

**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  
Астафьев П.А. д-р юрид. наук, проф.  
Иванов Г.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.  
Новяков А.Н. д-р техн. наук, проф.  
Попова Л.В. д-р экон. наук, проф.  
Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф.

**Редакция**

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

Заместители главного редактора:  
Гордон В.А. д-р техн. наук, проф.  
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.  
Зубчанов 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.  
Малыгин В.А. д-р физ.-мат. наук, проф.  
Мулюкин О.П. д-р техн. наук, проф.  
Осадчий В.Я. д-р техн. наук, проф.  
Пянин 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:**

Морозова А.В. к.с.н.

**Адрес редакции**

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
(4862) 41-98-48, 41-98-03, 55-55-24,  
43-48-90  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: met\_jit@ostu.ru

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

Подписной индекс 29504  
по объединенному каталогу «Пресса  
России»

© Госуниверситет – УНПК, 2012

## Содержание

### Машиностроительные технологии и инструменты

Аль-Тибби В.Х., Минаков В.С., Анисимов В.Н., Кочетов А.Н. О наноразмерном эффекте при упрочнении деталей машин с использованием автоматизированной установки электроакустического напыления.....	3
Бердичевский Е.Г. Инновационные технологии художественной обработки металлов.....	8
О.И. Борискин, С.В. Зябрев, А.В. Нурдин, С.Я. Хлудов К вопросу о проектировании прогрессивных конструкций многофункциональных режущих пластин.....	13
Григорьев И.В., Ямников А.С. Влияние неточности изготовления и сборки деталей на отклонения механизма и его функционирование.....	20
Иванов А.М. Эффективность комбинирования термопластических методов обработки сталей.....	25
Марков В.В. Универсальная структурная модель трибосопряжения.....	31
Мизранов М.Ш. Термодинамический анализ контактных процессов при резании металлов	40
Носенко В. А., Буричев А. Г., Капля В. И. Автоматическая система устранения зависаний ПЛК в автоматизированной системе измерений и управления.....	47
Ситникова М. Н. Технология восстановления выработки поверхностей деталей турбины ГТД методом газоплазменного напыления.....	53
Ткаченко А.Н. Математическая модель шероховатости поверхности электротехнических деталей из меди, обработанных комбинированным инструментом для фрезерования и алмазного выглаживания.....	58
Ушаков М.В., Воробьев И.А., Ушакова И.В. Метод формирования линий скольжения в зоне резания.....	66
Цуканов И.Ю. Отделочно-упрочняющая обработка ППД режущих поверхностей ходовых гаек.....	71

### Моделирование технологических процессов

Куликов М.Ю., А.В. Флоров Разработка методики расчета температурного поля в инструменте при резании.....	77
--	----

### Конструирование, расчеты и материалы

Бочкова Д.Е., Шейнин Г.М., Бобков М.Н. Расчет координат точек модифицированного профиля зуба цилиндрического колеса.....	84
Фомин А. А., Гусев В. Г., Марышев А. А. Исследование уровня вибрации шпинделя станка для обработки отходов древесины.....	89

### Машины, аппараты, технологии легкой и пищевой промышленности

Гончаров Ю.В., Кузнецова Е.А., Парамонов И.Н. Инновационная технология хлеба из проросшего зерна пшеницы.....	94
Гуцина Г.Д., Черепенько А.А., Черепенько А.П. Основные положения оценки качества внутрипроцессной влажно-тепловой обработки.....	99

### Испытание, контроль, диагностика и управление качеством

Алчев В.Ю., Шафорост А.Н. Оптимизация структуры внутрицехового транспорта машиностроительных предприятий.....	104
Брозовоский Б.М., Хайров Д.А., Янкан И.Н. Диагностика резания материалов на основе анализа неслучайных составляющих колебательного процесса.....	109
Веретенникова М.К., Углова Н.В. Качество крепежных изделий при массовом производстве.....	115
Данилов В.А. Необходимость стандартизации микропрофиля дорожи при оценке вибрации на рабочем месте операторов строительной и дорожной техники.....	121
Курьянов С.В., Беляев А.В., Галымов Э.Р. Применение мультифрактальной параметризации для оценки структурного состояния и механических свойств металлов.....	124

### Инновации и кадры в машиностроении

Киричек А.В., Морозова А.В. Разработка модели оценивания уровня сформированности кластеров компетенций специалиста машиностроительного профиля.....	131
---	-----



# Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology

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

№ 2 - 4 (292) 2012  
March - April

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.

