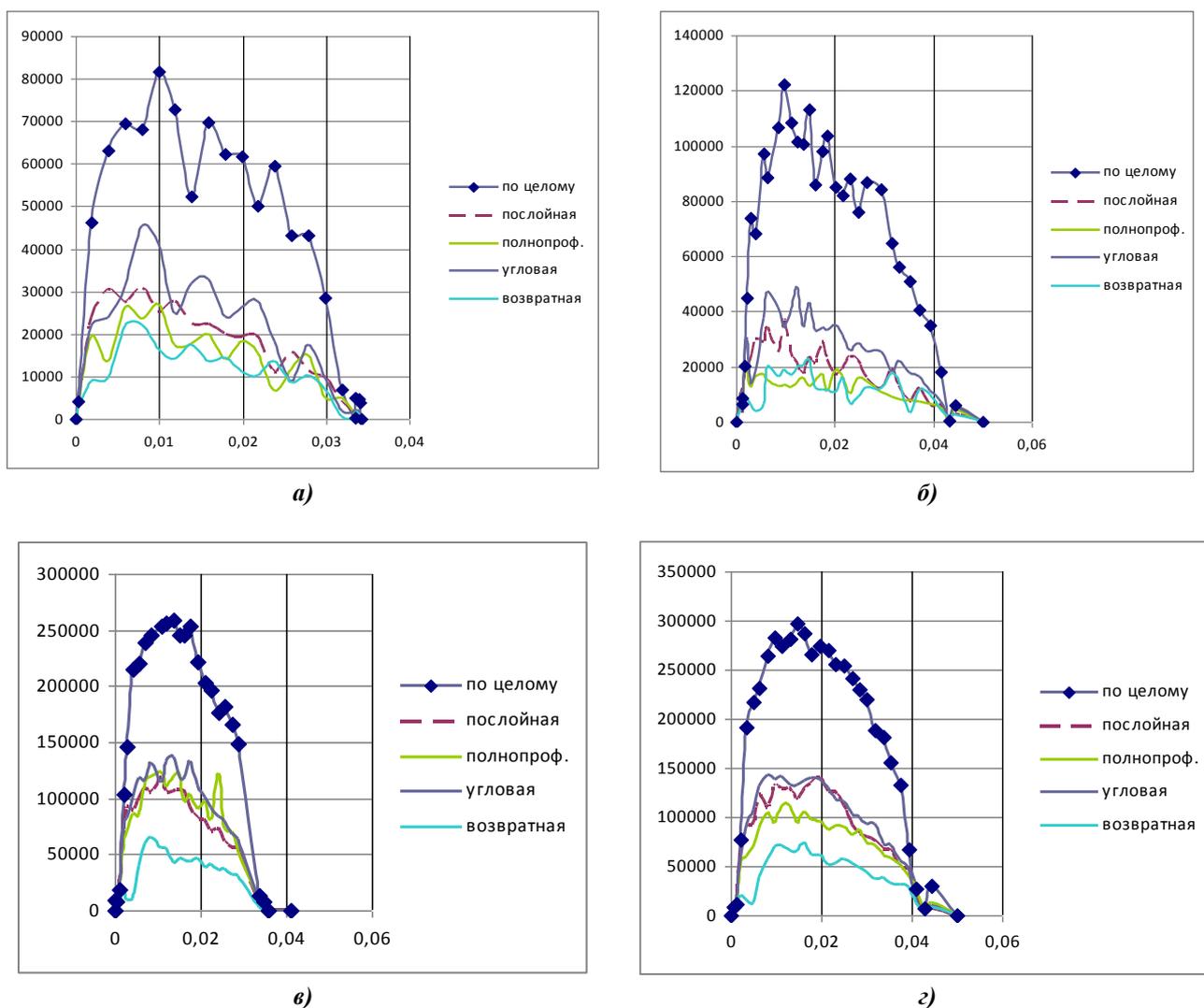


Рисунок 3 – Графики зависимости сил деформирования от времени накатывания при различных схемах деформирования

Путем регрессионного анализа результатов вычислительного эксперимента в системе *Statistica* получены зависимости, характеризующие влияние на силы деформирования конструктивных и технологических параметров режуще-деформирующей обработки. В качестве примера можно привести следующие зависимости для следующих схем обработки:

накатывание по целому

$$F = -512606 + 1730p + 3933d + 6871 \cdot D + 7682 \cdot \alpha + 178pd - 112pD - 375p\alpha - 58dD - 62d\alpha + 13D\alpha$$

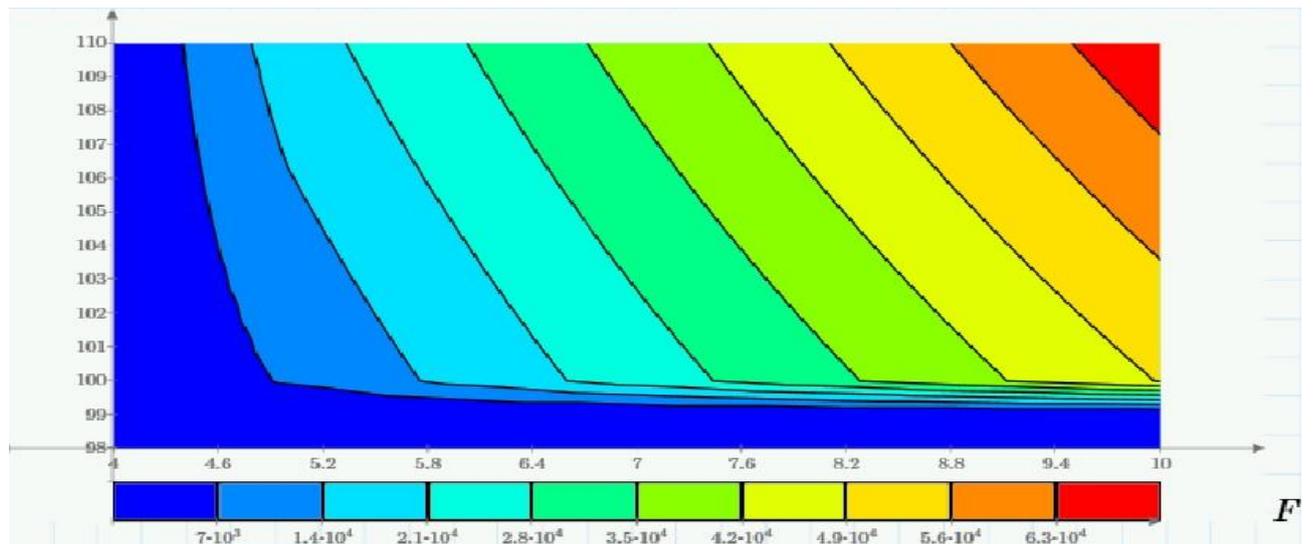
режуще-деформирующая обработка с угловой схемой деформирования

$$F = -915073 + 164721p + 5308d - 11680D + 21920\alpha - 1163pd - 459pD - 176p\alpha + 175dD - 183d\alpha - 73D\alpha$$

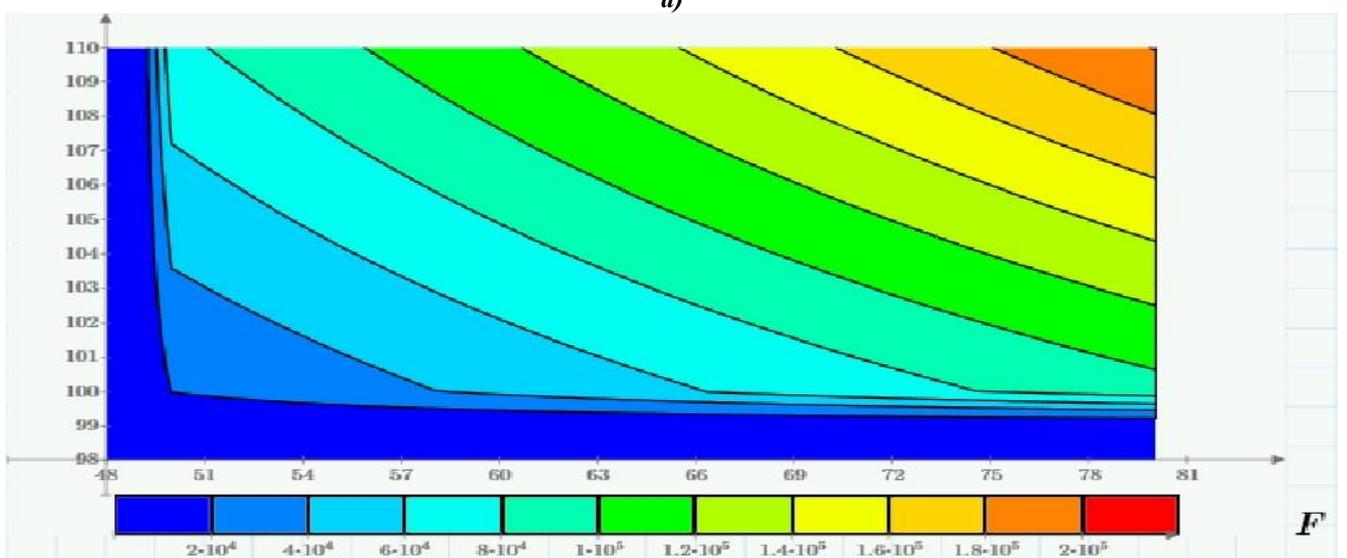
режуще-деформирующая обработка с возвратной схемой деформирования

$$F = -1010999 + 274182p + 4881d - 26964D + 39690\alpha - 2177pd - 610pD + 154p\alpha + 344dD - -326d\alpha - -136D\alpha.$$

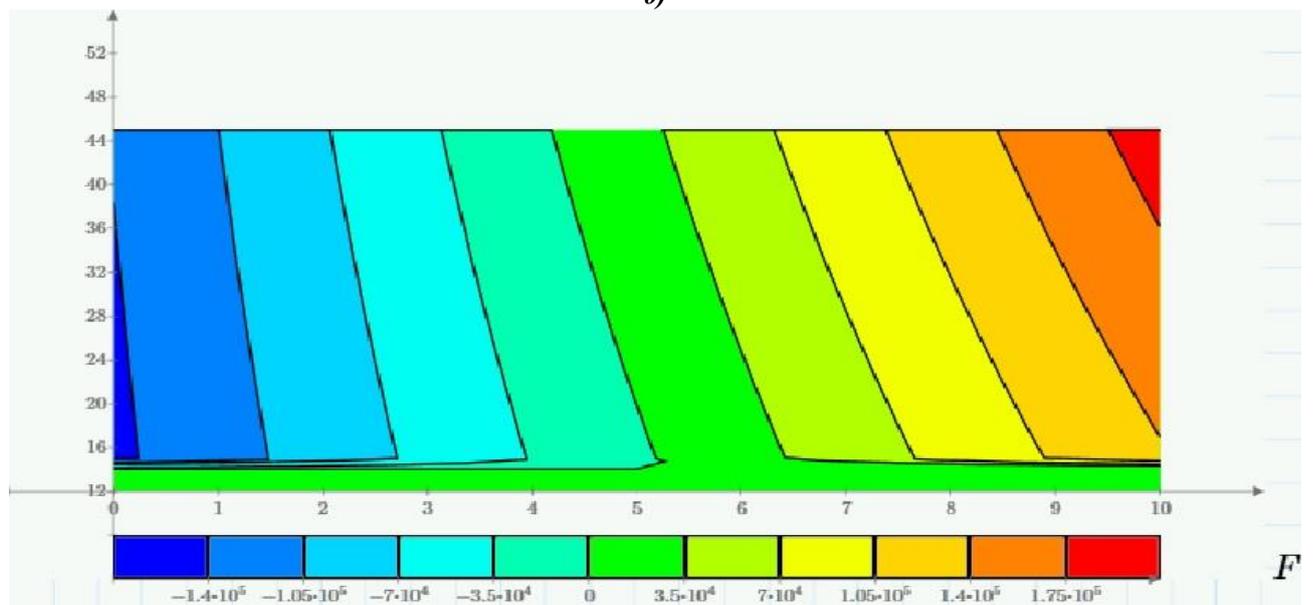
На рисунке 4 представлены контурные графики зависимости сил деформирования от шага резьбы и диаметра заготовки (рис. 4, а), от диаметра заготовки и ролика (рис. 4, б), шага и угла профиля резьбы (рис. 3, в), полученные в результате расчета по приведенным выше моделям.



а)



б)



в)

Рисунок 4 – Графики зависимости сил деформирования от шага резьбы и диаметра заготовки (а), диаметра заготовки и ролика (б), шага и угла профиля резьбы (в)

Из результатов моделирования можно сделать вывод о том, что наибольшее влияние на силу деформирования оказывают шаг и угол профиля резьбы. Полученные зависимости могут быть использованы при проектировании технологических процессов режущо-деформирующей обработки трапецеидальных резьб.

**Исследования проводятся при поддержке гранта РФФИ и администрации Орловской области 12-01-97508.**

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Афонин, А.Н. Схемы деформирования при режущо-деформирующей обработке резьб [Текст] / А.Н. Афонин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2012, № 2-2(292). - С. 3-8.
2. Железков, О.С., Особенности горячей накатки резьбы на путевых шурупах тремя роликами [Текст] / О.С. Железков, С.О. Железков, В.В. Семашко // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением*. 2011. № 3. - С. 31-33.
3. Зуйкин, Р.А. Влияние припуска под накатывание при режущо-деформирующей обработке трапецеидальных резьб на эквивалентные деформации и силы деформирования [Текст] / Р.А. Зуйкин, А.Н. Афонин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2012. № 3-2. С. 43-48.
4. Киричек, А.В. Резьбонакатывание. Библиотека технолога [Текст] / А.В. Киричек, А.Н. Афонин. - М.: Машиностроение, 2009. – 312 с.
5. Киричек, А.В. Исследование напряженно деформированного состояния резьбонакатного инструмента и заготовки методом конечных элементов [текст] / А.В. Киричек, А.Н. Афонин // *СТИН*, 2007, №7. – С. 21-25.
6. Таурит, Г.Э. Прогрессивные процессы резьбоформирования [Текст] / Г.Э. Таурит, Е.С. Пуховский, С.С. Добрянский. - Киев: Техніка, 1975. - 240 с.

### **Зуйкин Руслан Александрович**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс», г.Орёл  
Аспирант кафедры «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»  
Тел. (4862)54-15-03  
E-mail: [Zuikin1@mail.ru](mailto:Zuikin1@mail.ru)

### **Афонин Андрей Николаевич**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс», г.Орёл  
Доктор технических наук, доцент.  
Профессор кафедры «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»  
Тел. (4862)54-15-03  
E-mail: [af@au.ru](mailto:af@au.ru)

R.A. ZUYKIN, A.N. AFONIN

## **INFLUENCE DESIGN AND THE TECHNOLOGICAL DATA AT A CUTTING-FORMING HANDLIN OF PROCESSING OF TRAPEZOIDAL CARVINGS ON EQUIVALENT DEFORMATIONS AND DEFORMATION FORCES**

*The technique of modeling of cutting-forming handling of threads is described by a method of final elements. Nature of influence of a step and corner of a carving, diameter of the tool and preparation, allowance form under a rolling is revealed cutting-forming handling of trapezoidal carvings on equivalent deformations and deformation forces. Recommendations about a choice of the scheme of an allowance are made.*

**Keywords:** thread, rolling, cutting-forming handling, finite element method

**BIBLIOGRAPHY**

1. Afonin A.N. Schemes of forming at a forming-cutting Handling of threads // Fundamental and application problems of technics and technology, 2012, № 2-2(292). - Pp. 3-8.
2. Zheleskov O.S., Zheleskov S.O., Semashko V.V. Features hot rolling thread of the travel screws three rollers // Forging and stamping production. Processing of metals by pressure, 2011. № 3. - Pp. 31-33
3. Zuykin R.A., Afonin A.N. Influence of the allowance under rolling with cutting-deformed processing keystone of threads to the equivalent of deformation and strength of deformation // Fundamental and application problems of technics and technology, 2012, № 3-2. - Pp. 43-48.
4. Kirichek A.V., Afonin A.N. Thread rolling. Library of the technologist. - Moscow: Mashinostroyeniye, 2009. - 312 p.
5. Kirichek A.V., Afonin A.N. Investigation of the stress strain state of thread rolling tool and workpiece of the finite element method // STIN, 2007, №7. – Pp. 21-25.
6. Taurit G.E., Puhovskiy E.S., Dobryanskiy S.S. Progressive processes thread forming. – Kiev: Technika, 1975. – 240 p.

**Zuykin Ruslan Aleksandrovich**

State University-Education-Science-Production Complex,  
Orel

Post-graduate student of faculty «Mechanical engineering  
and Design-technology computer science»

Phone. (4862) 54-15-03

E-mail: [Zuikin1@mail.ru](mailto:Zuikin1@mail.ru)

**Afonin Andrey Nikolayevich**

State University-Education-Science-Production Complex,  
Orel

Doctor technical sciences, docent.

Professor of faculty «Mechanical engineering and Design-  
technology computer science»

Phone. (4862) 54-15-03

E-mail: [af@au.ru](mailto:af@au.ru)

## ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ ТРИБОТЕХНОЛОГИЙ

*В статье рассматривается метод повышения износостойкости деталей машин на основе комбинированной антифрикционной обработки поверхностей с нанесением покрытий.*

**Ключевые слова:** повышение износостойкости, триботехнические характеристики, комбинированная антифрикционная обработка.

Основным показателем, характеризующим конкурентоспособность продукции машиностроения, является качество. Одно из направлений повышения надежности машин и механизмов, а, следовательно, и их качества в целом, является повышение износостойкости соединения деталей. Весьма важно дальнейшее исследование технологического обеспечения износостойкости соединений типа подшипников скольжения. Этого можно достичь, используя комбинированную технологию обработки, одной из составных частей которой является модификация поверхности нанесением твёрдых износостойких материалов или мягких прирабочных плёнок.

Существует достаточно много технологических методов обеспечения и повышения триботехнических характеристик соединений деталей машин [2]:

- оптимизация режимов лезвийной обработки;
- ППД роликами и шариками;
- алмазное выглаживание;
- электромеханическая обработка (ЭМО);
- плазменное напыление и др.

Коэффициент повышения износостойкости для указанных методов колеблется в широких пределах – от 1,2 до 16. Наиболее высок этот показатель при использовании технологий плазменного напыления в условиях повышенных температур (коэффициент повышения износостойкости находится в пределах от 4 до 16). Данная технология применима в ограниченных условиях из-за своей специфики. В частности, она требует операции оплавления нанесенного покрытия в специальных ваннах с высокой температурой, да и сам процесс плазменного напыления осуществляется при высокой температуре, что вызывает коробление детали и необходимость дополнительной обработки для обеспечения требуемой точности. Ряд эффективных методов требует подвода дополнительной энергии и также вызывает нагрев детали. При электромеханической обработке (ЭМО) нагреву подвергаются только поверхностные слои обрабатываемых заготовок, что даёт положительный эффект в виде их возможной закалки. Одним из прогрессивных и наиболее эффективных методов здесь является метод нанесения твёрдых износостойких покрытий в вакууме катодно-ионной бомбардировкой (КИБ).

Наряду с отдельным применением указанных методов повышения износостойкости, возможна их комбинация, что является основой разработки новых комбинированных методов антифрикционной обработки.

В качестве объекта исследований выбраны соединения типа подшипников скольжения, которые находят широкое применение в высокоточных узлах машин и механизмов, в том числе в технологической оснастке (передние и задние направляющие борштанг расточных станков и др.), работающей в динамическом режиме. Модели валов изготавливались из стали 45 твёрдостью HRC<sub>3</sub>, 48...50, а вкладышей – из антифрикционного чугуна АСЧ-1 или бронзы БрОЦС 5-5-5. Рабочие поверхности вкладышей обрабатывались тонким растачиванием.

Исследуемая модель соединения (рис.1) включает следующие элементы:

- 1 – модель вала (охватываемый трибоэлемент);
- 2 – модель вкладыша (охватывающий трибоэлемент);
- 3 – конические подшипники качения;

- 4 – материал приработочной плёнки на поверхности модели вала;
- 5 – смазка;
- 6 – окружающая среда;
- 7 – мнемоническая оболочка системы.

Приработка соединений осуществлялась со скоростью  $V_{пр}$  при погонной нагрузке на соединение  $P_{пр}$  и её динамической составляющей  $\pm \Delta P$ .