**Mutyukin 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:

**Morozova A.V.** Can. Sc. Soc.

### Address

302020 Orel,

Naugorskoye Chosse, 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, 2012

## Contents

### Machine building technology and toolware

<i>Al-tibbi W.H., Minakov V.S., Anisimov V.N., Kochetov A.N. About nanosize effect at hardening of machine parts by the method of electroacoustic coating with automotive equipment.....</i>	3
<i>Berdichevsky E.G. Innovative technologies of art processing of metals.....</i>	8
<i>Boriskin O.I., Zjabrev S.V., Nuzhdin G.A., Hludov S.Y. To the question on progressive construction multipurpose cutting inserts projections.....</i>	13
<i>Y.W. Grigorov, A.S. Yamnikov Influence of discrepancy of manufacturing and assemblage of details on mechanism deviations on its functioning.....</i>	20
<i>Inzov A.M. Performance combination of methods of thermoplastic processing steel.....</i>	25
<i>Markov V.V. Universal structural model of tribological element.....</i>	31
<i>M.S.H. Migranov The thermodynamic analysis of contact processes at metals cutting</i>	40
<i>V. A. Nosenko, A. G. Burtsev, V. I. Kaplya The automatic system of removal ptc freezes in automated system of measurement and control.....</i>	47
<i>Simikova M. N. Technology of restoration of the worn surfaces gte turbine details with the gaz-plazma method.....</i>	53
<i>Tkachenko A.N. Mathematical model of the surface roughness of electrical parts copper treated combined tool for milling and the diamond caress.....</i>	58
<i>Ushakov M.V., Vorobjov I.A., Ushakova I.V. Method of formation of lines of sliding in a cutting zone.....</i>	66
<i>Tsukanov I.YU. Finishing and hardening treatment of lead nuts threaded surfaces by surface plastic deformation.....</i>	71

### Process modeling

<i>Kulikov M.U., Florov A.V. Development of the methodical way of calculation the temperaturat field in a tool during cutting.....</i>	77
--	----

### Construction, calculation, material

<i>Bochkova D.E., Scheynin G.M., Bobkov M.N. Calculation of coordinates of points of the modified structure of the tooth of the cylindrical wheel.....</i>	84
<i>Fomin A. A., Gusev V.G., Maryshev A. A. Research of the machine tool spindle vibration level for processing of the wood waste.....</i>	89

### Machine, apparatus, technology light and food industry

<i>Goncharov Y.V., Kuznetsova E.A., Paramonov I.N. Innovative technology of bread wheat sprouted grains.....</i>	94
<i>Guschina G.D., Cherepenko A.A., Cherepenko A.P. Basic provisions of the assessment of quality of intra process damp and thermal processing.....</i>	99

### Tests, control, diagnostics and quality control

<i>Antsev Y.Y., Shaforost A.N. Optimization of structure of intradepartmental transport of machine-building enterprises.....</i>	104
<i>Brzhozovskiy B. M., Khayrov D.A., Jankin I. N. Diagnostics of cutting of materials on basis of analysis of non-random constituents of swaying process.....</i>	109
<i>Veretennikova M.K., Uglova N.V. Quality of fixing products at mass production.....</i>	115
<i>Danilov V.A. The need to standardize microprofile roads for evaluation of vibration on operator construction and road machinery.....</i>	121
<i>Kuryntsev S.V., Belyaev A.V., Galimov E.R. Application of multifractal parameterization for evaluation of structural and mechanical properties of metals.....</i>	124