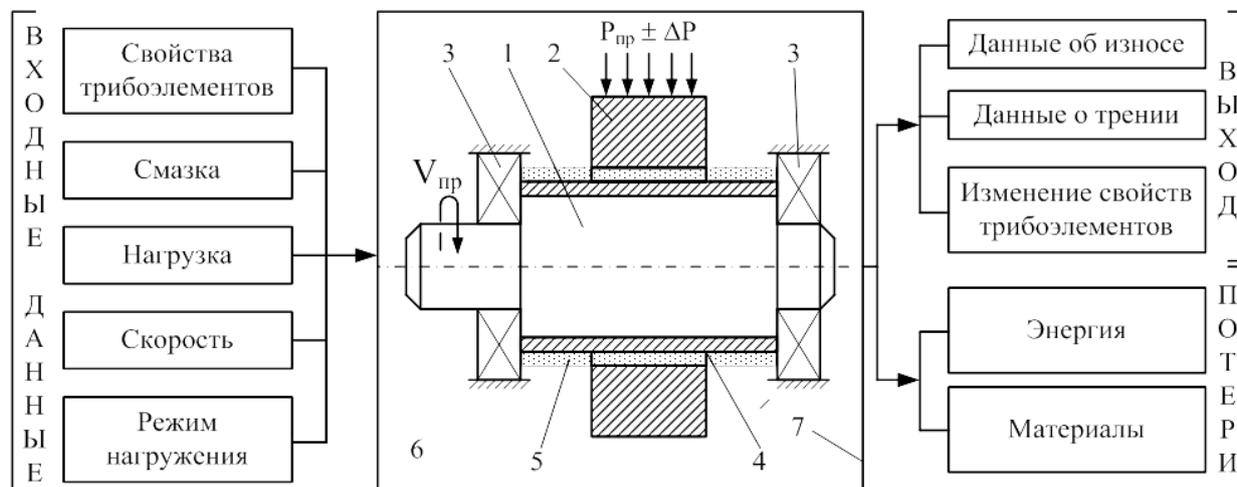


Рисунок 1- Исследуемая модель соединения

Для обработки поверхности вала как более твёрдого элемента, во многом определяющего триботехнические свойства соединения, предлагается комбинированная антифрикционная обработка, маршрутная технология которой состоит из трёх подсистем:

1 – предварительная чистовая обработка (обеспечивает требуемую точность и параметры качества поверхностного слоя (КПС), необходимые для дальнейшей качественной модификации поверхности мягкими приработочными материалами);

2 – модификация поверхности путём нанесения мягкой приработочной медесодержащей плёнки одним из известных способов (фрикционное, химическое и др.);

3 – финишная обработка поверхностно-пластическим деформированием (ППД) (формирует микрорельеф, например, исключая процесс микрорезания при трении, и соответствующие физико-механические свойства).

Логическую модель такой комбинированной антифрикционной обработки в общем случае можно представить в следующем виде:

$$TC = 1 \wedge 2 \wedge 3 \in (O_{11} \vee O_{12} \vee \dots \vee O_{1n}) \wedge (O_{21} \vee O_{22} \vee \dots \vee O_{2n}) \wedge (O_{m1} \vee O_{m2} \vee \dots \vee O_{mn}). \quad (1)$$

В уравнении (1) предполагается, что в общем случае технологическая система (ТС) может иметь "m" подсистем, каждая из которых может быть реализована "n" способами обработки.

На рисунке 2 указаны:  $\bar{K}_0 = \bar{K}_1$  – исходный вектор КПС, полученный на предыдущей стадии технологического процесса;  $\bar{R}_{11}, \dots, \bar{R}_{mm}$  – векторы параметров качества поверхностного слоя на промежуточных этапах технологического процесса (ТП) обработки;  $\bar{Y}_{11}, \dots, \bar{Y}_{mm}$  – векторы условий обработки на каждой из возможных операций ТП;  $\bar{R}_{TC}$  – выходной вектор параметров КПС в данной ТС.

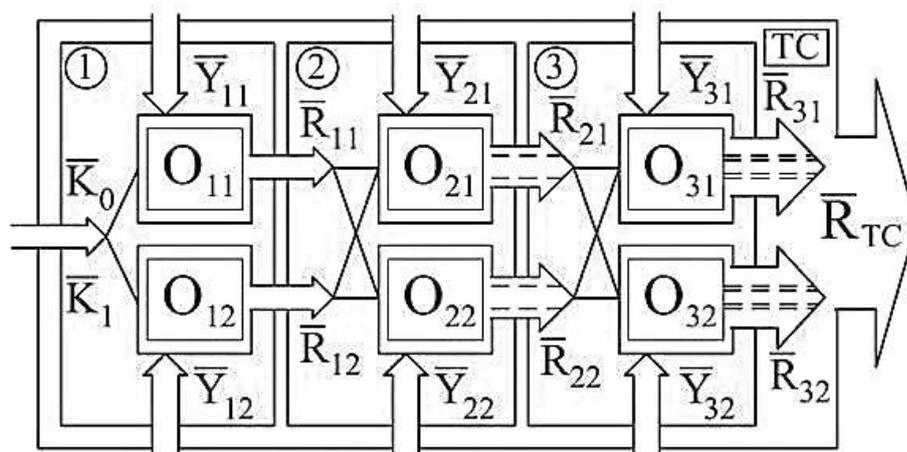


Рисунок 2 - Структура комбинированной антифрикционной обработки

Исследовалась триботехнологическая система, включающая следующие методы и режимы для подсистем:

1 – чистовое точение композитом 10 (ЧТК10) – скорость  $V_T$  [м/мин], подача  $S$  [мм/об] и глубина  $t$  [мм] резания, жёсткость  $TC$   $j$  [кН/мм];

2 – модификация поверхности (МП) (фрикционное латунирование (3,0) и химическое меднение (1,5));

3– алмазное выглаживание (АВ) – сила  $Q_{AB}$  [Н], подача  $S_{AB}$  [мм/об] и скорость  $V_{AB}$  [м/мин] при радиусе индентора  $r = 3,5$  мм;

4 – приработка сопряжения (ПР) – скорость  $V_{пр}$  [м/мин] и погонная нагрузка  $P$  [Н/мм] приработки,  $\Delta P/P$  – относительная флуктуация нагрузки в динамике.

Кодирование факторов и область факторного пространства исследуемой триботехнологической системы, образованной присоединением к подсистемам 1...3  $TC$  (рис. 2) подсистемы приработки 4, даны в таблице 1. Качественные факторы закодированы следующим образом:

а) материал мягкой прирабочной пленки на поверхности вала  $M_{п}$  (фактор  $X_5$ ), полученный методами:

- фрикционного латунирования – 3.0;
- химического меднения – 1.5;

б) материал вкладыша  $M_{вкл}$  (фактор  $X_9$ ):

- бронза – ОЦС 5-5-5 – 5.0;
- антифрикционный чугун – АСЧ 1 – 2.0.

Таблица 1 - Кодирование факторов и области факторного пространства триботехнологической системы

Код фактора	Факторы триботехнологической системы											
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$	$X_{12}$
-	$V_T$	$S_T$	$t$	$j$	$M_{п}$	$Q_{AB}$	$S_{AB}$	$V_{AB}$	$M_{вкл}$	$V_{пр}$	$P_{пр}$	$\Delta P/P$
-	65	0,05	0,1	2,5	1,5	100	0,075	65	2	10	30	0,15
+	200	0,15	0,25	16,2	3	300	0,15	100	5	50	50	0,25
Подсистема	1			2		3			4			

По результатам обработки экспериментальных данных на ЭВМ строились физико-статистические модели Кобба-Дугласа формирования исследуемых параметров  $Y_i$  от факторов  $X_k$  триботехнологической системы, имеющие вид:

$$Y_i = \beta_0 \cdot X_1^{\beta_1} \cdot X_2^{\beta_2} \cdot \dots \cdot X_k^{\beta_k}, \quad (2)$$

где  $\beta_0, \beta_i$  – математические ожидания случайных коэффициентов модели. Обработка результатов экспериментальных данных дала возможность построить адекватные физико-статистические имитационные модели:

$$Y_i = b_0 K_1 K_2 V_T^{b_1} S_T^{b_2} t^{b_3} j^{b_4} Q_{AB}^{b_6} S_{AB}^{b_7} V_{AB}^{b_8} V_{пр}^{b_{10}} P_{пр}^{b_{12}} \Delta_p^{b_{13}}, \quad (3)$$

где  $Y_i$  –  $i$ -ая триботехническая характеристика;

$K_1, K_2$  – коэффициенты, учитывающие вид прирабочной плёнки и материал вкладыша соответственно;

$b_k$  – коэффициенты модели Кобба-Дугласа.

В качестве исследуемых параметров  $Y_i$  рассматривались параметры шероховатости, волнистости и отклонений от круглости, а также триботехнические характеристики:

-  $f_1, f_0$  – коэффициенты трения в начале и конце приработки;

-  $h_{01}, h_{02}$  [мкм] – величины начального износа поверхностей вала и вкладыша соответственно;

-  $I_1, I_2$  – интенсивности изнашивания поверхностей валов и вкладышей (табл. 2).

Параметры моделей (3) и расчётные значения критерия Фишера  $F_{расч}$  даны в таблице 2. Сравнение  $F_{расч}$  с табличным значением при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  ( $F_{табл} = 6,59$ ) свидетельствует об адекватности моделей.

Таблица 2 - Параметры имитационных моделей

Ко-эфф	$b_0$	$K_1$		$K_2$		$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_6$	$b_7$	$b_8$	$b_{10}$	$b_{11}$	$b_{12}$	$F_{расч}$
		ЛФ	МХ	Бр	АСЧ											
$f_1$	2,0	1,31	1,10	1,11	1,05	-0,06	0,04	-0,05	0,02	-0,07	0,47	-0,05	-0,32	-0,09	–	1,3
$f_0$	2,82	1,64	1,20	0,92	0,96	0,03	0,20	0,19	0,11	-0,14	0,28	-0,03	-0,35	0,03	0,62	0,5
$h_{01}$	3,74	1,20	1,07	1,23	1,09	0,31	0,15	0,02	0,04	-0,38	0,32	0,68	0,05	-0,74	-0,19	5,6
$h_{02}$	8,08	1,10	1,04	1,28	1,11	0,07	0,27	0,09	-0,07	-0,16	-0,04	0,05	0,04	0,10	-0,40	4,7
$I_1 \times 10^{-12}$	316	1,77	1,23	0,87	0,94	0,08	0,22	0,21	0,13	-0,17	0,43	-0,05	-0,43	-0,10	0,76	2,8
$I_2 \times 10^{-11}$	147	1,80	1,24	0,94	0,97	0,08	0,22	0,14	0,14	-0,13	0,25	-0,06	-0,4	0,02	0,64	2,1

В работе [1] предложена комбинированная обработка на основе использования лезвийной обработки, нанесения покрытия методом КИБ и обработки ППД. Её сущность заключается в нанесении на предварительно подготовленную поверхность твёрдого нитридсодержащего покрытия с его последующим алмазным выглаживанием, целью которого является формирование параметров микропрофиля, удовлетворяющих условию пластического отгеснения материала сопряжённого контртела в процессе трения. Схема такой обработки включает четыре ступени:

1. Чистовое точение или шлифование.
2. Предварительное алмазное выглаживание.
3. Нанесение твердого износостойкого покрытия методом катодно-ионной бомбардировки.
4. Финишное алмазное выглаживание.

По сравнению с этим методом предлагаемая технология имеет на одну операцию алмазного выглаживания меньше и не использует дорогостоящих и требующих особого обслуживания установок, таких, как "Пуск-83" на операции 3.

Предлагаемая технология КАФО имеет следующие преимущества:

1. Включает вместо четырёх операций – три, в ней отсутствует промежуточная операция ППД (АВ), которая в альтернативном варианте служила для подготовки поверхностей под нанесение твёрдых нитридсодержащих покрытий методом КИБ.

2. Не используется дорогостоящее специальное оборудование, которое требует нали-

чия отдельных площадей, специального обслуживания и обслуживающего персонала.

3. Не требуется специальной обработки и подготовки поверхности под нанесение покрытия, а также защиты других поверхностей, на которые покрытия наноситься не должно.

4. Деталь при обработке не подвергается воздействию повышенных температур, что гарантирует отсутствие коробления.

5. Отсутствуют ограничения на геометрические размеры обрабатываемой детали, которые в альтернативном варианте минимизируются объёмом рабочей камеры установки для катодно-ионной бомбардировки.

6. Технологическое обеспечение параметров КПС деталей и триботехнических характеристик соединений типа подшипников скольжения возможно в более широких пределах.

7. Для реализации процесса не требуется наличия операторов высокой квалификации.

Статья подготовлена по материалам доклада на VI Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моргаленко Т. А. Технологическое управление триботехническими характеристиками соединений типа подшипников скольжения, работающих в условиях динамических нагрузок, на основе использования износостойких покрытий. / Дисс. ... канд. техн. наук. – Брянск, 2003. – 201 с.;

2. Улашкин А. П. Выбор отделочно-упрочняющих методов обработки (для повышения износостойкости деталей машин). – Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 1998. – 103 с.

**Карасева Анастасия Сергеевна**

магистрант

Брянский государственный технический университет

Тел. +7 961 000 25 79

E-mail: [anastasy2009@gmail.com](mailto:anastasy2009@gmail.com)

---

A. S. KARASEVA

### INCREASE THE WEAR RESISTANCE OF THE FRICTION SURFACES SLIDING MACHINE PARTS ON THE BASIS OF MODERN TRIBOTEHNOLOGY

*Experience of development method of increasing the durability of machine parts based on the combined treatment of anti-friction surfaces coated.*

**Keywords:** *increase the wear resistance, tribological characteristics, combined anti-friction treatment.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Morgalenko TA Process Control tribological characteristics of the compounds of the bearings operating under dynamic loads, based on the use of wear-resistant coatings. / Diss. ... Candidate. tech. Science. - Bryansk, 2003. - 201 p.;

2. Ulashkin AP selection finishing and hardening treatment methods (for of raising wear resistance machines). - Khabarovsk: Izd Khabar. State. tech. University Press, 1998. - 103 p.

**Karaseva Anastasya Sergeevna**

Magistrant of Bryansk State Technical University

Phone:+7 961 000 25 79

E-mail: [anastasy2009@gmail.com](mailto:anastasy2009@gmail.com)

УДК 621.787.6

А.В. КИРИЧЕК, Д.Л. СОЛОВЬЕВ, Д.Е. ТАРАСОВ

## **УСТРОЙСТВА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ УПРОЧНЕНИЯ ВОЛНОЙ ДЕФОРМАЦИИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

*В статье рассмотрены устройства для реализации процесса статико-импульсного (волнового) упрочнения сложнопрофильных поверхностей тяжело нагруженных резьб и зубчатых колес.*

**Ключевые слова:** *контактная усталость, статико-импульсная обработка, сложнопрофильные поверхности, тяжело нагруженные резьбы и зубчатые колеса.*

При работе тяжело нагруженных машин и механизмов эксплуатационный ресурс напрямую зависит от долговечности ответственных деталей, входящих в их конструкцию. Яркими примерами служат: элементы зубчатых, червячных, гипоидных, винтовых, цепных и глобоидальных передач, шлицевые соединения, направляющие, и т.д. Типичной причиной выхода их из строя является контактная усталость.

Контактная усталость – процесс накопления повреждений и развития разрушения поверхностных слоев материала под действием переменных контактных напряжений, вызывающих образование ямок выкрашивания (питтинг) или трещин и снижение долговечности [1, 2].

Создание технологическими приемами поверхностного слоя, максимально повышающего эксплуатационные свойства деталей, является важной производственной задачей. Для ее решения эффективно применяются методы упрочнения поверхностным пластическим деформированием (ППД). Упрочнением ППД может быть получен наклепанный поверхностный слой твердостью до 6500 МПа и сжимающими остаточными напряжениями, благоприятно влияющими при действии на деталь циклических нагрузок. Наряду с этим отделочно-упрочняющие способы ППД, обеспечивающие в очаге деформации давление менее  $3\sigma_T$  (где  $\sigma_T$  – предел текучести обрабатываемого металла) [3], позволяют улучшить микрогеометрию деталей, а упрочняющие (давление в очаге деформации более  $3\sigma_T$ ) – создавать глубину упрочненного поверхностного слоя до 3...5 мм.

Важно, что эффективность работы упрочненного поверхностного слоя часто связана (особенно при действии на него циклических нагрузок) с его толщиной. Однако, способы ППД, создающие большую глубину упрочнения (чеканка, обкатывание с большими силами) не достаточно развиты и мало применяются на практике. Это связано с тем что процесс создания больших давлений в очаге деформации обычно связан с большими энергетическими затратами и сложностью применяемого технологического оборудования.

Разработан способ статико-импульсной обработки (СИО) ППД, заключающийся в периодическом импульсном воздействии на нагружаемую поверхность бойком через статически нагруженный волновод [4], который позволяет более точно регулировать эпюры микротвердости и остаточных напряжений на значительной глубине упрочненного поверхностного слоя. Появляется возможность более рационально расходовать энергию удара (достигающую 300 Дж) при упругопластическом нагружении, повысить КПД процесса и соответственно, расширить возможности упрочнения ППД.

Данные многочисленных исследований свидетельствуют о том, что СИО может быть рекомендовано в первую очередь для повышения эксплуатационных свойств тяжело нагруженных деталей машин, разрушение поверхностного слоя которых происходит вследствие циклических нагрузок.

Однако, практическое использование данного технологического способа при упрочнении сложнопрофильных поверхностей деталей, к которым можно отнести крупные тяжело нагруженные резьбы и зубчатые колеса, ограничено, по причине сложности подвода воздействующей энергии к очагу деформации.

Обозначенная проблема решается за счет использования конструкторских разработок [5, 6], позволяющих реализовать процесс упрочнения волной деформации сложнопрофильных поверхностей.

Для импульсного воздействия на крупные резьбы валов большого диаметра предлагается устройство, которое может монтироваться на токарных, шлифовальных и фрезерных станках [6]. При упрочнении резьбовой поверхности заготовки вала 1 сообщают вращательное движение  $V_3$ , а инструментам 2 и 3 – независимое принудительное вращательное движение  $V_{И}$ , движение продольной подачи  $S_{ПР}$ , кинематически связанное с вращением заготовки и равное шагу упрочняемой резьбы, при этом инструменты прижимают к заготовке со статическим усилием  $P_{СТ}$  и накладывают ударную импульсную нагрузку  $P_{ИМ}$  (рис. 1).

Предлагаемое устройство содержит не менее двух инструментов 2 и 3 в виде дисков с деформирующими элементами 4 и 5, выполненными в виде витков стальных винтовых пружин 6 и 7, свернутых в кольца. Кольца пружин 6 и 7 установлены с натягом на периферийной поверхности дисков 8 и 9 [7].

Инструмент 2 предназначен для предварительного упрочнения и увеличения твердости на значительную глубину, а инструмент 3 – для окончательной обработки упрочнением и повышения параметра шероховатости обрабатываемой поверхности.

На инструментах 2 и 3 размещены витки 4 и 5 с рабочей частью 4р и 5р, выполненной по форме резьбовой канавки обрабатываемой резьбы, и прямолинейной крепежной частью 4к и 5к. Рабочая часть витков предназначена для непосредственного контакта и деформирующего воздействия на обрабатываемую резьбовую поверхность, а крепежной частью виток устанавливается и крепится на ступице инструментов.

Пружина 6 инструмента 2 (рис. 1, б), служащего для предварительного упрочнения, выполнена из стальной пружинящей ленты, изготовленной, например, по ГОСТ 21996-76. На периферийной поверхности ступицы инструмента 2 выполнены продольные пазы по размерам крепежной части 4к, в которых жестко закреплены витки 4 пружины 6, свернутой в кольцо. Жесткое крепление витков 4 в продольных пазах инструмента 2 может быть осуществлено, например, с помощью планок 10 и болтов 11, а также сваркой, пайкой, чеканкой и др. известными способами. Размеры рабочей части 4р витка 4 (например, толщина зуба  $t_{2и}$  по среднему диаметру инструмента, поз.2 и др.) больше размеров впадины упрочняемой резьбы ( $t_3$ ) на величину натяга  $h$ , благодаря которому реализуется упрочнение, т.е.  $t_{2и} - t_3 = 2h$ .

Пружина 7 инструмента 3 (рис. 1, г) для окончательной обработки выполнена из стальной пружинящей проволоки круглого сечения по ГОСТ 9389-75. В конструкции деформирующих витков 5 можно различить несколько частей, выполняющих различные функции: рабочая 5р и крепежная 5к части, между которыми находятся демпфирующие 5д части. Рабочая часть 5р витков 5 пружины 7 выполнена по форме резьбовой канавки обрабатываемой резьбовой поверхности заготовки 1. Размеры рабочей части витка (например, толщина зуба  $t_{3и}$  по среднему диаметру инструмента, поз.3) больше размеров впадины  $t_3$  упрочняемой резьбы на величину натяга  $h$ , благодаря которому реализуется упрочнение, т.е.  $t_{3и} - t_3 = 2h$ .

Крепежная часть 5к витков 5 выполнена прямолинейной и предназначена для крепления витка к периферии диска 9. Эта часть может иметь не только прямолинейную форму, но и форму периферии диска, на которую она крепится.

Между рабочей и крепежной частями витков 5 находятся демпфирующие 5д части витка, благодаря которым устанавливается натяг  $h$ .



витков при их входе в контакт с заготовкой, изготовлена из резины и закреплена на ступице 14 посредством вулканизации, которая позволяет также закрепить кольцо 12 на ступице 14.

Высота ступицы 14 и кольца 12 диктуется длиной крепежной части  $5_K$  деформирующего витка 5, которая зависит от шага упрочняемой резьбы и должна быть не менее длины этой части.

Вершины витков 5 связаны друг с другом кольцом 15, жестко закрепленным на каждой вершине витка. Назначение кольца 15 диктуется увеличением жесткости крепления витков 5 с целью повышения эффективности упрочнения поверхностного слоя и выглаживания микронеровностей.

В качестве механизма статического и импульсного нагружения инструментов применяется гидравлический генератор импульсов (ГГИ) [8, 9].

Деформирующие инструменты 2 и 3 установлены на общем валу 16 на расстоянии, кратном шагу упрочняемой резьбы  $t$ , и получают независимое принудительное вращательное движение  $V_{И}$  от индивидуального двигателя.

Волновод 17 гидравлического генератора импульсов свободным концом соединен через подшипник 18 с валом 16, на котором жестко закреплены деформирующие инструменты 2 и 3. Статическое нагружение  $P_{ст}$  инструментов осуществляется посредством гидравлического генератора импульсов, и величина статической силы деформирования выбирается наибольшей из обеспечивающих упругие контактные деформации обрабатываемого материала.

Импульсное нагружение  $P_{им}$  осуществляется посредством удара бойка 19 гидравлического генератора импульсов по торцу волновода 17, на котором смонтированы инструменты 2 и 3.

При действии на инструмент только статической нагрузки  $P_{ст}$  внедрение его в обрабатываемую поверхность происходит на меньшую величину и след инструмента на обрабатываемой поверхности имеет минимальные размеры, при импульсной нагрузке  $P_{им}$  внедрение инструмента в обрабатываемую поверхность происходит на большую величину и след инструмента на обрабатываемой поверхности имеет максимальные размеры.

Инструменты с деформирующими элементами в виде витков кольцевой пружины вращаются с высокой скоростью  $V_{И}$  и перемещаются в продольном направлении с подачей  $S_{пр}$ , равной шагу упрочняемой резьбы, деформирующие витки 4 и 5 при этом наносят на поверхности заготовки многочисленные удары, пластически деформируя резьбовую поверхность, и мгновенно отскакивают от нее. Помимо удара деформирующие витки 4 и 5 за все время контакта производят также и выглаживающее действие.

Выглаживающе-ударную обработку предлагаемым инструментом применяют при изготовлении резьбы в заготовках из цветных металлов и сплавов, чугуна и стали твердостью до HRC 58...64.

Деформирующие элементы инструмента, т.е. витки пружины изготавливают из сталей: легированных ШХ15, ХВГ, Х12М, 9Х, 5ХНМ, 60С2, углеродистых инструментальных У10А, У12А, быстрорежущих Р6М5, Р9. Твердость рабочей поверхности витков из сталей HRC 62...65. Параметр шероховатости рабочего профиля витков пружины  $Ra = 0,32$  мкм.

Условия обработки, такие как твердость поверхностного слоя, глубина наклепа и шероховатость поверхности, зависят от силы удара и числа ударов, приходящихся на  $1 \text{ мм}^2$  поверхности. Эти параметры, в свою очередь, зависят от окружной скорости инструментов, натяга  $h$ , размера витков, их числа в инструментах, частоты вращения и числа проходов.

Для устранения погрешностей сборки деформирующих витков новые инструменты шлифуют по профилю рабочей поверхности.

При неправильно выбранном режиме может возникнуть перенаклеп поверхности с растягивающими остаточными напряжениями в поверхностном слое, которые ведут к трещинам и отслаиванию поверхностного слоя.

Для получения высокого качества поверхности необходимо соблюдать следующие условия обработки:

- обеспечение постоянной величины натяга  $h$ ;
- допусковое радиальное биение витков кольцевых пружин, отклонения формы и радиальное биение заготовки не должны превышать  $0,1...0,18$  мм.

Обработка с большими натягами приводит к увеличению шероховатости поверхности, но при этом несколько увеличивается эффект упрочнения. Для получения поверхности заготовки высокого качества перед обработкой заготовки очищают от следов коррозии и обезжиривают. Обработку ведут с использованием смазочно-охлаждающего технологического средства. Деформирующие витки смазывают смесью индустриального масла (60 %) и керосина (40 %), поверхность заготовки - керосином.

Оставлять припуск под обработку не следует, так как изменение размера весьма незначительно (2...5 мкм). После обработки этим инструментом точность заготовок соответствует 7...9-му квалитетам.

Для упрочнения ППД и калибрования рабочей поверхности зубчатых колес с использованием постоянной статической  $R_{ст}$  и периодической импульсной нагрузки  $R_{им}$  предлагается устройство, которое содержит три накатника, выполненных в виде закаленных эталонных зубчатых колес 2, 3 и 4, расположенных под углом  $120^\circ$  один к другому и охватывающих заготовку 1 обрабатываемого зубчатого колеса (рис. 2) [5].

Зубья накатников по конструкции отличаются друг от друга. Одно эталонное зубчатое колесо-накатник, например, поз.3 (рис. 2, а) имеет индивидуальный привод вращения и является ведущим для принудительного вращения заготовки 1 и других эталонных колес 2 и 4. Этот накатник 3 имеет зубья с гладкой рабочей закаленной зубчатой поверхностью, как в традиционных конструкциях [10, 11].

Другое эталонное колесо-накатник 2 снабжено устройством 5 для статического прижатия с силой  $R_{ст}$  к заготовке 1 обрабатываемого зубчатого колеса и периодического импульсного нагружения  $R_{им}$  с помощью генератора импульсов 6 [4, 8, 9].

Наружная рабочая поверхность зубьев эталонного колеса-накатника 2 выполнена из стальной проволоки круглого сечения, отрезки 7 которой установлены вдоль зуба и закреплены на торцах зубьев эталонного колеса, при этом торцы выполнены в виде планок 8, спрофилированных по форме зуба с учетом диаметра отрезков 7 проволоки (рис. 2, в).

Наружная рабочая поверхность зубьев эталонного колеса-накатника 4 выполнена из стальной проволоки круглого сечения, прутки 9 которой изогнуты и спрофилированы по форме зуба, набраны в пакет, который закреплен на ступице 10, таким образом, что прутки 9 проволоки расположены поперек направления зуба (рис. 2, г). Поперечные прутки 9 в пакете скреплены с помощью точечной сварки продольными прутками 11 проволоки с целью ужесточения конструкции зубьев. Пакет из прутков 9 надевается на гладкую ступицу 10 колеса-накатника 4 и крепится на ней, например, с помощью точечной сварки.

Зубчатое колесо-накатник 2 крепится к волноводу 12, который установлен в гидроцилиндре 6 генератора импульсов [4, 8, 9] и контактирует с бойком 13. Величина статической силы  $R_{ст}$  деформирования выбирается наибольшей из обеспечивающих упругие контактные деформации обрабатываемого материала заготовки зубчатого колеса 1.

Импульсное нагружение  $R_{им}$  осуществляется посредством удара бойка 13 по торцу волновода 12, на котором закреплено эталонное колесо-накатник 2.

Предлагаемое устройство имеет возможность обкатывать зубчатые поверхности в двух режимах: в режиме постоянного нагружения  $P_{ст}$  деформирующих колес-накатников, когда не работает гидроударник, и в режиме ударно-импульсного  $P_{им}$  обкатывания.

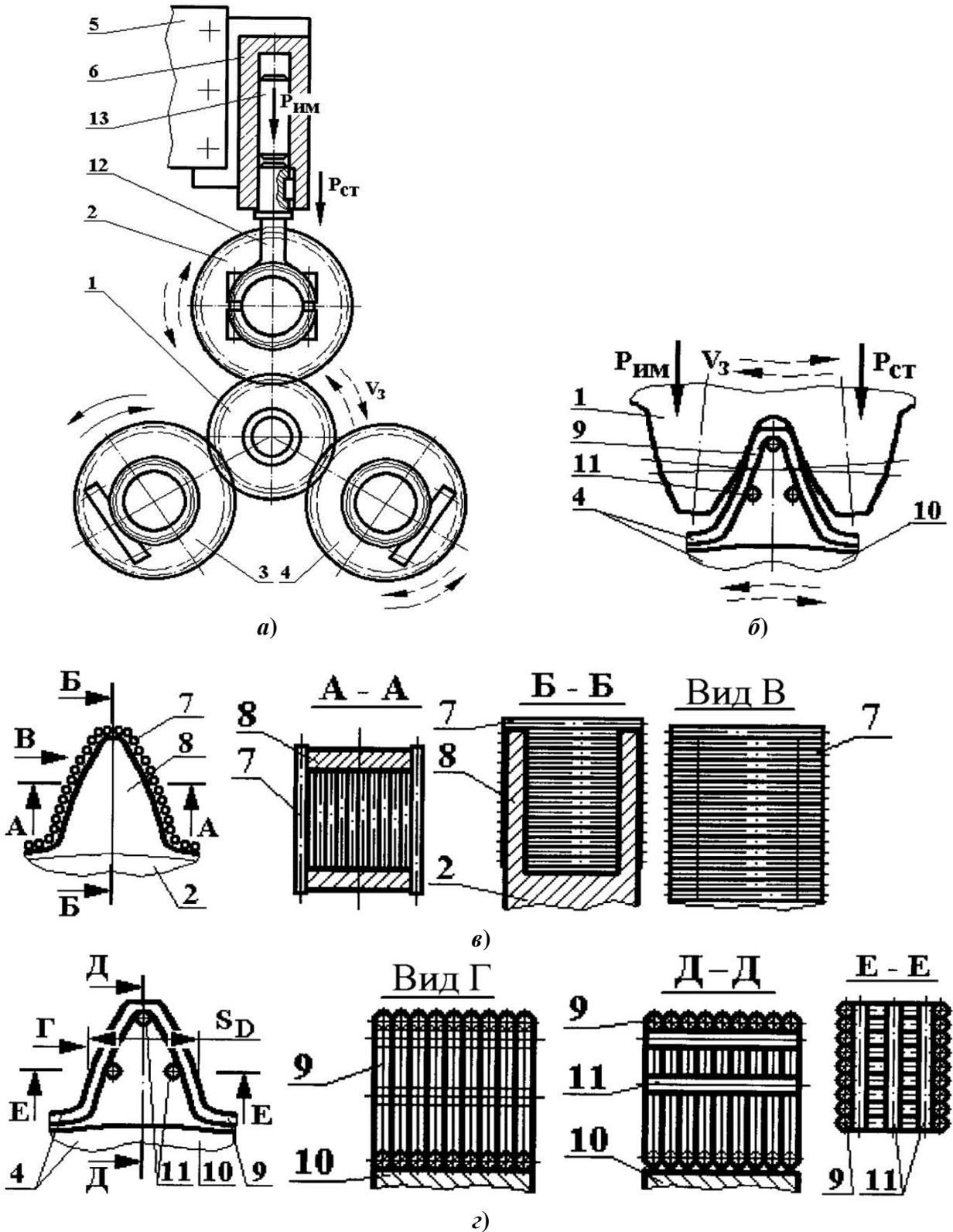


Рисунок 2 – Устройство для статико-импульсного обкатывания зубчатых колес:

а – общий вид; б – схема зубчатого зацепления заготовки с зубчатым накатником, изготовленного из прутков проволоки, расположенных поперек зуба; в – зуб эталонного зубчатого колеса-накатника, изготовленного из прутков проволоки, расположенных вдоль зуба; г – зуб эталонного зубчатого колеса-накатника, изготовленного из прутков проволоки, расположенных поперек зуба

Режим ударно-импульсного обкатывания расширяет технологические возможности приспособления и дает возможность оптимального подбора параметров упрочняющей обработки зубчатой поверхности.

Работа предлагаемого устройства заключается в следующем.

Заготовку зубчатого колеса устанавливают на эталонные колеса-накатники 3 и 4 и поджимают колесом-накатником 2. Заготовка обрабатываемого колеса получает вращательное движение  $V_3$  от колеса-накатника 3, которое принудительно вращается от индивидуального привода. Скорость вращения заготовки производится в одном и другом направлении и задают в зависимости от требуемого качества, производительности, конструктивных особенностей заготовки и оборудования. Обычно скорость составляет 30...40 м/мин.

В процессе обработки зубчатой поверхности заготовки колеса деформирующими зубчатыми накатниками, вращающимися в процессе обкатывания от ведущего колеса-накатника 3, обеспечивается постоянный гарантированный контакт накатников с обрабатываемой зубчатой поверхностью за счет нажимного колеса-накатника 2, которое передает силы  $P_{СТ}$  и  $P_{ИМ}$  от генератора импульсов. При этом деформирующие колеса-накатники 2 и 4 самоустанавливаются за счет прогибания боковых сторон зубьев и принимают форму зуба заготовки, увеличивая площадь контакта (рис. 2, б).

Сущность процесса заключается в том, что зубья колес-накатников 2 и 4 с деформирующими элементами на боковых сторонах, выполненные из прутков проволоки, изготовлены так, что толщина зуба по делительному диаметру  $S_D$  больше толщины зуба по делительному диаметру обкатываемого колеса на двойную величину натяга, принимаемого 0,1...1,0 мм.

Предлагаемое устройство с колесами-накатниками, имеющими гладкую рабочую поверхность зубьев, поз.3, упругую рабочую поверхность зубьев, изготовленную из прутков проволоки, расположенных поперек зуба, поз.4, и упругую рабочую поверхность зубьев, изготовленную из прутков проволоки, расположенных вдоль зуба, поз.2, позволяет эффективно обкатывать зубчатые поверхности, совмещая предварительный, получистовой и чистовой переходы. За счет этого сокращается машинное время обработки, увеличивается производительность, достигается более высокое качество обработки.

Ширина зубчатого венца накатников перекрывает ширину венца обрабатываемых колес; зуб накатников для компенсации бокового зазора сделан толще. По мере износа колес-накатников их несколько раз перешлифовывают.

Прутки 7 накатника 2 в качестве деформирующих элементов при обкатывании оставляют следы сглаживания шероховатостей поверхности и упрочнения поверхностного слоя металла, параллельные направлению зуба. Прутки 9 накатника 4 в качестве деформирующих элементов при обкатывании оставляют следы сглаживания шероховатостей и упрочнения поверхностного слоя металла поперек направления зуба. В процессе обкатывания накатником 3 с гладкой рабочей зубчатой поверхностью происходит калибрование, сглаживание шероховатостей и упрочнение поверхностного слоя металла по всему профилю зуба.

Работа предлагаемого устройства заключается в следующем.

В отличие от шевингования, окончательное обкатывание профиля зубьев осуществляется без снятия стружки путем пластического деформирования металла в холодном состоянии. В процессе обработки обкатыванием заготовки с предварительно обработанными зубьями оси вращения трех накатников располагают параллельно оси заготовки. Вращающийся от заготовки накатник 2 перемещается к заготовке и при достижении беззазорного зацепления начинает процесс прикатки под определенным усилием. Расстояние между осями накатника и детали постепенно уменьшается до получения требуемого размера зубьев заготовки колеса. Во время прикатывания на зубьях обрабатываемого колеса и накатника имеет место взаимное скольжение, которое вызывает на сторонах зубьев колеса сдвиг металла.

Деформирующие прутки на 2 и 4 накатниках под действием статической нагрузки  $P_{СТ}$  производят выглаживающее действие, а под действием мгновенной импульсной нагрузки  $P_{ИМ}$  – пластически деформируют обрабатываемую поверхность.

Достоинствами предлагаемого устройства являются: уменьшение погрешности предстоящей обработки; многоэлементность устройства позволяет отказаться от многопро-

ходности обработки, за счет чего достигается более высокое качество обработки за минимальное количество проходов; образование определенной макро- и микрогеометрической формы обработанной поверхности, уменьшение параметра шероховатости – сглаживание поверхности, изменение структуры материала за счет поверхностного наклепа и создание определенно напряженного состояния – все это благоприятно действует на износостойкость.

По сравнению с шевингованием, обкатывание на предлагаемом устройстве позволило увеличить производительность в 4-5 раз, уменьшить параметр шероховатости поверхности на профилях зубьев до  $Ra = 0,32$  мкм, снизить уровень звукового давления на 2-3 дБ, повысить стабильность размеров зубчатого зацепления и качество.

Для предотвращения задиров при обкатывании зубьев применяют охлаждающую жидкость, состоящую из 4 частей керосина и одной части машинного масла.

В процессе обкатывания происходит сглаживания шероховатостей - следов обработки зуба заготовки резанием и упрочнения поверхностного слоя металла по всему профилю зуба. При этом твердозакаленные, тщательно отделанные с высокой точностью зубья эталонных колес калибруют зубья заготовки по профилю и размерам. Исправление профиля и размеров зуба заготовки осуществляется в небольших пределах, главным образом за счет смятия шероховатостей исходной поверхности и выравнивания микропрофиля. Поэтому в большинстве случаев специальный припуск на калибрование не оставляется. Так, изменение толщины зуба стального колеса с модулем  $m = 2$  мм, предварительно нарезанного червячной фрезой с шероховатостью поверхности  $Ra = 2,5...5$  мкм, находится в пределах  $0,02...0,03$  мм.

Представленные конструкции устройств для упрочнения сложнопрофильных поверхностей ответственных деталей, таких как крупные тяжело нагруженные резьбы и зубчатые колеса, позволят расширить технологические возможности промышленных предприятий и повысить эксплуатационный ресурс машин и механизмов.

**Исследования выполнены в рамках Государственного задания 7.505.2011.**

**Статья подготовлена по материалам доклада на VI Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства».**

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 25.501-78 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытаний на контактную усталость. – М.: Издательство стандартов, 1979. – 94 с.
2. Р 50-64-30-87 Расчеты и испытания на контактную прочность. Методы испытаний на контактную усталость. – М.: ВНИИМАШ Госстандарта СССР, 1988. – 122 с.
3. Суслов, А.Г. Качество машин [Текст]: справочник / А.Г. Суслов. М.: Машиностроение, 1995. - Т.1. - 256 с., Т.2. - 430 с.
4. Патент РФ № 2098259. Способ статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием [Текст] / А.Г. Лазуткин, А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев. Бюлл. № 34, 1997.
5. Патент РФ № 2347639. Устройство для статико-импульсного обкатывания зубчатых колес [Текст] / Ю.С. Степанов, А.В. Киричек, Д.Е. Тарасов, Б.И. Афанасьев, В.И. Сотников, Д.С. Фомин, Ю.В. Василенко, А.И. Тиняков, Д.Л. Соловьев. Бюлл. № 6, 2009.
6. Патент РФ № 2347660. Устройство для упрочнения резьбы [Текст] / Ю.С. Степанов, А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, Д.Е. Тарасов, Б.И. Афанасьев, В.И. Сотников, Д.С. Фомин, Ю.В. Василенко, А.И. Тиняков. Бюлл. № 6, 2009.
7. Патент РФ № 2294824. Накатывающий инструмент с деформирующей пружиной [Текст] / Ю.С. Степанов, А.В. Киричек, Н.Н. Самойлов, Б.И. Афанасьев, О.П. Шакулин, М.А. Батракина, Т.В. Савостикова, Д.С. Фомин. Бюлл. №7, 2007.
8. Киричек, А.В. Статико-импульсная обработка и оснастка для ее реализации [Текст] / А.В. Киричек, А.Г. Лазуткин, Д.Л. Соловьев // СТИН, 1999. - № 6. - С.20-24.
9. Патент РФ № 2090342. Гидроударное устройство для обработки деталей поверхностным пластическим деформированием [Текст] / А.Г. Лазуткин, А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев. Бюлл. № 26, 1997.
10. Кован, В.М. Справочник технолога-машиностроителя [Текст] : в 2-х т. Т. 1 / В.М. Кован. - 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Машгиз (ГНТИМЛ), 1963.
11. Шнейдер, Ю.Г. Холодная бесштамповая обработка точных деталей давлением [Текст] / Ю.Г. Шнейдер - М: МАШГИЗ, 1960.

**Киричек Андрей Викторович**

Доктор технических наук, профессор  
Юго-Западный государственный университет, г. Курск  
Проректор по НР  
Тел.: (4712)50-48-14  
E-mail: [avk.57@ya.ru](mailto:avk.57@ya.ru)

**Соловьев Дмитрий Львович**

Муромский институт Владимирского государственного университета, г. Муром  
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизированное проектирование машин и технологических процессов»  
Тел.: (49234)77145  
E-mail: [murstin@yandex.ru](mailto:murstin@yandex.ru)

**Тарасов Дмитрий Евгеньевич**

ФГОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел  
Старший преподаватель кафедры «ТМиКТИ»  
Тел.: 8-915-502-08-42  
E-mail: [tde82@yandex.ru](mailto:tde82@yandex.ru)

---

A. V. KIRICHEK, D. L. SOLOVYEV, D. E. TARASOV

**THE DEVICE FOR REALIZATION OF HARDENING WAVE DEFORMATION OF THE COMPLEX-PROFILE SURFACES**

*In the article the device for realization of the process the static-impulse (wave) strengthening of the complex-profile surfaces of heavy threads and gears.*

**Key words:** *contact fatigue, static-pulse processing, complex-profile surface, heavy-loaded thread and gears.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. GOST 25.501-78 Calculations and tests of strength in engineering. Methods of contact fatigue testing. - Moscow: Publishing Standards, 1979. - 94.
2. R 50-64-30-87 calculations and tests on the contact strength. Methods of contact fatigue testing. - Moscow: USSR State Standard VNIINMASH, 1988. - 122.
3. Suslov, AG Quality of the machines [Text]: a guide / AG Suslov. Mashinostroyeniye, 1995. - Vol.1. - 256 p., Vol.2. - 430 p.
4. RF patent number 2,098,259. The method of static pulse processing surface plastic deformation [Text] / A. Lazutkin, AV Kirichek, DL Soloviev. Bull. Number 34, 1997.
5. RF patent number 2,347,639. A device for static and pulsed obkamyvaniya gears [Text] / JS Stepanov, AV Kirichek, DE Tarasov, BI Afanasyev, VI Sotnikov, DS Fomin, Y. Vasilenko, AI Tinyakov, DL Soloviev. Bull. Number 6, 2009.
6. RF patent number 2,347,660. A device for hardening thread [Text] / JS Stepanov, AV Kirichek, DL Soloviev, DE Tarasov, BI Afanasyev, VI Sotnikov, DS Fomin, Y. Vasilenko, AI Tinyakov. Bull. Number 6, 2009
7. RF patent number 2,294,824. Grooving tool deforms the spring [Text] / JS Stepanov, AV Kirichek, N. Samoilov, BI Afanasiev, OP Shakulin, MA Batranina, TV Savostikova, DS Fomin. Bull. Number 7, 2007.
8. Kirichek, AV Static-pulse treatment and equipment for its implementation [Text] / A. Kirichek, AG Lazutkin, DL Solovyov // Steen, 1999. - № 6. - P.20-24.
9. RF patent number 2,090,342. Hydropercussion device for machining surface plastic deformation [Text] / A. Lazutkin, AV Kirichek, DL Soloviev. Bull. Number 26, 1997.
10. Cowan, VM Reference technologist Machinist [Text] in 2 vols 1 / VM Cowan. - 2nd ed. rev. and add. - Moscow: Mashgiz (GNTIML), 1963.
11. Schneider, JG Cold besshtampovaya processing precision parts pressure [Text] / JG Schneider - M: Mashgiz, 1960.