### Innovation and personnel in engineering

<i>Kirichek A.V., Morozova A.V. The machine-building profile specialist competence cluster formedness level estimation model working out.....</i>	131
---	-----

УДК 669.-175.2:621.7.022.6

В.Х. АЛЬ-ТИББИ, В.С. МИНАКОВ, В.Н. АНИСИМОВ, А.Н. КОЧЕТОВ

**О НАНОРАЗМЕРНОМ ЭФФЕКТЕ ПРИ УПРОЧНЕНИИ ДЕТАЛЕЙ  
МАШИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ  
УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ**

*В работе проводится исследование влияния технологических режимов электроакустического напыления на параметры кристаллической структуры покрытий, получаемых данным способом. Для исследования кристаллической структуры используется метод рентгеноструктурного анализа.*

*Ключевые слова:* Электроакустическое напыление, наноразмерный эффект, параметр кристаллической решетки, рентгеноструктурный анализ.

**ВВЕДЕНИЕ**

Проблема получения покрытий с нанокристаллической структурой, предназначенных для различных областей техники в настоящий момент является одной из самых актуальных [1,2]. Известно (в первую очередь для металлов), что уменьшение размера кристаллических блоков ниже некоторого порогового значения приводит к значительному изменению физических свойств материала. В частности, к увеличению прочности, твердости, повышению износостойкости.

В данной работе проводится исследование кристаллической структуры покрытий, получаемых методом электроакустического напыления (ЭЛАН) [3,4,5]. В основе метода лежит использование высококонцентрированных потоков энергии электрической искры и продольно-крутильных ультразвуковых колебаний. Такие покрытия позволяют заметно (в 6-8 раз) увеличить ресурс работы режущего инструмента и деталей машин. По результатам исследований делаются выводы о возможности получения нанокристаллических покрытий данным методом.

В последнее время, по практическому использованию, нанокристаллические материалы приблизились, а возможно и опередили сплавы в аморфном состоянии. Это в первую очередь обусловлено тем, что они в меньшей степени склонны к релаксации в процессе работы, хотя по своим свойствам ничем не уступают аморфным материалам. Таким образом, более предпочтительно получение в напыленном слое наноструктурных материалов, хотя бы и с аморфными включениями, что должно ощутимо повысить стабильность технологических свойств покрытия.

Касательно задачи аттестации наноструктурных материалов в настоящее время интенсивно развиваются дифракционные, спектроскопические и резонансные методы [2]. В нашем случае имелась возможность оценить параметры микроструктуры по измерению уширения дифракционных отражений.

Рентгеноструктурный анализ проводился на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М с использованием характеристического излучения железного анода рентгеновской трубки (25 кВ, 5 мА) с выделением  $\lambda_{K\alpha}$  - спектральной линии образца и детектора по методу фокусировки Брэгга-Брентано [6]. При этом скорость движения детектора равнялась 1 град/мин, время интегрирования рентгеновских квантов – 5 с. Измерение положения дифракционных максимумов выполнялось с точностью  $\Delta(2\theta) = \pm 0,02$  градуса, чему соответствует ошибка в определении межплоскостных расстояний  $d - \Delta d = \pm 0,001$  Å. Образцы для исследования из стали 45 имели форму цилиндра, с диаметром 6 мм и высотой 6 мм. На рабочей поверхности

каждого образца был нанесен материал электрода методом электроакустического напыления. В качестве эталона был взят образец без напыления из материала электродов.

Профили дифракционных отражений для эталона (а) и для рабочих образцов (б - е) при напылении электродом из стали 45, приведены на рисунке 1.