**Kirichek Andrey Viktorovich**

Doc. Sc. tech., Prof.  
Southwest State University, Kursk  
Prorector  
Phone: (4712) 50-48-14  
E-mail: [avk.57@ya.ru](mailto:avk.57@ya.ru)

**Solovyev Dmitry Lvovich**

Doc. Sc. tech. Prof. of the department «Computer aided design of the machines and technological processes»  
Murom Institute (Branch of Vladimir State University), Murom  
Phone: (49234)77145  
e-mail: [murstin@yandex.ru](mailto:murstin@yandex.ru)

**Tarasov Dmitry Evgenievich**

Senior lecturer «Technology of mechanical engineering and design-technological computer science»  
Polikarpov Technological Institute  
FSEI HVT «State University – ESPC»  
Phone. 8-915-502-08-42  
E-mail: [tde82@yandex.ru](mailto:tde82@yandex.ru)

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ

*В статье проводится анализ результатов промышленной эксплуатации современных электрофизических методов формообразования деталей. Приводятся данные по существующим режимам обработки и качеству обрабатываемых поверхностей.*

*Намечены перспективы использования электроэрозионной обработки деталей из твердых сплавов, жаропрочных сталей и специальных трудно обрабатываемых сплавов.*

**Ключевые слова:** электроэрозионная обработка, формообразование поверхностей, производительность, шероховатость поверхности.

Электрофизические методы обработки являются универсальными и обеспечивают непрерывность процессов при одновременном формообразовании всей обрабатываемой поверхности. При этом появляется возможность обрабатывать очень сложные наружные и внутренние поверхности заготовок сложной конфигурации.

Кинематика формообразования поверхностей деталей электрофизическими методами обработки, как правило, проста, что обеспечивает точное регулирование процессов и их автоматизацию.

При сближении электрода - инструмента (ЭИ) и электрода - заготовки (ЭЗ) на расстояние в несколько микрометров (10...50 мкм) между микровыступами на Э-И и Э-З возникает электрический разряд и образуется канал проводимости, в котором от катода к аноду движется поток электронов.

К этому потоку движутся более тяжелые частицы - ионы. Электроны быстрее достигают поверхности анода. Поэтому энергия электрического разряда смещается ближе к поверхности заготовки (ЭЗ). Температура электрического разряда достигает 10000...12000 С. При такой температуре происходят мгновенное оплавление и частичное испарение элементарного объема материала заготовки. При этом время протекания разряда чрезвычайно мало. Поэтому процесс выделения энергии сопровождается явлением микровзрыва. Оплавленные частицы металла выбрасываются в окружающую среду, охлаждаются диэлектрической жидкостью и застывают в виде малых шариков (0,01...0,005 мм), образуя шлам - продукт эрозии. В результате на поверхности анода образуется сферическое углубление - лунка. Поверхность катода также подвергается частичному эрозионному разрушению. [1]

Следующий разряд произойдет в том месте, где расстояние между инструментом и заготовкой окажется минимальным. Так образуется вторая лунка на поверхности заготовки. При воздействии серии электрических импульсов с анода удаляется слой материала. Непрерывность процесса обеспечивается за счет подачи ЭИ. Постоянство межэлектродного зазора обеспечивается автоматически с помощью следящих систем.

Обработанная поверхность представляет собой совокупность лунок, глубина которых определяет шероховатость поверхности. [2]

Помимо шероховатости обработанная поверхность характеризуется следующими явлениями:

- вследствие мгновенного нагрева поверхности заготовки до температуры плавления металла и резкого охлаждения в среде диэлектрической жидкости возникают температурные напряжения, приводящие к возникновению микротрещин;
- за счет нагрева до высоких температур и возможного поглощения углерода из окружающей среды в поверхностном слое происходят структурные изменения и, с учетом быстрого охлаждения, твердость поверхностного слоя значительно повышается по сравнению с твердостью основного материала заготовки;

- под действием высокой температуры в зоне оплавления основной материал вступает в химическую реакцию с отдельными элементами материалов ЭИ и диэлектрической жидкости, что ведет к изменению химического состава поверхностного слоя.

При малой длительности импульсов (5...200 мкс) поверхности катода успевают достичь лишь малая доля ионов. Поэтому поверхность катода значительно меньше подвергается эрозионному разрушению по сравнению с поверхностью анода. Именно поэтому анодом делают заготовку (ЭЗ), а катодом - инструмент (ЭЗ). Такую полярность называют прямой. При большей длительности импульсов многие ионы успевают достичь поверхности катода, и, обладая большей энергией по сравнению с потоком электронов, вызывают интенсивную эрозию катода. В этом случае обработку осуществляют при обратной полярности: ЭИ является анодом, а ЭЗ - катодом. [3]

Точные станки снабжают оптической системой отсчета координат, выполняют с цифровой индикацией, с программным управлением, с управлением от ЭВМ. В крупных станках шкафы управления и генераторы электрических импульсов устанавливаются отдельно. Станки снабжают фильтрами рабочей жидкости, холодильниками для ее охлаждения и т.д. В настоящее время все отечественные копировально-прошивочные и вырезные станки оснащены широкодиапазонными генераторами импульсов. Широкодиапазонные генераторы вырабатывают импульсы с частотой 1...880 кГц и выходным током 16...180 А, т.е. дают возможность работать на любых режимах электроэрозионной обработки. Кроме того, они вырабатывают импульсы такой формы, при которой износ ЭИ становится минимальным.

При расчете и выборе генератора импульсов исходят из условия получения формы и мощности импульса, необходимых для обеспечения требуемых технологических показателей процесса. Черновую и чистовую обработку обычно ведут от одного и того же генератора. В настоящее время в электроэрозионных станках используют релаксационные и полупроводниковые генераторы.

Блок питания преобразует переменный ток из силовой сети в прямоугольные импульсы определенной полярности. Размер импульсов и интервал между ними задается системой управления в соответствии с выполняемым режимом обработки. Сила тока разряда пропорциональна высоте импульса. Интервал между импульсами соответствует моменту отсутствия искрового разряда, а протяженность импульса соответствует длительности искрового разряда. Обе эти величины составляют тысячные или даже миллионные доли секунды.

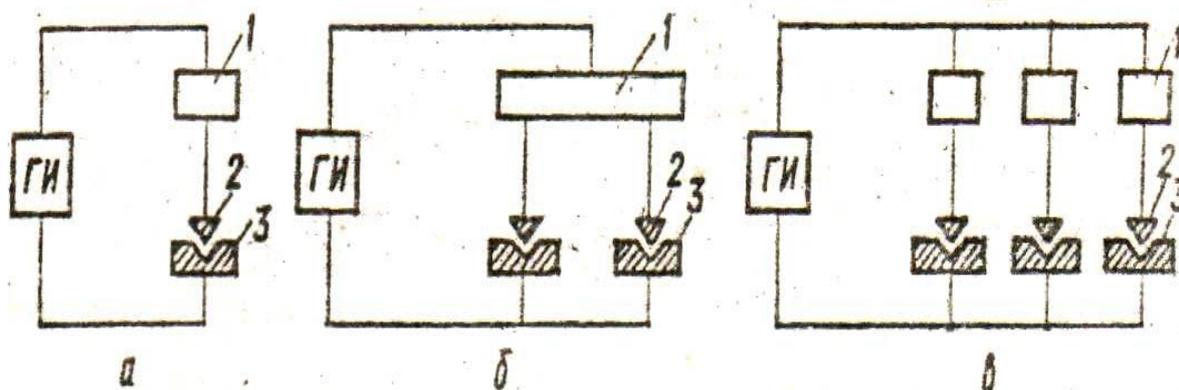
Интервал между отдельными импульсами (длительность отсутствия электрического тока) также задается системой управления. Интервал измеряется в процентном отношении собственной длительности к длительности импульса.

Вовлечение современных информационных технологий (CAD/CAM -системы) в технологический процесс позволило увеличить точность обработки - новые установки со всем комплексом современного оснащения гарантируют повторение заложенной в программе геометрии с большой степенью точности. Точность станков достигает 0,001 мм. Современные модели станков на 75% дешевле своих ранних предшественников, в то же самое время они в 3-5 раз точнее.

В зависимости от свойств рабочей среды изменяются доля полезного использования энергии импульса, его предельная мощность. Для каждого вида обработки применяют оптимальные диэлектрические среды. Так, при электроэрозионном процессе с малой энергией импульсов высокую производительность обеспечивает дистиллированная и техническая вода, керосин; при грубых режимах на электроимпульсном режиме применяют тяжелые фракции нефти (масла, дизельные топлива и др.) с высокой температурой вспышки (до 450 К).

Для повышения производительности на обрабатываемой площади может быть параллельно размещено несколько электродов-инструментов. Если они подключены к одному гене-

ратору импульсов, то такая обработка называется многоэлектродной. При подключении каждого электрода к своему источнику энергии обработку называют многоконтурной. (рис. 1) [4]



*Рисунок 1 - Изготовление полостей на крупногабаритных штампах и пресс-формах*

Под контуром понимают электрическую цепь питания с одним (рис. 1, а) или несколькими (рис. 1, б - в) электродами-инструментами, в которых можно поддерживать режим, отличный от режима других контуров. В контуре имеется сопротивление 1 для независимого регулирования режима в нем. Повышение производительности при многоконтурной обработке достигается за счет сокращения количества холостых импульсов.

При обработке углеродистых, инструментальных сталей и жаропрочных сплавов на никелевой основе используют графитовые и медные ЭИ. Для черновой ЭЭО заготовок из этих материалов применяются ЭИ из алюминиевых сплавов и чугуна, а при обработке отверстий - ЭИ из латуни. При обработке твердых сплавов и тугоплавких материалов на основе вольфрама, молибдена и ряда других материалов широко применяют ЭИ из композиционных материалов, так как при использовании графитовых ЭИ не обеспечивается высокая производительность из-за низкой стабильности электроэрозионного процесса, а ЭИ из меди имеют большой износ, достигающий десятка процентов, и высокую стоимость.

Износ ЭИ зависит от материала, из которого он изготовлен, от параметров рабочего импульса, свойств РЖ, площади обрабатываемой поверхности, а также от наличия вибрации.

На выбор материала и конструкции ЭИ существенное влияние оказывают материал заготовки, площадь обрабатываемой поверхности, сложность ее формы, требования к точности и серийности изделия.

Если увеличивать площадь обрабатываемой поверхности, то скорость съема материала металла будет возрастать, но в дальнейшем произойдет ее снижение. Это объясняется тем, что с течением времени ухудшаются условия удаления продуктов обработки из МЭП. Все большее число импульсов генератора не будет вызывать эрозии из-за накопления газов и металлических частиц в пространстве между электродами. Количество продуктов обработки зависит также от энергии импульсов, их числа и времени действия, т. е. от мощности, реализуемой в МЭП. При малой мощности количество расплавленного металла невелико, с ростом подводимой мощности оно возрастает, но при этом увеличивается и количество продуктов обработки, которые тормозят процесс съема металла. Для получения высокой производительности необходимо правильно выбрать сочетание площади обрабатываемой поверхности и мощности. Такой выбор выполняют с помощью пространственных диаграмм в координатах силы тока - площадь обработки - производительность. [5]

В процессе обработки форма и размеры электрода-инструмента изменяются из-за износа. Износ на различных участках инструмента различен. Так, на участках инструмента, имеющих вогнутость, число разрядов меньше, следовательно, износ на них будет выражен

слабее. Если учесть условия выноса продуктов обработки из промежутка, то различия в износе различных участков еще более возрастут. Чтобы снизить влияние износа электродов-инструментов на точность изготовления, а) изготавливают инструмент из материала, стойкого к эрозии, например из вольфрама, меднографита, коксографитовых композиций; б) используют так называемые безыносные схемы, при которых часть материала заготовки или из рабочей среды осаждают на инструменте, компенсируя тем самым его износ; в) заменяют изношенные участки инструмента путем продольного перемещения, или заменяют весь инструмент; г) производят правку и калибровку рабочей части инструмента. [5]

Приборы автоматического переключения на разные подачу и глубину резания, управляемые системой ЧПУ, обеспечивают оптимальное использование электроэрозионных станков, так как в зависимости от хода процесса обработки режим работы согласуется с технологическими требованиями к деталям. Применяемые адаптивные системы программного управления позволяют своевременно определять отклонения в ходе обработки и устранить их. Изменения параметров процесса обработки вносятся в устройства, формирующее сигнал коррекции, что позволяет с помощью простых электродов изготавливать детали сложных геометрических форм, в частности полостей штампов. [6]

Качество поверхности зависит от режимов обработки. Грубый режим приводит к получению высоты неровностей  $Ra=50\dots 6,3$  мкм и изменению поверхностного слоя глубиной  $0,2\dots 0,4$  мм. При чистовом режиме достигается шероховатость поверхности  $Ra 6,3\dots 1,25$  мкм. Обработка ведется в жидком диэлектрике, инструмент автоматически подается в направлении обработки, что обеспечивает постоянство зазора. Для обработки используются специальные станки разных моделей с машинными генераторами, высокочастотными установками, электронными генераторами и т. д. Высокоточные станки с различными системами программного управления позволяют изготавливать детали со сложными формами.

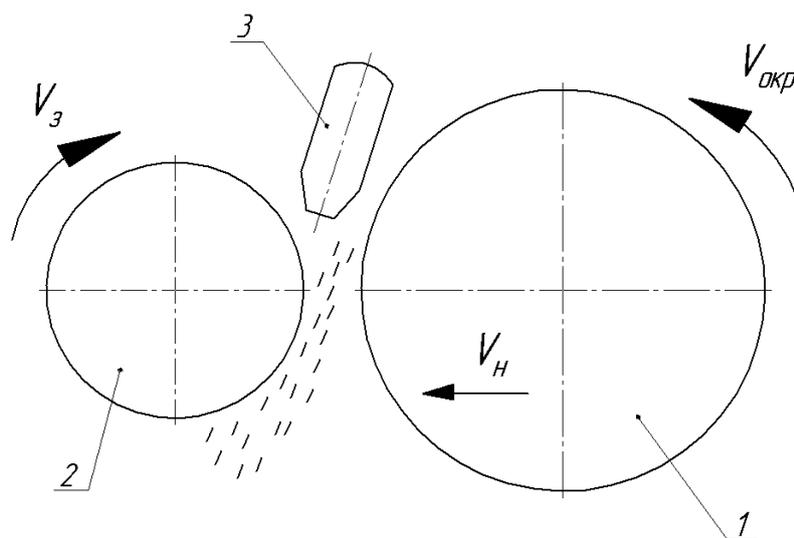
Метод считается целесообразным для предварительной обработки фасонных поверхностей штампов, лопаток, инструментов. Применяется он и для обработки твердых, нержавеющих и жаропрочных сплавов.

По технологическим признакам устанавливаются следующие виды ЭЭО:

- *прошивание* отверстий на глубину до 20 диаметров с использованием стержневого ЭИ и до 40 диаметров - трубчатого ЭИ. Глубина прошиваемого отверстия может быть значительно увеличена, если вращать ЭИ, или обрабатываемую поверхность, или и то и другое с одновременной прокачкой РЖ через ЭИ или с отсосом ее из зоны обработки. Скорость электроэрозионного прошивания (ЭЭПр) достигает 2-4 мм/мин.
- *маркирование* выполняется нанесением на изделие цифр, букв, фирменных знаков и др. Электроэрозионное маркирование обеспечивает высокое качество, не вызывает деформации металла и не создает зоны концентрации внутреннего напряжения, которое возникает при маркировании ударными клеймами. Глубина нанесения знаков может колебаться в пределах от 0,1 до 1 мм. Операция может выполняться одним ЭИ и по многоэлектродной схеме. Изготавливаются ЭИ из графита, меди, латуни, алюминия. Производительность составляет около 3-8 мм/с. Глубина знаков зависит от скорости движения электрода. При скорости движения электрода более 6 мм/с четкость знаков ухудшается. В среднем на знак высотой 5 мм затрачивается около 4 с.
- *вырезание* (ЭЭВ) применяют при изготовлении деталей электро-вакуумной и электронной техники, ювелирных изделий и т. д. в инструментальном производстве, при изготовлении матриц, пуансонов, пуансонодержателей и других деталей, а также вырубных штампов, копиров, шаблонов, цанг, лекал, фасонных резцов и др.
- *шлифование* (ЭЭШ) применяют для чистовой обработки труднообрабатываемых материалов, магнитных и твердых сплавов (рис.2). Для повышения производительности рекоменду-

ется вести шлифование и затачивание инструмента с переменной глубиной шлифования. При профилировании алмазных кругов применяются методы абразивного шлифования и электроискровая обработка.

При электроэрозионной правке алмазы, закрепленные в связке алмазного слоя, удаляются из нее под действием электрических импульсов и уносятся потоком диэлектрика. Точность профиля при этом составляет 15-25 мкм. Шлифование абразивными кругами 63С и непрофилированными алмазными кругами аналогично шлифованию инструмента из быстрорежущей стали.



**Рисунок 2 — Схема электроэрозионного шлифования**  
1 — электрод — инструмент; 2 — заготовка; 3 — насадка

Для обработки профиля фасонных поверхностей методом анодно-механической обработки применяют полуавтоматические станки двойного копирования. Профилирующим инструментом (катодом) является профильный чугунный диск, подключенный к источнику постоянного тока напряжением 24В, положительный полюс присоединяют к заготовке обрабатываемого инструмента. В зону контакта диска с обрабатываемой заготовкой через сопло подается электролит. Для повышения устойчивости и производительности процесса при обработке широких профилей со значительной площадью контакта подача электролита производится профилирующим диском. Электролит подается в центр диска центробежной силой, перемещается к периферии и через отверстия и прорези диска подается в зону контактирования.

Отклонение размеров профиля после электроэрозионного шлифования находится в пределах от 0,005 до 0,05 мм, шероховатость  $Ra = 2,5 (0,25)$ , производительность — 260 мм/мин.

На современном уровне развития электроэрозионной обработки точность изготовления деталей на электроискровом режиме профильным электродом-инструментом достигает 6...7-го качества, непрофилированным — 5...6-го качества; в случае применения электроимпульсного режима точность изготовления соответствует 9...11-му качеству.

Применение ЭЭО вместо механической обработки дает возможность проводить обработку предварительно закаленных заготовок штампов. Наиболее широко ЭЭ обработка внедрена на предприятиях автотракторной промышленности при изготовлении штампов на шатуны и крышки шатунов, крестовины дифференциала, коленчатые валы и т.д. В инструментальном производстве ЭЭО изготавливают штампы на гаечные ключи, ножницы, плоско-

губцы, ножи и т.д. Использование этого метода вместо фрезерования штампов значительно сокращает трудоемкость изготовления. Электроэрозионный метод применяют также при изготовлении литейных форм и пресс-форм на пластмассовые и резиновые детали, а также при изготовлении рабочих колес турбин и компрессов. При этом на электроимпульсную обработку изделие подается после закалки, вследствие чего устраняется искажение профиля в результате термообработки.

Кроме того, после ЭЭО припуск равномернее, а высота микронеровностей меньше, чем после фрезерования. Этим сокращается объем слесарно-механических работ на 30...40%. С появлением электрических способов обработки оказалось в принципе возможным осуществление методами электротехнологии всего комплекса операций, необходимых для превращения заготовки в готовую деталь, включая и ее термическую обработку. Электроэрозионные способы не исключают механическую обработку, а дополняют ее, занимая свое определенное место, соответствующее их особенностям, а именно: возможности обработки токопроводящих материалов с любыми физико - механическими свойствами при отображении формы инструмента в изделии.

Наиболее перспективным является использование электрических способов для обработки деталей из твердых сплавов, жаропрочных сталей и специальных трудно обрабатываемых сплавов, получающих все большее применение в связи с повышением давлений, температур и скоростей в машинах и аппаратах. Основные преимущества: отсутствие механического контакта, возможность обработки труднодоступных элементов, возможность создания узких каналов, направленных под углом к обрабатываемой поверхности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артамонов Б.А., Волков Ю.С. и др. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. М.: Высшая школа, 1983
2. Лившиц А.Л. Электроэрозионная обработка металлов. М.: Высшая школа, 1979
3. Артамонов Б.А. и др. Размерная электрическая обработка металлов. М.: Высшая школа, 1978
4. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки. Под ред. Волосатова В.А. Ленинград: Машиностроение, 1988
5. Немилев Е.Ф. Электроэрозионная обработка материалов, Л., Машиностроение, 1989
6. Фатеев Н.К. Технология электроэрозионной обработки, Л., Машиностроение, 1990
7. Дриц М.Е., Москалев М.А., Технология конструкционных материалов и материаловедение. М.: Высшая школа, 1990
8. Дальский А.М. Технология конструкционных материалов. М.: Машиностроение, 2002

#### **Овсяникова Ирина Васильевна**

Кандидат экономических наук, доцент  
ФБГОУ ВПО «Государственный университет-  
учебно-научно-производственный комплекс»  
Тел; (4862) 41-98-34

#### **Тарапанов Александр Сергеевич**

Доктор технических наук, профессор  
ФБГОУ ВПО «Государственный университет-  
учебно-научно-производственный комплекс»  
Тел; (4862) 54-15-03

I.V. OVSIANIKOVA, A.S. TARAPANOV

**TECHNOLOGICAL CAPABILITIES AND PROSPECTS  
OF ELECTROEROSIVE PROCESSING OF DETAILS**

*The paper analyzes the results of operation of modern industrial methods of forming electrical parts. The data on the existing regimes of processing and surface quality. The prospects of electrical discharge machining of hard metals, high-temperature steels and special alloys difficult to cut.*

**Keywords:** spark machining, forming surfaces, performance, surface roughness.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Artamonov B. A. works of Yu.S. etc. Electrophysical and electrochemical methods of processing of materials. M: The higher school, 1983
2. Livshits A.L. Electroerosive processing of metals. M: The higher school, 1979
3. Artamonov B. A. etc. Dimensional electric processing of metals. M: The higher school, 1978
4. Directory on electrochemical and electrophysical methods of processing. Under the editorship of Volosatov V.A. Leningrad: Mechanical engineering, 1988
5. Nemilov E.F. Electroerosive processing of materials, L. mechanical engineering, 1989
6. Fateyev N. K. Technology of electroerosive processing, L. mechanical engineering, 1990
7. Drits M. E. Moskalev M. A. technology of constructional materials and materials science. M: The higher school, 1990
8. Dalsky A.M. Tekhnologiya of constructional materials. M: Mechanical engineering, 2002

**Ovsianikova Irina Vasilievna**

candidate of economic sciences, docent  
FBGOU VPO "State University-  
educational-scientific-production complex"  
Tel; (4862) 41-98-34

**Tarapanov Alexander Sergeevich**

doctor of technical sciences, Professor  
FBGOU VPO "State University-  
educational-scientific-production complex"  
Tel; (4862) 54-15-19

УДК 621.91

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

## **ЗУБОСТРОГАЛЬНЫЕ РЕЗЦЫ С ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫМИ СХЕМАМИ РЕЗАНИЯ**

*В статье рассматриваются вопросы повышения производительности процесса обработки прямозубых конических колес на зубострогальных станках за счет применения специального режущего инструмента – резцов с дифференцированными схемой резания.*

**Ключевые слова:** *зубострогание, зубострогальный резец с дифференцированной схемой резания*

Анализ методов обработки прямозубых конических колес показывает, что для повышения производительности либо увеличиваются скорости резания [1], либо используется специальный инструмент [1,2]. Эти способы связаны с созданием новых конструкций станков и сложного инструмента. Использование специального, дорогостоящего оборудования, в условиях современного российского машиностроения, где большая часть предприятий выпускают серийную и мелкосерийную продукцию, зачастую является нецелесообразным. Поэтому как на российских, так и на зарубежных предприятиях для обработки прямозубых конических колес все ещё широко используются зубострогальные станки [2]. Это объясняется универсальностью данного оборудования, простотой режущего инструмента и относительно высокой точностью получаемых изделий (до бго класса точности). Однако современная техника предъявляет все более жесткие требования к точности рабочих поверхностей деталей, кроме того конкурентоспособность любого предприятия, независимо от формы собственности и размеров, зависит в первую очередь от качества продукции и соответствия цены с качеством. В этой связи актуальной представляется задача оптимизации процесса зубострогания с целью повышения производительности процесса и качества получаемых изделий.

Одним из путей повышения производительности существующих зубострогальных станков является увеличение применяемых подач с одновременным разделением слоя металла, срезаемого за каждый рабочий ход, между дополнительно вводимыми режущими лезвиями инструмента.

Разделение срезаемого слоя на части применяется во многих видах обработки резанием: протягивании, торцовом фрезеровании, строгании зубофрезеровании и др. Во всех этих случаях распределение припуска между режущими лезвиями способствует снижению сил резания, увеличению стойкости инструмента и производительности процесса. В каждом конкретном случае деление нужно согласовывать с мощностью станка, его жесткостью, требуемой точностью обработанного изделия, чистотой его поверхности, прочностью инструмента и др. условиями.

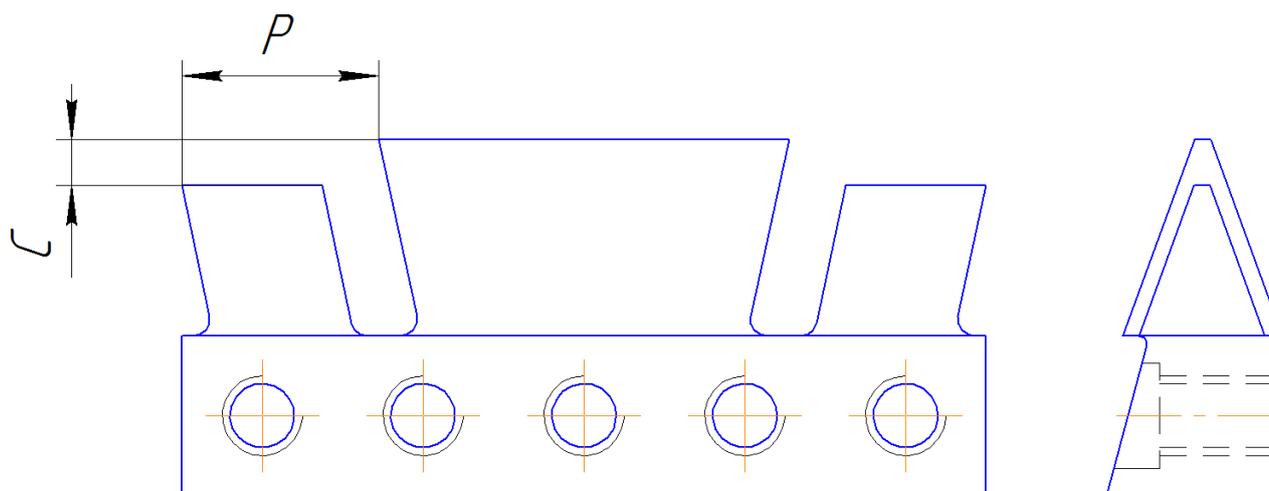
При обычном зубострогании в два прохода - черновом и чистовом - основная масса металла срезается черновым резцом, и на долю чистового остается тонкий слой, расположенный по боковым сторонам и во впадине обрабатываемого зуба.

При зубострогании резцами с дифференцированными схемами резания черновой и чистовой проходы совмещаются, что приводит к резкому изменению схемы резания. За каждый рабочий ход металл срезается и черновой и чистовой ступенью резца. Таким образом, чистовая ступень резца срезает значительно большую часть металла, чем при обычном зубострогании в два прохода и, в то же время, толщина срезаемого им слоя лежит в пределах, рекомендуемых для чистовой обработки, и определяется выбранной приведенной конструктивной подачей.

Зубострогальный резец с дифференцированной схемой резания - это такая модификация обычного резца, в результате которой он приобретает приведенную конструктивную подачу в виде разности размеров лезвия по ступеням (рис. 1).

При этом каждая ступень инструмента срезает определенную, зависящую от параметров технологической системы, часть общего слоя металла, приходящегося на рабочий ход,

что дает возможность, сохраняя заданную для чистового режима резания толщину срезаемого слоя, значительно увеличить круговую и радиальную подачи.



**Рисунок 1 – Конструкция инструмента**

Размеры резца, определяющие взаимное расположение его вершинных лезвий, определяются из формул:

$$C = P \operatorname{tg} \alpha + a_g; \quad (1)$$

$$P = B + 1,5 \div 2, \quad (2)$$

где  $B$  – ширина венца конического зубчатого колеса;  
 $\alpha$  – угол установки резца на станке;  
 $a_g$  – максимальная толщина слоя, срезаемого вершинным режущим лезвием резца.

Осевое расстояние между режущими лезвиями резца может быть на 1,5 – 2 мм больше высоты нарезаемого венца, чтобы чистовой резец вступал в работу после выхода чернового. Такое расположение лезвий увеличивает необходимую длину рабочего хода, ограничивает число ступеней инструмента и максимальную высоту обрабатываемого зубчатого венца, но резко снижает силы резания. Это позволяет работать без перегрузки станка и инструмента при повышенных подачах. Кроме того, снижение сил способствует уменьшению величины упругих отжатий технологической системы и положительно влияет на точность нарезаемого зуба.

В отличие от обычных зубострогальные резцы с дифференциальной схемой резания не имеют угла наклона передней поверхности. Это выравнивает условия работы каждой из сторон зуба резца. Для повышения срока службы резцы выполняются двухсторонними. Установка резцов на станке производится по чистовому зубу. Переточка инструмента должна производиться по чистовому и черновому зубьям на одинаковую величину.

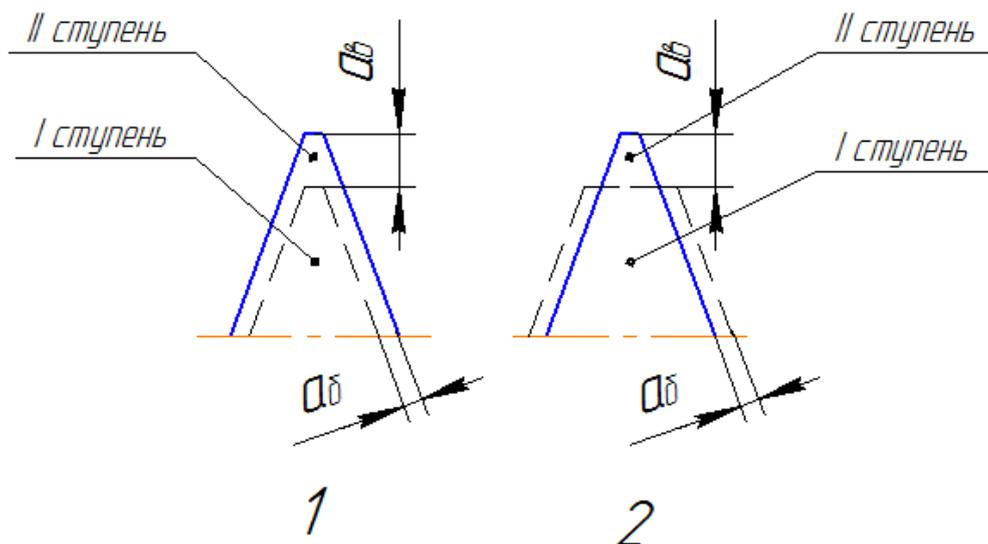
Дифференцирование срезаемого слоя может осуществляться различными способами, выбор которых зависит от конкретных условий обработки. Наиболее рациональными для зубострогальных резцов являются способы: параллельный и подобный.

При параллельном дифференцировании форма дополнительных лезвий полностью копирует форму основных чистовых лезвий (рис. 2, 1).

При работе обычными резцами и ступенчатыми резцами с параллельным дифференцированием срезаемого слоя условия резания в вершинной части зуба инструмента остаются неблагоприятными. Стружки, отделяемые боковыми и вершинными режущими лезвиями, встречаются в зоне контакта с поверхностью, затрудняя процесс обработки.

Чтобы избавиться от взаимного влияния режущих лезвий в процессе работы применяется распределенная схема резания. При распределенной схеме первый зуб работает боковыми сторонами, а второй вершиной (рис. 2, 2). Для того, чтобы исключить из работы боко-

вые режущие лезвия второго зуба резца, между ними и боковыми режущими лезвиями первого зуба делается перепад. Подобное разделение срезаемого слоя позволяет избежать контакта стружки от различных лезвий на передней поверхности и снижает силы резания и износ инструмента. Такая схема резания с распределенным дифференцированием значительно улучшает работу режущих лезвий резца.



*Рисунок 2 – Взаимное расположение режущих лезвий*

Наиболее полно выявить преимущества и особенности процесса зубострогания позволяют исследования усилий резания, возникающих при обработке, износа инструмента и качества нарезаемых деталей. Взаимосвязь этих показателей очевидна. Равномерное распределение усилий резания по ступеням инструмента приводит к оптимизации общего усилия от их совместной работы, делая его минимальным при определенных режимах обработки.

Равномерное распределение усилий по ступеням инструмента предопределяет равные условия работы каждой ступени, вследствие чего режущие лезвия обеих ступеней в равной степени изнашиваются. Для резцов с дифференцированными схемами резания это особенно важно, так как в целях сохранения расчетного распределения срезаемого металла между режущими лезвиями ступеней резца, обе ступени перетачиваются на одну и ту же величину, независимо от индивидуального износа.

Обработка зубчатых колес с минимальными усилиями резания при прочих равных условиях, повышает их точность ввиду уменьшения упругих деформаций в технологической системе. При этом улучшается качество обрабатываемой поверхности.

Наибольшее уменьшение всех составляющих силы резания осуществится лишь при значении приведенной конструктивной подачи резца, являющейся оптимальной при данных условиях обработки. Таким образом, основным вопросом, связанным с проектированием резцов с дифференцированными схемами резания, является выбор оптимальной приведенной конструктивной подачи  $S_{КПР}$ , определяющей толщину слоев срезаемых режущими лезвиями верхней ступени, обеспечивающей наиболее полное снижение составляющих силы резания при работе инструмента.

Основным фактором, оказывающим доминирующее влияние на величину  $S_{КПР}$ , является круговая подача инструмента, поэтому для получения оптимального значения  $S_{КПР}$ , целесообразно воспользоваться соотношением вида:

$$S_{КПР} = f(S_{КР}). \quad (3)$$

Как показали результаты аналитического исследования силы резания при зубострогании [3], осевая её составляющая, имеющая наибольшую величину, стремится отжать заготовку и инструмент в сторону увеличения межосевого расстояния и создает опрокидываю-

щий момент. Радиальная составляющая усугубляет действие осевой силы. Тангенциальная составляющая является знакопеременной и действует попеременно в сторону движения обката и против обката, вызывая поочередно торможение и ускорение обкатанного движения, влияющего на точность нарезаемого венца.

Применение инструмента с дифференцированными схемами резания может способствовать уменьшению составляющих силы резания и снижению амплитуды изменения этих составляющих. Снижение силы резания происходит в результате разделения срезаемого за каждый рабочий ход слоя металла между ступенями инструмента в оптимальном для каждого случая отношении. В результате уменьшения величины всех составляющих: силы резания и выравнивания амплитуды их колебания, деформации в технологической системе заметно снижаются, что сказывается на повышении точности нарезаемых изделий.

При отклонении величины  $S_{КПР}$  инструмента в сторону увеличения или уменьшения против оптимального значения, составляющие усилия резания увеличиваются в связи с перегрузкой соответственно первой или второй ступени резца и далее эффект от применения резца с дифференцированной схемой резания по сравнению с обычным пропадает.

Принимая во внимание величины приведенных конструктивных подач, рекомендованных для обработки конических зубчатых колес, величину приведенной конструктивной подачи зубострогального резца с параллельной схемой резания в зависимости от абсолютной подачи, можно вычислить пользуясь зависимостями:

по вершинному режущему лезвию

$$S_{КПР.В} = (1,2 \div 1,3)1 \frac{1}{T}, \quad (4)$$

по боковым режущим лезвиям

$$S_{КПР.Б} = (0,9 \div 1,0)1 \frac{1}{T}, \quad (5)$$

где  $T$  - время обработки зуба конического колеса в мин.

Таким образом можно сделать вывод, что одним из путей повышения производительности обработки конических колес, является применение зубострогальных резцов с дифференцированными схемами резания. Для проектирования подобных инструментов необходимо точное определение геометрических параметров срезаемого слоя.

Результатом применения данного типа резцов является снижение составляющих силы резания и более равномерное их перераспределение вследствие чего уменьшаются отжатия технологической системы в процессе резания и увеличивается точность нарезаемых изделий.

Статья подготовлена по материалам доклада на VI Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dr.Hermann J. Stadtfeld CONIFLEX Plus Straight Bevel Gear Manufacturing [Text]/ «GEARSolutin», Aug. 2010, p. 40-54.
2. Dr. Carsten Hunecke The Road Leads Straight to Hypoflex [Text]/ «GEARTECHNOLOGY», March/April 2010, p. 54-57.
3. Харламов Г.А., Хандожко А.В., Канатников Н.В. Определение составляющих силы резания возникающей в процессе нарезания конического прямозубого колеса инструментом с прямолинейными режущими кромками [Текст]/ «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» №6/3(290), ноябрь-декабрь 2012, С. 26-34.

**Харламов Геннадий Андреевич**  
ФГОУ ВПО «Государственный университет – УПНК», г. Орел, Россия  
д.т.н., профессор  
телефон: (4862)416575; E-mail: [upk@ostu.com](mailto:upk@ostu.com)

**Канатников Никита Владимирович**  
аспирант направления 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки»  
телефон: 8-920-0865782; E-mail: [NKanatnikov@ya.ru](mailto:NKanatnikov@ya.ru)

**Канатников Александр Владимирович**

Студент специальности 1502001 «Машины и технологии обработки металлов давлением»

телефон: 8-910-2635315; E-mail: [upk@ostu.com](mailto:upk@ostu.com)

---

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

## **GEAR SHAPING CUTTERS WITH THE DIFFERENTIATED SCHEMES OF CUTTING**

*In article it is considered questions of increasing productivity the process of processing straight bevel gears using gear shaping cutters machines at the expense of using the special cutting tool – cutters with differentiated schemes of cutting*

**Keywords:** gear shaping, gear shaping cutter with differentiated schemes of cutting

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Dr.Hermann J. Stadtfeld CONIFLEX Plus Straight Bevel Gear Manufacturing [Text]/ «GEARSolutin», Aug. 2010, p. 40-54.
2. Dr. Carsten Hunecke The Road Leads Straight to Hypoflex [Text]/ «GEARTECHNOLOGY», March/April 2010, p. 54-57.
3. Harlamov G.A., Handozhko A.V., Kanatnikov N.V. Definition the components of cutting force arising during the process of cutting of the straight bevel gear by the tool with stright cutting edges [Text]/ “Fundamental and applied problems of equipment and technology” №6/3(290), November-december 2012.

#### **Harlamov Genadij Andreevich**

FSEI HVT «State University – ESPC»  
Doctor of Engineering Science, professor  
Phone: (4862)416575;  
E-mail: [upk@ostu.com](mailto:upk@ostu.com)

#### **Kanatnikov Nikita Vladimirovich**

FSEI HVT «State University – ESPC»  
Postgraduate student  
Phone: 8-920-0865782;  
E-mail: [NKanatnikov@ya.ru](mailto:NKanatnikov@ya.ru)

#### **Kanatnikov Alexandr Vladimirovich**

FSEI HVT «State University – ESPC»  
Student  
Phone: 8-910-2635315;  
E-mail: [upk@ostu.com](mailto:upk@ostu.com)

---

## КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 621.3.083

Ю.А. БАКУРОВА, К.В. ПОДМАСТЕРЬЕВ

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СПОСОБНОСТИ (ТЭС) КРОМОК РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНЬЮ ИЗНОСА

*В работе проведены исследования износа режущего инструмента по значениям дисперсии термоэлектрической способности (ТЭС) исследуемого материала. Проведенные измерения коэффициента  $k$  относительной ТЭС материала режущего инструмента в различных точках показали изменение значений неоднородностей в зависимости от износа режущего инструмента.*

**Ключевые слова:** термоэлектрическая способность, дисперсия, износ, полустественная термопара, коэффициент относительной ТЭС

Поверхность режущей кромки инструмента неоднородна по ряду причин, в первую очередь, из-за структуры материала, и поэтому в различных точках этих поверхностей термоэлектрические свойства материалов не одинаковы. В процессе резания происходит истирание поверхностного слоя материала и, следовательно, меняется его структура. Кроме того, в поверхностный слой режущего инструмента происходит внедрение микрочастиц обрабатываемого материала, а режущая кромка переходит из одной области обрабатываемого материала заготовки к другой. Все это приводит к изменению термоэлектрических свойств режущего инструмента.

Исследование термоэлектрической способности (ТЭС) на примере режущей кромки резца было проведено в работе [1]. Однако при этом не были рассмотрены колебания термоэлектрической способности по передней, задней поверхностям и режущей кромке резца. Поэтому автором были исследованы вариации термоэлектрической способности по указанным поверхностям у новых резцов и резцов, подвергнутых длительной эксплуатации.

При исследовании ТЭС использовался метод полустественной термопары, в качестве электродов которой служили исследуемый режущий инструмент и стандартный измерительный электрод, термоэлектрические свойства которого были заранее известны. Для обнаружения термоэлектрического эффекта в составленной цепи создавался градиент температур путем локального нагрева поверхности режущего инструмента. Исследование ТЭС в различных точках контролируемой поверхности инструмента проводилось путем последовательного переноса измерительного электрода в различные точки на поверхности контролируемого объекта и измерении термоЭДС в каждой точке позиционирования электрода.

Для проведения расчетов удобно использовать коэффициент относительной ТЭС исследуемого материала, выраженный отношением значения термоЭДС  $E_{pV2}$ , измеренной прибором  $PV2$ , к значению термоЭДС  $E_{pV1}$ , измеренной прибором  $PV1$  искусственной термопары:

$$k = \frac{E_{pV2}}{E_{pV1}} \quad (1)$$

С целью исследования вариаций ТЭС материала инструмента по его поверхности были проведены измерения коэффициента  $k$  относительной ТЭС в разных точках передней

и задней поверхностей, а также режущей кромки инструмента. Исследованию были подвергнуты новые резцы и резцы, снятые с производственного процесса в связи с их плановым постепенным износом.

Измерение термоэлектрической способности передней и задней поверхностей резца проводилось на участке размером 10x10 мм, а режущей кромки – на отрезке длиной 2 мм, в точках, начиная от рабочей вершины режущего клина с шагом 0,2 мм (с целью обеспечения высокой локальности контроля). Термоэлектрическая способность передней и задней поверхностей резца, а также его режущей кромке определялась по отношению к термоэлектрической чувствительности стандартной хромель-копелевой термопары ТКХ(L).