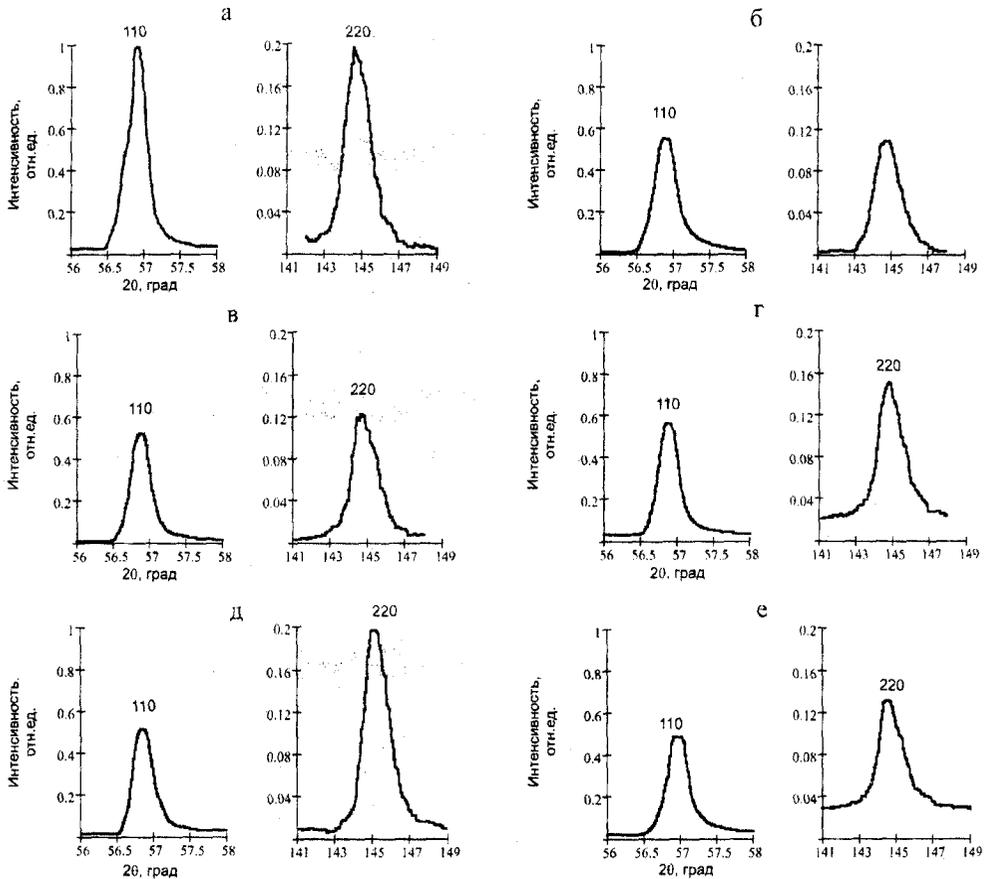


Рисунок 1 – Профили дифракционных отражений: а) крупнокристаллического эталона; б) напыленного образца ( $U=17 В$ ,  $A = 5 мкм$ ); в)  $U=13 В$ ,  $A = 15 мкм$ ; г)  $U=13 В$ ,  $A = 10 мкм$ ; д)  $U=13 В$ ,  $A = 5 мкм$ ; е)  $U=9 В$ ,  $A = 15 мкм$ .

Во всех случаях варьировались электрическое напряжение, подводимое к электродам ( $U$ ) и амплитуда ( $A$ ) ультразвуковых колебаний.

Процентное содержание аморфной фазы оценивалось по отношению интенсивностей пиков образца и эталона (без учета текстурной компоненты). По экспериментальным данным было установлено, что исследуемые образцы представляют собой  $\alpha - Fe$ . Величина физического уширения линий дифрактограммы, обусловленная дисперсностью блоков частиц была найдена методом Шеррера-Вилсона [7]. Расчетные значения физического уширения  $\beta$ , межплоскостного расстояния  $d$ , параметра решетки  $a$  и размер ОКР для рефлексов  $\langle 110 \rangle$  и  $\langle 220 \rangle$  представлены в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, наблюдается заметное уширение дифракционных пиков. Данное уширение вызвано, по нашему мнению, в гораздо большей степени дисперсность кристаллитов, чем возникающими в поверхностном слое микронапряжениями. Такой вывод основан на предварительной оценке, проведенной по методу Уоррена-Авербаха [8] с разделением вкладов от обоих факторов. Кроме того, происходит небольшое (на сотые доли градуса) смещение положения центра тяжести пиков на дифрактограммах и увеличение параметра решетки  $a$  в диапазоне 1,14 – 1,16 %.