В общей сложности было выполнено по 40 измерений для каждой из поверхностей резца и 10 измерений для режущей кромки. Полученные результаты были проверены на наличие ошибок и обработаны с использованием методов математической статистики. Были определены точечные оценки результатов измерений: средние арифметические значения и средние квадратические значения отклонений результатов измерений.

Полученные результаты измерений средних значений коэффициента  $k$  относительной ТЭС для передней и задней поверхностей и режущей кромки резца, а также дисперсии и среднеквадратических отклонений для новых и изношенных резцов представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Точечные оценки результатов измерений коэффициента  $k$  относительной ТЭС для передней и задней поверхностей, а также режущей кромки резца, в зависимости от степени износа

Исследуемая поверхность инструмента	Среднее арифметическое, $k_{cp}$		Дисперсия		Среднее квадратическое отклонение, $S_k$	
	Новый	Изношенный	Новый	Изношенный	Новый	Изношенный
Передняя	0,228	0,349	0,000585	0,002301	0,024183	0,047968
Задняя	0,189	0,394	0,000398	0,000266	0,019939	0,016306
Режущая кромка	0,293	0,362	0,000204	0,001338	0,014279	0,036585

Анализируя данные, полученные в ходе измерения относительной ТЭС режущего инструмента, и представленные в таблице 1, можно сделать вывод о том, что при износе инструмента среднее значение возрастает в 2 и более раз, а степень неоднородности также резко изменяется, причем при износе передней поверхности и режущей кромки резца дисперсия возрастает, а для задней поверхности наблюдается уменьшение дисперсии.

Указанные явления можно объяснить следующим образом – износ передней поверхности сопровождается появлением лунки износа в результате трения стружки о поверхность. В результате этого более мягкие элементы поверхностного слоя выносятся из зоны трения, а часть более твердых элементов внедряется в подповерхностный слой, который становится поверхностным. Кроме того, микрочастицы стружки диффундируют в поверхностный слой и также увеличивают его неоднородность. Именно поэтому дисперсия и среднее квадратическое отклонение термоэлектрической способности передней поверхности резца увеличивается.

Трение поверхности изделия о заднюю поверхность резца носит иной характер – происходит как бы выглаживание поверхности, что сопровождается, как показывает эксперимент, уменьшением значений дисперсии и среднего квадратического отклонения.

Износ достаточно сильно сказывается на рабочем участке режущей кромки резца где дисперсия выросла приблизительно в 7 раз.

Аналогичные эксперименты были проведены на другом резце, в результате которого были получены следующие данные, представленные в таблице 2.

Таблица 2 - Точечные оценки результатов измерений коэффициента  $k$  относительной ТЭС для передней и задней поверхностей, а также режущей кромки резца, в зависимости от степени износа, резец 2.

Исследуемая поверхность инструмента	Среднее арифметическое, $k_{cp}$		Дисперсия		Среднее квадратическое отклонение, $S_k$	
	Новый	Изношенный	Новый	Изношенный	Новый	Изношенный
Передняя	0,233	0,363	0,000684	0,002387	0,026156	0,048857
Задняя	0,190	0,392	0,000428	0,000226	0,020678	0,015043
Режущая кромка	0,297	0,375	0,000116	0,001424	0,010772	0,037734

Однако при проведении экспериментов было трудно установить связь линейного износа резца с дисперсией ТЭС. Поэтому было необходимо найти процесс резания, при котором было бы возможно установить более точную зависимость не только качественной связи износа резца с дисперсией ТЭС, но и количественную связь.

Для более точной оценки этой связи было необходимо выбрать инструмент, который бы позволял в процессе его износа более точно определять значения линейного износа. В данной работе для контроля линейного износа инструмента были взяты развертки.

С целью исследования вариаций ТЭС режущих кромок развертки были проведены измерения коэффициента  $k$  относительной ТЭС зубьев развертки в разных точках режущих кромок инструмента. Исследованию были подвергнуты новые развертки, развертки, находившиеся в эксплуатации и сохранившие свое работоспособное состояние; и развертки, имеющие значительный износ, в результате которого инструмент не обеспечивает требуемых параметров точности и шероховатости при обработке отверстий.

Измерение ТЭС осуществлялось вдоль каждого зуба развертки, в точках, расположенных в зоне перехода режущей части в калибрующую, так как изнашивание разверток чаще всего происходит именно в данном месте, а также вдоль каждого зуба, в пределах калибрующего участка развертки. Для экспериментальных исследований были взяты машинные развертки. Предварительно все развертки, используемые в эксперименте, были рассортированы на несколько групп в зависимости от длительности эксплуатации инструмента и степени его износа. В первую группу вошли новые развертки, во вторую - после 10 минут эксплуатации, в третью – после 20 минут, в четвертую – после 35 минут резания. Нормируемый период стойкости развертки согласно ГОСТ 1523-81 составляет 30 минут. В каждой группе было по 5 разверток.

Для каждой из разверток было выполнено по 40 измерений.

По полученным данным были определены значения среднего арифметического, СКО  $S$  и дисперсии  $D$ .

На рисунке 1 представлен график изменения коэффициента  $k$  относительной ТЭС для различных точек поверхностей режущих кромок разверток с различной степенью износа.

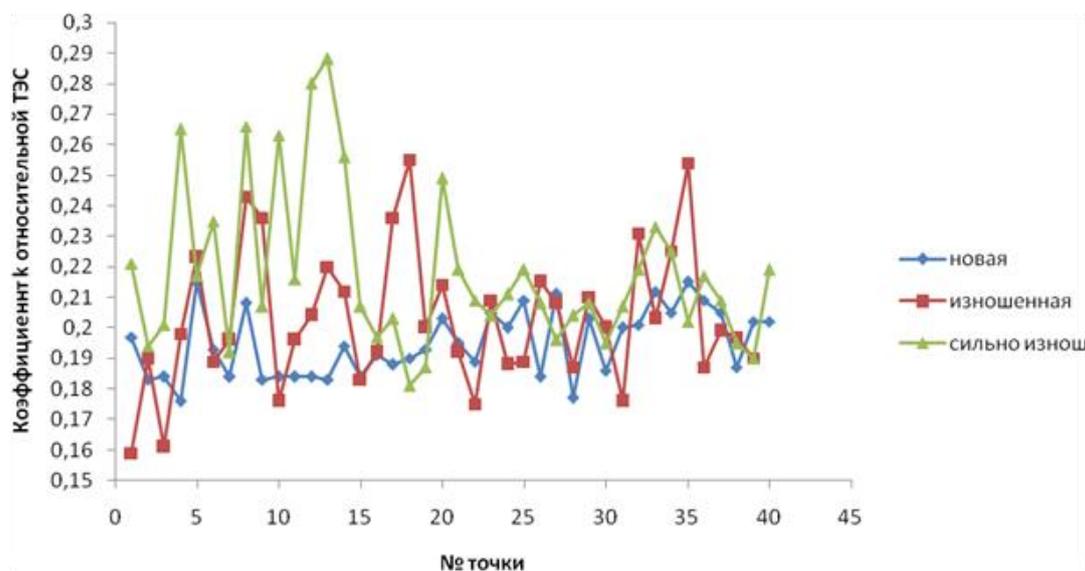


Рисунок 1 - График изменения коэффициента  $k$  относительной ТЭС для различных точек поверхностей режущих кромок разверток с различной степенью износа

Данные, представленные на рисунке 1, показывают изменение коэффициента  $k$  относительной ТЭС в зависимости от удаленности рассматриваемой точки от начала режущей части и степени износа развертки (точки расположены на расстоянии 0,4 мм друг от друга). Как видно из графика, новые развертки характеризуются незначительным размахом значений коэффициента  $k$  относительной ТЭС, как в зоне перехода режущей части в калибрующую, так и в калибрующей части. Для изношенной развертки очевиден резкий рост (по сравнению с предыдущим графиком) значений коэффициента в зоне перехода режущей части в калибрующую и рост, а также большой разброс значений коэффициента в калибрующей части.

Анализируя форму и характер распределения значений коэффициента  $k$  относительной ТЭС для сильно изношенной развертки, становится очевидным не только смещение значений в область более высоких значений, но и резкий рост размаха значений в зоне перехода режущей части в калибрующую (достигает значения равного 0,288), а также их смещение в зону калибрующей части.

Измерение геометрических параметров разверток и их сопоставление с полученными значениями дисперсии позволили построить зависимость изменения дисперсии коэффициента  $k$  относительной ТЭС от линейного износа режущей кромки развертки, представленной на рисунке 2. Данная зависимость позволяет по значению дисперсии коэффициента  $k$  относительной ТЭС определить износ инструмента.

Как видно из приведенных зависимостей, изменение чувствительности значений ТЭС по отношению к изменению значений износа в начальной стадии износа значительно больше, чем в его конечной стадии. Это объясняется тем, что, в соответствии с теорией трения, по мере линейного износа образующиеся поверхностные слои постепенно получают устойчивую структуру.

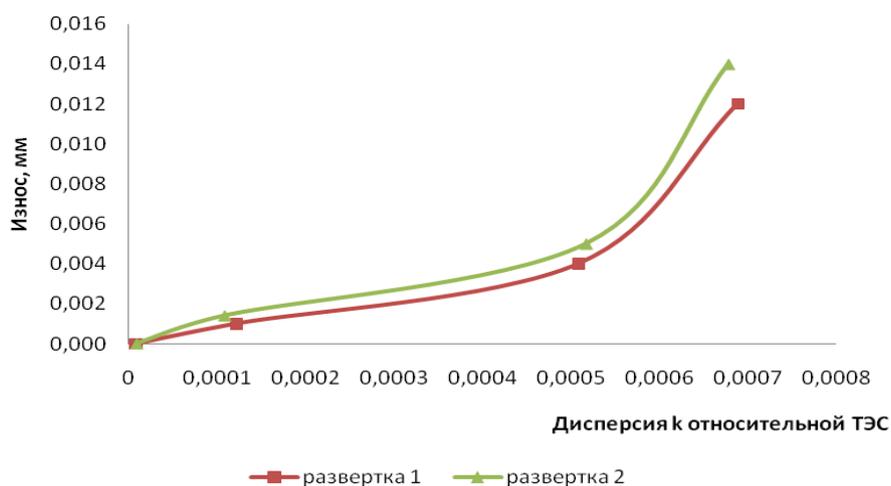


Рисунок 2 - Зависимость изменения линейного износа режущих кромок развертки от дисперсии к относительной ТЭС

Статья подготовлена по материалам доклада на VI Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мельник Е.Е. Метод и средство контроля состояния и оценки стойкости твердосплавного режущего инструмента: Дис. ...канд. техн. наук [Текст] / Е.Е. Мельник - Орел, 2003. - 234 с.

**Бакурова Юлия Алексеевна**  
Кандидат технических наук  
Ливенский филиал Госуниверситета-УНПК  
Тел: 8 (909) 225-84-78  
E-mail: [bakurova2yandex.ru](mailto:bakurova2yandex.ru)

**Подмастерьев Константин Валентинович**  
Доктор технических наук, профессор.  
Заведующий кафедрой «Приборостроение, метрология и сертификация»  
ФГОУ ВПО «Государственный университет-учебно-научно-производственный комплекс»  
Тел: (4862) 41-98-21  
E-mail: [pms35@ostu.ru](mailto:pms35@ostu.ru)

J.A. BAKUROVA

### RESEARCH OF VALUES OF THERMOELECTRIC ABILITY OF SURFACES OF THE CUTTING TOOL WITH VARIOUS DEGREE OF WEAR

*Wear of the cutting tool on values of dispersion of thermoelectric ability (thermal power plant) of a studied material is investigated. The carried-out measurements of factor of relative thermal power plant of a material of the cutting tool in various points showed change of values of not uniformity depending on wear of the cutting tool.*

**Keywords:** thermoelectric ability, dispersion, wear, semi-natural thermocouple, factor of relative thermal power plant

**Bakurova Julia Alekseevna**  
Can. Sc. techn.  
Livensky branch of State university-ESPC  
Phone: 8 (909) 225-84-78  
E-mail: [bakurova2yandex.ru](mailto:bakurova2yandex.ru)

**Podmasterjev Konstantin Valentinovich**  
Doctor of Technical Sciences, Professor.  
Polikarpov Technological Institute  
FSEI HVT «State University – ESPC», Orel  
Head of the "Instrument making, metrology and certification"  
Tel: (4862) 41-98-21  
E-mail: [pms35@ostu.ru](mailto:pms35@ostu.ru)

## **ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ ЛАМП**

*Представлены результаты испытаний полупроводниковых осветительных ламп. Испытания проведены в реальных условиях эксплуатации. Установлен факт ухудшения технических характеристик ламп. Одной из причин ухудшения технических характеристик признано выделение лампой большого количества теплоты. Предложены варианты конструкции полупроводниковой осветительной лампы, содержащие элементы системы охлаждения.*

***Ключевые слова:** сбережение электрической энергии; полупроводниковая осветительная лампа; эксплуатационные испытания; теплота; система охлаждения; радиатор*

В настоящее время мировое сообщество осуществляет непрерывный поиск перспективных источников освещения, способных заменить широко распространённые лампы накаливания. Достоинства лампы накаливания очевидны: простота, низкая стоимость, относительная экологическая чистота производства, эксплуатации и утилизации, большой срок службы и, что самое важное, максимальное приближение спектра электромагнитного излучения к естественному солнечному свету. Недостатки лампы накаливания также известны – малая энергетическая эффективность (КПД составляет 3..7 %). В качестве одной из альтернатив лампам накаливания выступают энергосберегающие люминесцентные лампы.

Люминесцентные лампы имеют большой срок службы, относительно невысокую стоимость, высокую энергетическую эффективность. Но наличие ртути в составе люминесцентного покрытия усложняет процесс утилизации ламп данного типа. В последние годы в качестве альтернативы люминесцентных ламп общество стало рассматривать энергосберегающие полупроводниковые (светодиодные) лампы.

Энергосберегающие светодиодные лампы представляют собой наиболее перспективный тип источников освещения. Они имеют высокий КПД, экологически безопасны (при эксплуатации и утилизации) по сравнению с люминесцентными лампами (не содержат ртути) и, по заявлениям изготовителей, имеют огромный назначенный ресурс – более 50000 часов (срок службы около 15 лет). Недостатками светодиодных ламп являются: «непривычный» для человека цвет света, концентрированная направленность света, высокая стоимость.

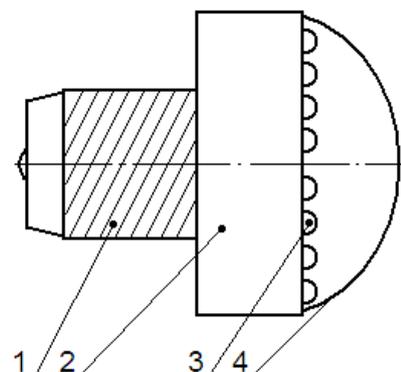
**Описание объекта испытаний**

В России одним из предприятий, осуществляющих серийное производство светодиодных ламп, является ЗАО «Протон-Импульс» (город Орёл). Производимые заводом светодиодные лампы получили наименование «Лампа осветительная полупроводниковая» – ЛПО; освоено производство нескольких типов ламп, отличающихся друг от друга конструкцией применяемых светодиодов (корпусные и бескорпусные), их количеством (от 20 до 85), электрической мощностью и освещённостью. В настоящее время перед заводом стоит актуальная проблема – экспериментальное подтверждение назначенного ресурса светодиодных ламп, установленного на уровне 50000 часов непрерывной работы. Поскольку серийное производство ламп освоено заводом всего несколько лет назад, такой ресурс не выработала ещё ни одна из изготовленных им ламп.

В настоящее время актуальная проблема долговременных эксплуатационных испытаний энергосберегающих светодиодных ламп решается на кафедре «Технология машиностроения» Карачевского филиала федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс» (Госуниверситет-УНПК), расположенном в городе Карачеве Брянской области. Начиная 2009-го года, в течение пяти лет проводятся исследования эффекта деградации (ухудшения) параметров светодиодных ламп после их длительной эксплуатации. Объектом испытаний служат серийно выпускаемые лампы полупроводниковые осветительные типа ЛПО-18.

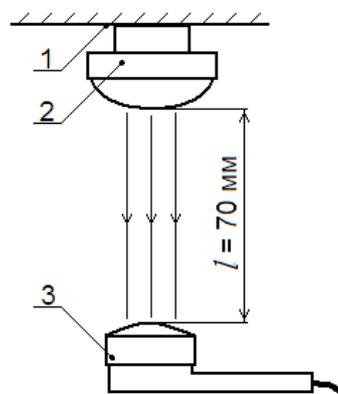
Технико-экономические показатели лампы типа ЛПО-18 следующие: потребляемая электрическая мощность, не более – 10 Вт; назначенный ресурс, не менее – 50000 ч; цвет светового излучения – белый тёплый; напряжение питания – сетевое напряжение 220 В ча-

стотой 50 Гц; количество светодиодов в излучающей матрице – 85 штук; освещённость, на расстоянии 70 см от матрицы, не менее – 300 лк; габаритные размеры лампы: диаметр излучающей матрицы – 78,5 мм, длина надцокольной части – 50 мм, общая длина лампы – не более 85 мм; тип цоколя – E-27; рекомендуемая розничная цена – 500 рублей. Общий вид светодиодной лампы типа ЛПО-18 показан на рисунке 1.



**Рисунок 1 - Общий вид лампы полупроводниковой осветительной типа ЛПО-18**

1 – цоколь типа E-27, 2 – корпус, 3 – светодиоды, 4 – рассеиватель света (изготавливается прозрачным или матовым)



**Рисунок 2 - Схема измерения освещённости**  
1 – потолок, 2 – лампа, 3 – датчик люксметра

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем. Из партии ламп были отобраны 2 лампы, у которых были измерены электрическая мощность и освещённость. Затем одна из ламп (№1) подвергалась эксплуатации, а другая (№2) – хранению. Эксплуатация лампы №1 продолжалась до наступления её отказа, который произошёл через 1000 ч непрерывной работы. В период эксплуатации и хранения ламп измерялась их мощность, освещённость, а также температура внутри корпуса. Рассмотрим результаты исследований [1].

Измерения электрической мощности ламп выполнялись косвенно. Мощность определялась расчётным путём из зависимости, связывающей постоянную счётчика электроэнергии со временем одного полного оборота диска. Постоянная счётчика  $k$  определена из расчёта, что 1 кВт·ч электроэнергии соответствует 1250 оборотам диска. Одному обороту диска соответствует электроэнергия  $W = 0,8$  Вт·ч. Зная постоянную счётчика  $k$  и время  $t$ , за которое диск сделает один полный оборот, можно вычислить мощность лампы по формуле:

$$P = \frac{W}{t} . \tag{1}$$

Методика выполнения измерений мощности заключалась в последовательном включении исследуемых ламп при выключенных других приёмниках электроэнергии и измерении времени, за которое диск счётчика делал один полный оборот. После этого по формуле (1) проводились вычисление мощности лампы. Измерительным оборудованием служил счётчик электрической энергии однофазный СО-5 ГОСТ 6570-80 и секундомер. Достоинством методики являлось использование поверенного средства измерений. Результаты измерений мощности светодиодных ламп приведены в таблице 1.

При измерении освещённости в качестве измерительного прибора использовался люксметр Ю-116. Схема измерения освещённости показана на рисунке 2; результаты измерений освещённости даны в таблице 2. Кроме измерения освещённости при проведении эксперимента снята также диаграмма направленности излучения для обеих ламп, а также для лампы с бескорпусными диодами. На рисунке 3 показан внешний вид светодиодной лампы. Анализ данных таблицы 1 показывает, что мощность светодиодной лампы после эксплуатации в течение полугода (около 1000 ч) увеличилась почти в два раза. Анализ данных таблицы 2 позволяет сделать вывод, что на освещённость помещения, создаваемую светодиодными лампами, существенное влияние оказывает цвет света, излучаемого лампой, и тип рассеи-

вателя излучения. Наибольшую освещённость обеспечивает лампа с прозрачным рассеивателем. Рассеиватель уменьшает световую эффективность светодиодной лампы: прозрачный – на 15 %, а матовый – на 40 %.

Таблица 1 – Результаты измерений мощности светодиодных ламп

Электрическая характеристика	Значение электрической характеристики		
	Номинальное значение	Лампа №1 (наработка 1000 ч)	Лампа №2 (новая)
Мощность, Вт	10	16,88	8,57

Таблица 2 – Результаты измерений освещённости

Освещённость, лк	Лампа №1	Лампа №2
Лампа без рассеивателя излучения	440	600
Лампа с прозрачным рассеивателем	400	510
Лампа с матовым рассеивателем	330	340



Прозрачный  
рассеиватель света

Матовый  
рассеиватель света

**Рисунок 3 - Внешний вид светодиодной лампы типа НПО**

0...30° от плоскости пола помещения), а при увеличении угла интенсивность излучения стремительно уменьшается (в 3...10 и более раз). При этом наибольшую концентрацию (по углу расхождения) имеет излучение светодиодной лампы с корпусными светодиодами (кристалл с линзой) и прозрачным рассеивателем света, а наименьшую – излучение светодиодной лампы с бескорпусными светодиодами и матовым рассеивателем.

В процессе эксплуатации светодиодных ламп происходит деградация их параметров, таких, как электрическая мощность и освещённость. В качестве причины деградации мощности и освещённости ламп предполагается перегрев светодиодов в матрице. Данная гипотеза выдвинута на основании анализа внешнего вида лампы №1 после её отказа: отказ светодиодов матрицы произошёл в точке её соприкосновения с резисторами цепи стабилизатора напряжения питания. При этом сами резисторы имели вид, свидетельствующий об их интенсивном нагреве в процессе эксплуатации (то есть, они почернели).

Результаты измерения температуры подтвердили эту гипотезу. Измерение температуры внутри корпуса светодиодной лампы проводилось с помощью двух измерительных приборов: термометра ТЭС-5 и комбинированного цифрового прибора DT-838, включенного в режиме температуры. Результаты измерения температуры показаны на рисунке 5 [2].

В результате эксперимента было установлено, что при единичном включении при нормальном значении подаваемого на них тока (20 мА) светодиоды нагреваются не более, чем до 29 °С, что на четыре градуса выше температуры окружающей среды, но значительно ниже температуры светодиодных ламп. В лампах светодиоды работают в условиях постоянного перегрева на 40...90 °С, что приводит к их преждевременным отказам (рис. 6, 7).

Повышенная температура внутри корпуса светодиодной лампы отрицательно влияет на её надёжность. Из литературных источников установлено, что назначенное предприятием-изготовителем значение ресурса лампы в 50000 ч соответствует ресурсу светодиода, работающего в одиночном включении при температуре окружающей среды +20 ± 5 °С. Если же температура окружающей среды повышается до +60 ± 5 °С, ресурс светодиода снижается до 25000 ч, а при температуре +74 °С он составляет всего 10000 ч, то есть сокращается в пять раз. Эти данные получены для одиночных светодиодов.

Анализ диаграмм направленности излучения светодиодных ламп и результаты их сравнения с диаграммой направленности излучения лампы накаливания показал, что направленность излучения светодиодных ламп в значительной степени зависит от конструкции лампы и типа светодиодов (рис. 4).

Лампа накаливания генерирует излучение, направленность которого в наибольшей степени соответствует направленности естественного солнечного излучения, а максимум излучения приходится на полезную площадь помещения.

Светодиодные лампы имеют максимумы излучения непосредственно под собой (под углом



Рисунок 4 - Диаграммы направленности электромагнитного излучения ламп разных типов

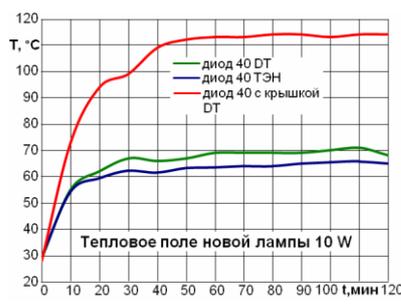
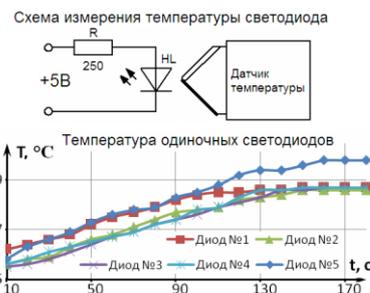


Рисунок 5 - Результаты измерения температуры внутри светодиодной лампы



А так как с точки зрения надёжности все светодиоды в лампе (в лампе ЛПО-18 их 85 штук) соединяются последовательно (отказ хотя бы одного светодиода приводит к отказу лампы), следовательно, ресурс лампы при повышенной температуре внутри её корпуса должен быть, как минимум на порядок меньше ресурса одиночного светодиода, работающего при повышенной температуре. Значит, полученное значение ресурса лампы ЛПО-18 в 1000 часов теоретически обосновано.

Ресурс светодиодной лампы в 1000 часов исключает возможность получения экономического эффекта от её использования, так как за такой короткий срок затраты, связанные с приобретением лампы, не компенсируются стоимостью сэкономленной электрической энергии, а других преимуществ у светодиодных ламп перед лампами накаливания пока нет. Это обстоятельство может стать основным препятствием на пути массового промышленного производства светодиодных ламп – они просто не будут пользоваться спросом. Таким образом, повышение ресурса и снижение интенсивности деградации параметров светодиодных ламп является наиболее актуальной задачей, стоящей перед отечественными предприятиями-производителями. Одним из основных путей её решения является выявление в их структуре источников повышенного тепловыделения и разработка мероприятий по снижению избыточной температуры внутри корпуса светодиодной лампы (рис. 8).



Результат работы светодиодной лампы в условиях постоянного перегрева



Одна из возможных причин отказа – перегрев резисторов в цепи электропитания

Рисунок 6 - Внешний вид светодиодной лампы после характерного проявления отказа – выгорания светодиодов

Рисунок 7 - Внешний вид резисторов цепи питания после проведения эксплуатационных испытаний

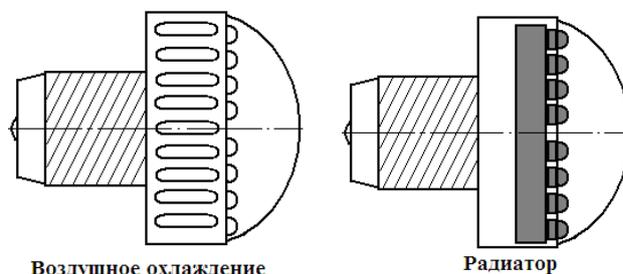


Рисунок 8 - Варианты конструкции полупроводниковой осветительной лампы, содержащей элементы системы охлаждения

Первый возможный вариант конструкции полупроводниковой осветительной лампы, содержащей элементы системы охлаждения (отвода избыточной теплоты), представляет собой корпус с отверстиями для свободной циркуляции воздуха вокруг электрорадиоэлементов цепи питания. Данный вариант успешно реализован в серийно выпускаемых лампах ЗАО «Протон-Импульс» типа ЛПО-07, фотография которых показана на рисунке 3. Вторым вариантом – размещение светодиодов на алюминиевом радиаторе, поглощающем избыточную теплоту. Подобный вариант системы охлаждения наиболее часто встречается в конструкциях светодиодных ламп зарубежных производителей.

Статья подготовлена по материалам доклада на VI Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бернат, С.В. Сравнительный анализ энергетических характеристик источников освещения [Текст] / С.В. Бернат, В.В. Марков // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации. XX международный научно-технический семинар. Тезисы докладов. – Украина, Крым, г. Алушта, 18-24 сентября 2011 г. – С. 94-96.
2. Ковалёв, А.И. Особенности тепловых процессов в матрицах светодиодных энергосберегающих ламп [Текст] / А.И. Ковалёв, В.В. Марков // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации. XX международный научно-технический семинар. Тезисы докладов. – Украина, Крым, г. Алушта, 18-24 сентября 2011 г. – С. 112-113.

**Бернат Сергей Владимирович**

Карачевский филиал ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», город Карачев, Россия  
студент факультета «Технология машиностроения»  
телефон (48335)2-00-72; E-mail: [pms35vm@yandex.ru](mailto:pms35vm@yandex.ru)

**Марков Владимир Владимирович**

Карачевский филиал ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», город Карачев, Россия заведующий кафедрой «Технология машиностроения», к.т.н., доцент  
телефон (48335)2-00-72; E-mail: [pms35vm@yandex.ru](mailto:pms35vm@yandex.ru)

---

S.V. BERNAT, V.V. MARKOV

## APPLICATION THE RESULTS OF EXPLOITATION RESEARCHES FOR THE OPTIMIZATION OF CONSTRUCTIONS THE SEMICONDUCTOR LIGHTING LAMPS

*Is present the results of researches the semiconductor lighting lamps. The researches are carrying out in the reality conditions of exploitation. A fact of aggravation the technical characteristic of lamps is determining. The one of causes an aggravation the technical characteristic is acknowledge a yield of lamps the big quantity of heat. Are offer the versions of construction the semiconductor lighting lamp, which is contain of elements the system of cooling.*

**Keywords:** *guarding of electrical energy; semiconductor lighting lamp; exploitation researches; heat; system of cooling; radiator*

## BIBLIOGRAPHY

1. Bernat, S.V. Comparative analyses the energetic characteristics the sources of lighting [Text] / S.V. Bernat, V.V. Markov // Contemporary technologies in the problems of control, automatic and processing of information. XX international scientific and technical seminar. Thesis of papers. – Ukraine, the Crimea, t. Alushta, 18-24 September 2011 year. – P. 94-96.
2. Kovalev, A.I. Peculiarities thermal processes in the matrixes of semiconductor energy- guarding lamps [Text] / A.I. Kovalev, V.V. Markov // Contemporary technologies in the problems of control, automatic and processing of information. XX international scientific and technical seminar. Thesis of papers. – Ukraine, the Crimea, t. Alushta, 18-24 September 2011 year. – P. 112-113.

**Bernat Sergey Vladimirovich**

Karachev branch of State-University, Karachev, Russia  
student of faculty «Technology of machine-building»  
telephone (48335)2-00-72; E-mail: [pms35vm@yandex.ru](mailto:pms35vm@yandex.ru)

**Markov Vladimir Vladimirovich**

Karachev branch of State-University, Karachev, Russia  
head of sub-faculty «Technology of machine-building»,  
Ph.D, reader E-mail: [pms35vm@yandex.ru](mailto:pms35vm@yandex.ru)

---

Д.А. ЕВСИКОВА

## АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЁТА ПОГРЕШНОСТИ БАЗИРОВАНИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЯ УСТАНОВОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ СИНТЕЗЕ СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНТЕГРИРОВАННЫХ САПР

*В статье рассматривается система расчёта погрешности базирования заготовки, позволяющая в достаточной мере автоматизировать процесс проектирования станочного приспособления.*

**Ключевые слова:** автоматизированная система расчёта погрешности, автоматизированное конструирование установочных элементов, интегрированные САПР.

В современных условиях производства одной из главных задач является сокращение сроков производства. При переходе на новый вид продукции и переподготовку производства до 80% от всего объема технологического оснащения производства приходится на техническое перевооружение и модернизацию, которая включает в себя, в том числе, проектирование и изготовление технологической оснастки. Оптимальность принимаемых решений на начальном этапе конструирования станочных приспособлений является одним из важнейших факторов, влияющих на качество выпускаемой продукции.

В число наиболее значимых и трудоемких этапов проектирования станочных приспособлений входит расчёт погрешности базирования заготовки и конструктивной реализации установочных элементов.

Вопрос обеспечения качества конструирования можно решить путем создания автоматизированной системы интерактивной формализации конструкторско-технологической информации, которая позволит: снизить затраты материальных средств и времени на конструирование и изготовление; сократить цикл производства и значительно снизить себестоимость продукции; улучшить качество конструирования приспособлений и получаемой технологической документации.

На данный момент на российском и зарубежном рынке систем автоматизированного проектирования (САПР) преобладают универсальные системы, предназначенные для проектирования изделий машиностроения любой сложности, но при этом не существует модулей для конструирования станочных приспособлений, к которым предъявляются особые требования. Следовательно, конструкторские модули САПР необходимо дополнять специализированными блоками разработки станочных приспособлений, при активном использовании имеющихся параметрических библиотек элементов технологической оснастки.

В связи с этим, данная работа, направленная на автоматизацию расчёта погрешности базирования, является актуальной для решения всего комплекса проблем автоматизации технологической подготовки производства.

Целью работы является автоматизация расчёта погрешности базирования заготовки и конструирования установочных элементов с использованием современных САД систем.

Задачи исследования:

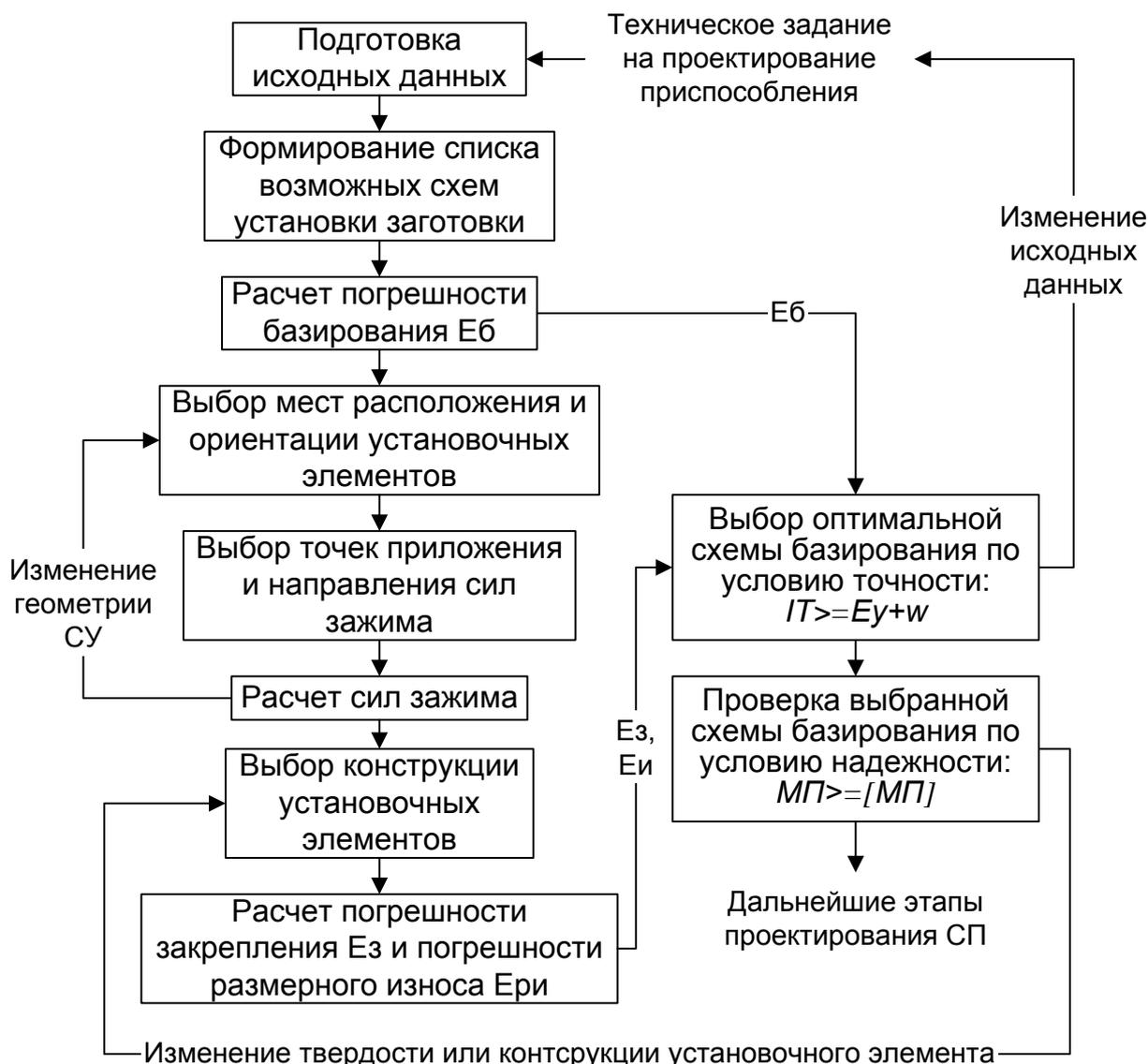
- Проанализировать существующие подходы к формализации исходной технологической информации при автоматизации конструирования станочных приспособлений.
- Разработать информационное и программное обеспечение автоматизированного программного модуля.
- Разработать принципы формализации считывания технологической информации в рамках процесса автоматизации расчета погрешности базирования.
- Разработать математическую модель и алгоритмы автоматизации интерактивного расчета погрешности базирования и конструирования установочных элементов при проектировании.

Методика исследования. При выполнении научных исследований и реализации поставленных задач были использованы методы системного подхода, объектно-ориентированного проектирования и анализа, для разработки математических моделей проектных процедур использовались основные положения технологии машиностроения.

Практическая ценность работы:

– Предложена методика формализации технологической информации способом интерактивного считывания параметров чертежа для ускорения и, как следствие удешевления конструирования технологической оснастки.

– Разработан программный модуль, интегрированный в среду CAD-системы, и позволяющий расширить стандартные возможности системы для автоматизации конструирования установочных элементов.



*Рисунок 1- Схема проектирования станочных приспособлений*

Качество конструирования с точки зрения точности, надежности, стоимости, и вспомогательного времени на установку и снятие детали можно обеспечить выбором оптимальной схемы установки заготовки в станочном приспособлении и ее конструктивной реализации без проведения полного проектирования приспособления. Из анализа сложности выполнения данных проектных работ выявлено, что их автоматизация позволит значительно снизить затраты материальных средств и времени, и повысить качество проектных решений.

Исследования показали, что возможность проектирования станочных приспособлений стандартными средствами САД системы не может в достаточной мере автоматизировать все этапы ее проектирования. Поэтому необходимо разработать встраиваемый в САД систему специализированный модуль, позволяющий максимально автоматизировать процесс конструирования.

Для выбранных схем установки проводится конструктивная реализация, включающая выбор конструкции, размеров, материала и определение физико-механических свойств рабочих поверхностей установочных элементов. При проведении конструктивной реализации выполняются следующие процедуры:

1. Выбор мест расположения установочных элементов;
2. Определение погрешности базирования;
3. Выбор схемы закрепления;
4. Расчет необходимой силы закрепления;
5. Выбор конструкции и размеров установочных элементов;
6. Расчет погрешности закрепления и размерного износа установочных элементов.

В рамках данной работы в автоматизированном режиме реализуются первые две процедуры конструирования станочных приспособлений и предлагаются алгоритмы и подходы к решению следующих перечисленных задач.

В результате проведения конструктивной реализации схемы установки выполняется определение остальных основных составляющих погрешности установки, поэтому по завершении этого этапа проектирования проводится окончательная проверка всех выбранных ранее схем установки по условию точности. После которой, получено следующее:

1. Выбирается одна или несколько схем установки. В этом случае проводятся этапы дальнейшего выбора и проектирования станочных приспособлений.

2. В результате проверки не выбрана ни одна схемы установки. В этом случае инженером-проектировщиком принимается решение об изменении схемы базирования (интерактивный выбор другого комплекта баз) или теоретической схемы базирования. При этом происходит неизбежное изменение исходных данных, и все этапы выбора необходимо повторить снова.

При выборе нескольких схем установки проводится окончательный выбор оптимальной схемы установки путем их анализа по рангам стоимости и вспомогательного времени на установку и снятие заготовки. В дальнейшем полученная схема проверяется по критерию обеспечения требуемой надежности

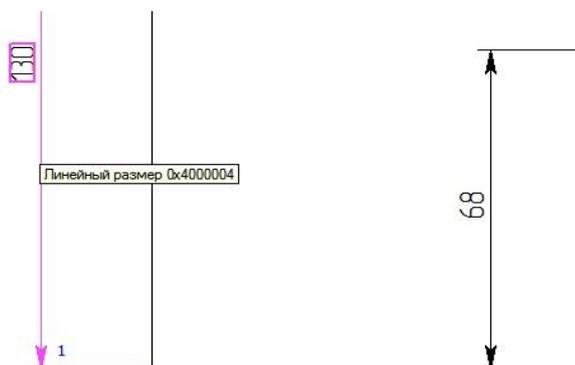
Таким образом, в результате выбора по разработанной схеме получаем оптимальную СУ заготовки в станочном приспособлении, и отвечающую требованиям точности, надежности, основным технико-экономическим требованиям.

Ключевым этапом предлагаемого подхода становится интерактивная формализация исходной конструкторско-технологической информации. При автоматизированном конструировании с использованием САД систем большое количество информации, и наиболее трудоемкое при введении, поступает автоматически, путем считывания данных с чертежа детали:

- конфигурацию и габаритные размеры детали;
- обрабатываемые поверхности (место обработки);
- базовые поверхности;
- технологические размеры (любых видов) и допуски на них;
- размеры базовых поверхностей и допуски на них;
- размеры, определяющие расположение баз по отношению друг к другу.
- качество базовых поверхностей (шероховатость);
- материал заготовки.

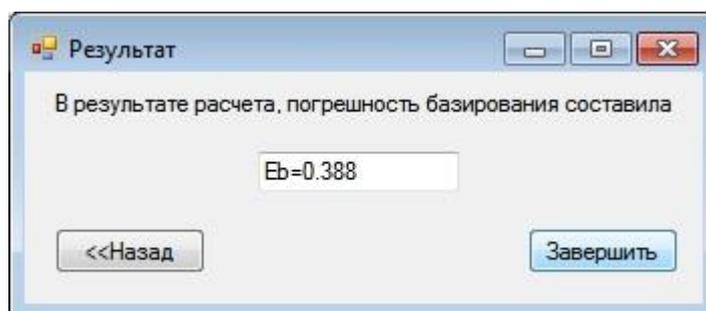
Остальные исходные данные, необходимые для проектирования схемы установки вводятся конструктором вручную по техническому заданию на проектирование станочного приспособления.

Следующим этапом синтеза схемы установки заготовки в станочном приспособлении становится выполнение программного модуля, позволяющего извлечь с конструкторского 2D-чертежа контейнер с параметрами в виде базы данных по щелчку мышки (рис. 2).



*Рисунок 2 - Выбор размера*

Модуль расчета возвращает в рабочую среду программы базу данных свойств объекта и запускает подпрограмму определения расчета погрешности базирования (рис. 3).



*Рисунок 3 - Результат расчета погрешности базирования*

Вывод:

1. Разработан программный модуль, интегрированный в среду САД системы, и расширяющий ее возможности для автоматизации расчёта погрешности базирования заготовки в станочном приспособлении. При этом в качестве системы трехмерного твердотельного моделирования была принята САД система «легкого» уровня, в качестве средства разработки системы оболочка объектно-ориентированного визуального программирования Microsoft Visual Basic, а в качестве средства передачи данных между САД системой и программным модулем использовались базы данных – Microsoft Access.

2. При анализе практической реализации разработанного программного модуля выяснено, что полученные результаты расчетов и конструкторские решения обеспечивают качество проектируемой схемы установки. Проведенная оценка экономической эффективности внедрения системы показала положительные результаты при условии, что предприятие уже обладает САД системой.