Таблица 1 – Расчетные параметры кристаллической структуры и данные дифрактограмм

Параметр/ образец	Рефлекс											
	<110>						<220>					
	б	в	г	д	е	Эт.	б	В	г	д	е	Эт.
$\beta \cdot 10^{-3}$ , рад.	2.00	1.7	1.69	1.80	1.94	1.38	8.46	8.33	8.61	8.86	10	8.05
$2\theta$ , град.	56.915	56.85	56.925	56.875	56.975	57.1	144.65	144.6	144.775	144.925	144.525	144.3
$d$ , Å	2.025	2.027	2.024	2.026	2.023	2.018	1.012	1.0128	1.0125	1.0121	1.0131	1.0128
$a$ , Å	2.8552	2.8580	2.8538	2.8566	2.8524	2.8464	2.8538	2.8560	2.8552	2.8792	2.8569	2.8569
$D$ , нм	110	129	130	122	113	-	75	76	74	72	63	-
Объемное содержание аморфной фазы, %	58	54	57.4	53.4	50	-	58	74	80	97	78	-

Зависимость величины физического уширения от величины параметра решетки при варьировании напряжения, подводимого к электроду, и амплитуды ультразвуковых колебаний приведена на рисунке 2.

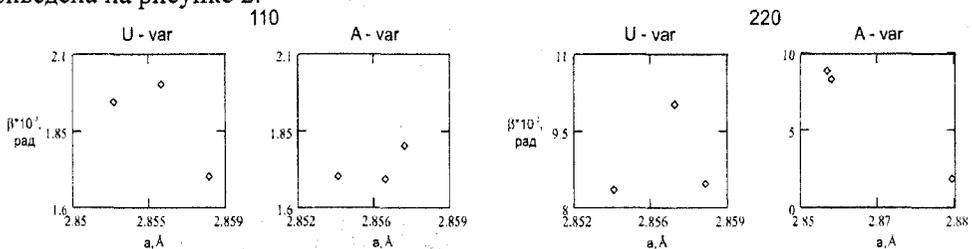


Рисунок 2 – Зависимость параметра решетки  $a$  от величины физического уширения  $\beta$  при варьировании технологических режимов

Как видно, зависимости на рисунке 2 нельзя считать однозначными, т.е. делать вывод о росте или уменьшении  $a$  при изменении технологических параметров, однако с увеличением физического уширения величина  $a$  однозначно возрастает. Аналогичное явление наблюдается для оксидов, т.е. при увеличении физического уширения дифракционных пиков, вызванного уменьшением размеров кристаллитов, наблюдается увеличение параметров решетки [8].

Неоднозначное изменение величины  $a$  в зависимости от технологических параметров является характерным для нанокристаллических металлов вообще [1] и зависит от метода их

получения. Зависимости параметров микроструктуры от технологических параметров представлены на рисунке 3.