3. Разработана математическая модель автоматизации расчёта погрешности базирования заготовки и конструирования установочных элементов в станочном приспособлении с использованием современных САД технологий. С использованием методов системного анализа общая задача автоматизации была разбита на отдельные иерархически связанные задачи, выявлены информационные взаимосвязи между ними и САД системой, выявлены условия оптимизации и ограничения. При этом был сформирован и описан алгоритм расчета погрешности базирования заготовки в станочном приспособлении для каждого выполняемого на операции технологического размера.

Статья подготовлена по материалам доклада на VI Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверченков В.И. и др. САПР технологических процессов, приспособлений и режущих инструментов: Учеб. пособие для вузов / В.И. Аверченков, И.А. Каштальян, А.П. Пархутик – Минск: Вышэйш. шк., 1993. – 288 с.
2. Аверченков В.И., Ильицкий В.Б. Автоматизация проектирования приспособлений: Учеб. Пособие. – Брянск: БИТМ, 1989. – 174 с.
3. Быков Ю.Н., Кормилицин С.И., Палей М.М. Системы автоматизированного проектирования технологической оснастки: Учеб. Пособие / Волгоград. гос. техн. ун-т. – Волгоград, 1996. – 70 с.
4. Вдовин А.В. Автоматизированная система выбора рациональной схемы базирования. Сборник научно-исследовательских работ. Материалы 53-й студенческой конференции. В 2-х ч. Ч. 1 – Брянск: БГТУ, МТФ, 1998. – 68 с.

**Евсикова Дарья Андреевна**

Магистрант

Брянский государственный технический университет

Тел. +7 910 334 34 89

E-mail: [daryaevsikova@mail.ru](mailto:daryaevsikova@mail.ru)

---

D. A. EVSIKOVA

### AUTOMATION ERROR CALCULATION BASED DESIGN AND INSTALLATION OF ELEMENTS IN SYNTHESIS MACHINE ACCESSORIES WITH INTEGRATED CAD

*Experience of development system of calculation errors based harvesting, allowing sufficiently automate the design of machine tools.*

**Keywords:** *billing system errors, computer-aided engineering installation elements, integrated CAD*

### BIBLIOGRAPHY

1. Averchenkov VI and other CAD processes, tools and cutting tools: Manual. manual for schools / VI Averchenkov, IA Kashtalyan, AP Parhutik - Minsk: Vysheysh. wk., 1993. - 288.
2. Averchenkov VI Ilitsky VB Design automation tools: Manual. Allowance. - Bryansk BITM, 1989. - 174 p.
3. Bulls JN, Kormilitsin SI, Paley M. Computer-aided design tooling: Textbook. Manual / Volgograd. State. tech. Univ. - Volgograd, 1996. - 70 seconds.
4. A. Vdovin Automated system of rational choice-based scheme. Collection of scientific research. Proceedings of the 53rd Student Conference. In 2 hours, Part 1 - Bryansk BSTU, ITF, 1998. - 68.

**Evsikova Darya Andreevna**

Magistrant of Bryansk State Technical University

Phone: +7 910 334 34 89

E-mail: [daryaevsikova@mail.ru](mailto:daryaevsikova@mail.ru)

---

Д.Н. КРЮКОВ, А.Г. ИВАХНЕНКО, О.В. АНИКЕЕВА

## СТАНДАРТИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ АГРЕГАТНЫХ СТАНКОВ

*В статье раскрыт подход к разработке стандартов на нормы точности агрегатных станков.*

**Ключевые слова:** стандартизация, точность станков, параметры геометрической точности.

Реализация федеральной целевой программы «Национальная технологическая база» и её подпрограммы «Развитие отечественного станкостроения и инструментальной промышленности» на 2011 - 2016 годы» должна привести к созданию и развитию в России производств тех категорий импортозамещающих средств машиностроительного производства, которые относятся к технологиям двойного назначения и наиболее востребованы стратегическими организациями машиностроительного и оборонно-промышленного комплексов. На предприятиях данных комплексов широкое применение нашло специальное и специализированное технологическое оборудование, в том числе агрегатные станки. Для такого оборудования отсутствуют межгосударственные и национальные стандарты на нормы точности, поэтому исследования в области создания стандартов на параметры геометрической точности агрегатных станков являются актуальными.

К основным критериям работоспособности станка относится его геометрическая точность. Доля геометрической точности в общем балансе точности станка тем выше, чем выше его класс точности и требования к точности обрабатываемых на нем деталей.

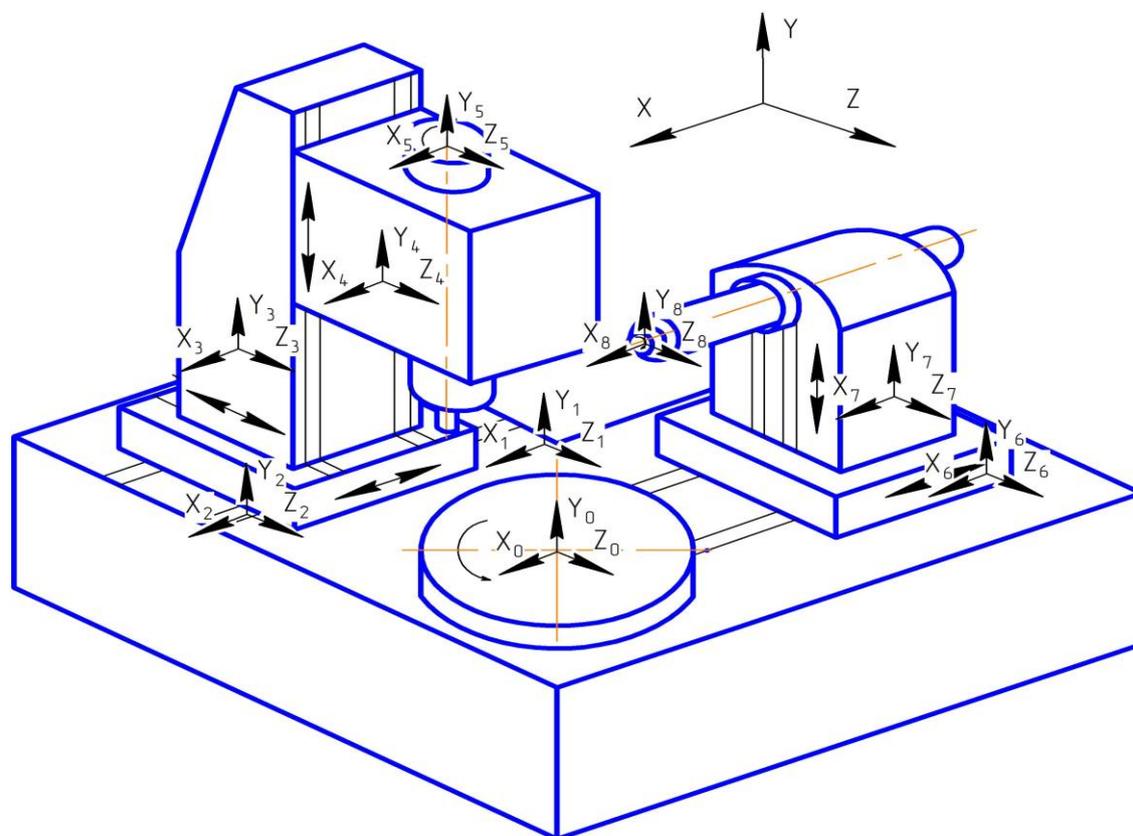
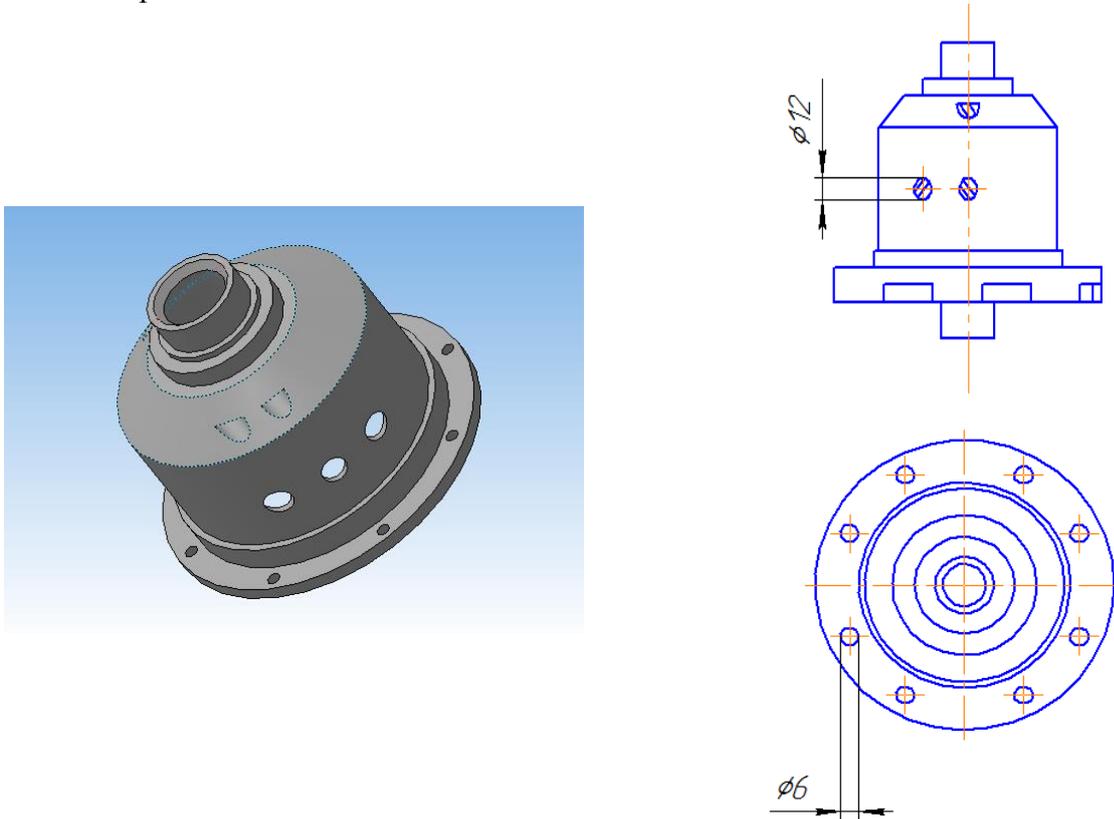


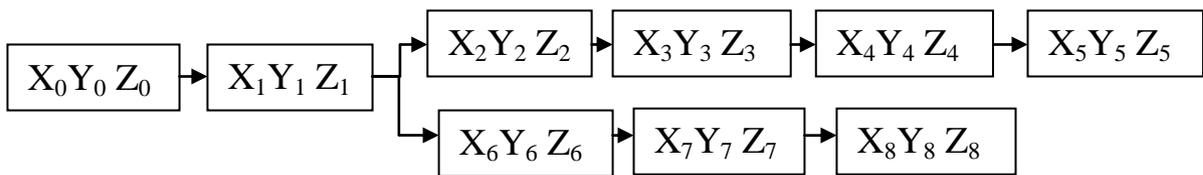
Рисунок 1 - Формообразующая система агрегатного станка.

Поэтому необходимо как качественно, так и количественно оценивать ожидаемые параметры геометрической точности металлорежущего станка, что позволит как при проектировании, так и при эксплуатации станка принимать эффективные решения по компенсации, коррекции и управлению параметрами геометрической точности станка. В работе [1] предложен подход к выявлению геометрических погрешностей станков и разработке стандартов на нормы точности. Суть предложенного подхода рассмотрим на примере.

Пример – агрегатный станок (рис. 1), обрабатывающий некоторые поверхности детали – корпуса блокировки дифференциала ВАЗ 2121 (рис. 2), для которых заданы требования к точности обработки.



*Рисунок 2 - Обрабатываемая деталь*



*Рисунок 3 - Структура формообразующей системы агрегатного станка*

Верхняя ветвь формообразующей системы станка участвует в обработке отверстий диаметром 6 мм, а нижняя ветвь – отверстий диаметром 12 мм. Обработка осуществляется точечным режущим инструментом (резцом расточным). Функция формообразования данного станка при обработке отверстий корпуса имеет вид:

$$\begin{cases} r_{01} = A^5(\psi)A^1(x)A^3(z)A^2(y)A^5(\varphi)r_{u1} \\ r_{02} = A^5(\psi)A^1(x)A^2(y)A^4(\varphi)r_{u2}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $A^1$  – матрица перемещения по оси X;  
 $A^2$  – матрица перемещения по оси Y;  
 $A^3$  – матрица перемещения по оси Z;

$A^4$  – матрица вращения вокруг оси X;  
 $A^5$  – матрица вращения вокруг оси Y;  
 $r_u$  – радиус-вектор режущего инструмента,

$$r_{u1} = A^2(R_1)e^4, r_{u2} = A^3(R_2)e^4, R_1=3 \text{ мм}; R_2=6 \text{ мм}.$$

Векторный баланс точности для агрегатного станка с учетом структуры, (рис. 3) вычисляется по зависимостям (2):

$$\begin{cases} \Delta r_{01} = (\varepsilon_0 A^5 A^1 A^3 A^2 A^5 + A^5 \varepsilon_1 A^1 A^3 A^2 A^5 + A^5 A^1 \varepsilon_2 A^3 A^2 A^5 + A^5 A^1 A^3 \varepsilon_3 A^2 A^5 + \\ + A^5 A^1 A^3 A^2 \varepsilon_4 A^5) r_{u1} \\ \Delta r_{02} = (\varepsilon_0 A^5 A^1 A^2 A^4 + A^5 \varepsilon_1 A^1 A^2 A^4 + A^5 A^1 \varepsilon_2 A^2 A^4 + A^5 A^1 A^2 \varepsilon_4 A^4) r_{u2} \end{cases} \quad (2)$$

где  $\varepsilon_0 \dots \varepsilon_3$  – матрицы поворотов и переносов (смещений) по осям координат;  
 $\alpha_{0\dots3}$  – малые углы поворота вокруг оси X обрабатываемой детали (со шпинделем), станины, продольного суппорта и поперечного суппорта соответственно;  
 $\beta_{0\dots3}$  – то же, вокруг оси Y;  
 $\gamma_{0\dots3}$  – то же, вокруг оси Z;  
 $\delta_{x0\dots x3}$  – малые абсолютные смещения по оси X обрабатываемой детали (со шпинделем), станины, продольного суппорта и поперечного суппорта соответственно;  
 $\delta_{y0\dots y3}$  – то же, по оси Y;  
 $\delta_{z0\dots z3}$  – то же, по оси Z.

После выполнения промежуточных преобразований векторный баланс точности имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \Delta r_{01} = R \cos(f) \sum_{i=0}^5 \beta_i - y \sum_{i=0}^3 \gamma_i + \sum_{i=0}^4 \Delta x_i + \cos(f) \Delta x_5 + \sin(f) \Delta z_5, \\ R \sum_{i=0}^4 (\sin(f) \gamma_i - \cos(f) \alpha_i) + \sum_{i=0}^5 \Delta y_i - R \alpha_5, \\ - R \sin(f) \sum_{i=0}^5 \beta_i + y \sum_{i=0}^3 \alpha_i - \sum_{i=0}^4 \Delta z_i - \sin(f) \Delta x_5 + \cos(f) \Delta z_5, \\ 0 \\ \Delta r_{02} = R \sum_{i=0}^4 (\sin(f) \gamma_i - \cos(f) \beta_i) + \sum_{i=0}^4 \Delta x_i - R \gamma_4, \\ R \sin(f) \sum_{i=0}^4 \alpha_i + x \sum_{i=0}^2 \gamma_i + \sum_{i=0}^3 \Delta y_i + \cos(f) \Delta y_4 - \sin(f) \Delta z_5, \\ R \cos(f) \sum_{i=0}^4 \alpha_i + x \sum_{i=0}^1 \beta_i + \sum_{i=0}^3 \Delta z_i - \sin(f) \Delta y_4 + \cos(f) \Delta z_4, \\ 0 \end{cases} \quad (3)$$

С учетом связей аргументов функции формообразования, и уравнений обрабатываемых на данном агрегатном станке цилиндрических отверстий, скалярные балансы точности, включающие в свой состав только геометрические погрешности, имеют вид:

$$\begin{cases} \Delta r_{01n} = \sin(f) (R \cos(f) \sum_{i=0}^5 \beta_i - y \sum_{i=0}^3 \gamma_i + \sum_{i=0}^4 \Delta x_i + \cos(f) \Delta x_5 + \sin(f) \Delta z_5) + \\ + \cos(f) (-R \sin(f) \sum_{i=0}^5 \beta_i + y \sum_{i=0}^3 \alpha_i + \sum_{i=0}^4 \Delta z_i - \sin(f) \Delta x_5 + \cos(f) \Delta z_5), \\ \Delta r_{02n} = \cos(f) (-\sin(f) R \sum_{i=0}^3 \alpha_i + x \sum_{i=0}^1 \gamma_i + \sum_{i=0}^3 \Delta y_i - \sin(f) (\alpha_4 R + \Delta z_4) + \cos(f) \Delta y_4) - \\ - \sin(f) (R \cos(f) \sum_{i=0}^4 \alpha_i + x \sum_{i=0}^1 \beta_i + \sum_{i=0}^3 \Delta z_i + \sin(f) \Delta y_4 + \cos(f) \Delta z_4) \end{cases} \quad (4)$$

В скалярные балансы точности (4) входят как компенсируемые погрешности [3], так и некомпенсируемые погрешности узлов станка, причем нормирование точности осуществляется только для некомпенсируемых погрешностей.

Далее скалярные балансы точности станка преобразуются в размерные цепи для каждой обрабатываемой поверхности. Для определения значения величины замыкающего звена устанавливается доля геометрической погрешности в общем балансе погрешностей. Эта доля при обработке отверстий по 7 качеству принята равной:

$$\Delta r_{ny} = 1/3\Delta_{\Sigma},$$

где  $\Delta_{\Sigma}$  - общая величина погрешности обработки, равная половине значений величин полей допусков:  $\text{Ø}12\text{H}7$  и  $\text{Ø}6\text{H}7$ .

После выявления размерных цепей выполняется решение прямой задачи их расчёта, результатом являются значения допусков составляющих звеньев размерной цепи.

Выбор соответствующих параметров геометрической точности станка по ГОСТ 22267-76 «Станки металлорежущие. Схемы и способы измерений геометрических параметров». После назначения значений по рядам предпочтительных чисел проводится проверка точности станка по уравнениям размерных цепей.

Оформляется стандарт на параметры геометрической точности агрегатных станков.

Выявленная таким образом система параметров геометрической точности агрегатных станков, непосредственно участвующих в процессе формообразования, является основой создания соответствующих документов (стандартов предприятий) на нормы точности.

Статья подготовлена по материалам доклада на VI Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крюков Д.Н., Ивахненко А.Г., Анисеева О.В., материалы международной научно-технической конференции «Качество в производственных и социально-экономических системах», «Стандартизация параметров геометрической точности агрегатных станков», ЮЗГУ, 2013г.
2. Решетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.
3. Ивахненко А.Г., Куц В.В., Структурно-параметрический синтез технологических систем [Текст]: монография/А.Г. Ивахненко, В.В.Куц, Курск. гос. техн. ун-т. Курск, 2010.-153

**Крюков Д.Н.**

инженер кафедры УКМиС,  
ФГБОУ ВПО ЮЗГУ,  
E-mail: [krukovdmitry@mail.ru](mailto:krukovdmitry@mail.ru)

**Ивахненко А.Г.**

д.т.н., профессор, профессор кафедры УКМиС, ФГБОУ ВПО ЮЗГУ,  
E-mail: [ivakhnenko2002@mail.ru](mailto:ivakhnenko2002@mail.ru)

**Анисеева О.В.**

инженер кафедры УКМиС,  
ФГБОУ ВПО ЮЗГУ,  
E-mail: [olesya-anikeeva@yandex.ru](mailto:olesya-anikeeva@yandex.ru)

D.N. KRUKOV, A.G. IVAKHNENKO, O.V.ANIKEEVA

## STANDARDIZATION PARAMETERS GEOMETRIC PRECISION MODULAR MACHINE TOOLS

*The article discloses approach to developing standards for standards of accuracy modular machine tools.*

**Keywords:** *standardization, precision machine tools, precision geometric parameters.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Krukov D.N., Ivakhnenko A.G., Anikeeva O.V., materials of the international scientific conference "Quality in industrial and socio-economic systems," "Standardization parameters geometric precision modular machine tools", SWSU, 2013.
2. Reshetov D.N., Portman VT The accuracy of machine tools. - Moscow: Mashinostroenie, 1986. - 336.
3. Ivakhnenko A.G., Vladimir Kuts, Structural and parametric synthesis of technological systems [Text]: monograph / A.G. Ivakhnenko, V.V.Kuts, Kursk. state. tech. univ. Kursk, 2010.-153.

**Krukov D.N.**

Engineer of UKMiS, SWSU,  
E-mail: [krukovdmitry@mail.ru](mailto:krukovdmitry@mail.ru)

**Ivakhnenko A.G.**

Ph.D., Professor, Department of UKMiS, SWSU,  
E-mail: [ivakhnenko2002@mail.ru](mailto:ivakhnenko2002@mail.ru)

**Anikeeva O.V.**

Engineer of UKMiS, SWSU,  
E-mail: [olesya-anikeeva@yandex.ru](mailto:olesya-anikeeva@yandex.ru)

*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, 55-55-24, 41-98-03, 55-05-81  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: met\_lit@ostu.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 Воронков А.В.

Подписано в печать 19.06.2013 г.  
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 10.  
Тираж 600 экз.  
Заказ № \_\_\_\_\_

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе  
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНТ ПС»  
302030, г. Орел, ул. Московская. 65.