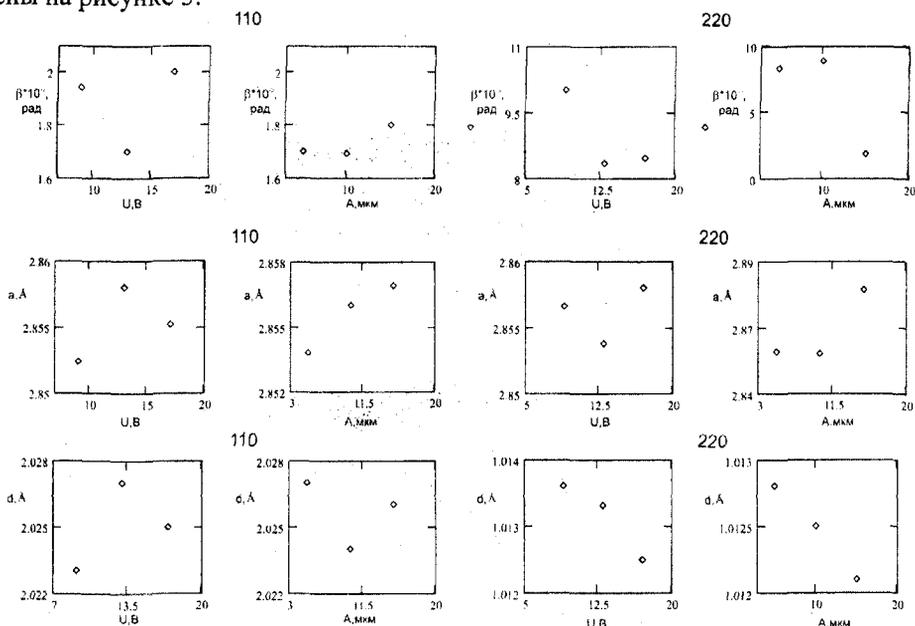


Рисунок 3 – Зависимость параметров микроструктуры от технологических режимов

Выше приведенные факты являются прямым свидетельством наличия в напыленном слое наноразмерного эффекта [1], что подтверждается расчетным размером ОКР. Также легко видеть, что величины размеров ОКР для рефлексов  $\langle 110 \rangle$  и  $\langle 220 \rangle$  заметно расходятся, как и процентное содержание аморфной фазы, что вызвано, по всей видимости, наличием значительного угла разориентирования развитой мозаичной структуры кристаллов.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, в данной работе показана перспективность использования метода ЭЛАН для получения наноструктур в поверхностном слое напыленных образцов. Основываясь на полученных результатах, можно заключить, что имеется определенный разброс величины ОКР и параметров решетки, не имеющий определенной тенденции и вызванный варьированием режимов напыления.

Поэтому необходимы дальнейшие экспериментальные исследования, для выявления наиболее благоприятных режимов получения наноструктур (варьирование параметров технологического процесса и материалов) и визуальной оценки микроструктуры напыляемого слоя (электронная микроскопия).

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев, А.И. Нанокристаллические материалы [Текст] / А.И. Гусев, А.А. Ремпель. - М.: Физматлит, 2000. - 223 с.
2. Валиев, Р.З. Наноструктурные материалы, полученные методом интенсивной пластической деформации [Текст] / Р.З. Валиев, И.В. Александров. - М.: Логос, 2000. - 272 с.
3. Минаков, В.С. Разработка комплексных механических и электрофизических процессов обработки на основе использования энергии трансформируемых ультразвуковых колебаний [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук - Ростов н/Д, 1989. - 350 с.

4. Кочетов, А.Н. Барьерно-дислокационный механизм упрочнения деталей машин методом электроакустического напыления [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / А.Н. Кочетов. - Ростов н/Д, 1996. - 185 с.
5. Минаков, В.С. Влияние материалов с различными физико-механическими свойствами на износостойкость режущего инструмента, упрочненного методом электроакустического напыления [Текст] / В.С. Минаков, В.Х. Аль-Тибби, Д.Д. Дымочкин, Д.А. Чиликин // 9-я междунар. практ. конф. «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки». - Санкт-Петербург, 2007.
6. Усманский, Я.С. Физика металлов [Текст] / Я.С. Усманский, Ю.А. Скаков. - М., Атомиздат, 1978. - С. 45.
7. Вишняков, Я.Д. Современные методы исследования структуры деформированных кристаллов [Текст] / Я.Д. Вишняков. - М.: Металлургия, 1975.
8. Горелик, С.С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ [Текст] / С.С. Горелик, Ю.А. Скаков, Л.Н. Расторгуев. - М.: МИСИС, 1994.
9. Кофанов, Н.Б. О размерных эффектах в титанате бария [Текст] / Н.Б. Кофанов, Ю.А. Куприна, М.Ф. Куприянов // Изв. АН, сер. физ., 2002. - т.66ю - №6ю - С. 839-841.

**Висам Хусамович Аль-Тибби**

Кандидат технических наук, доцент  
ФГОУ ВПО «Донской государственный  
технический университет»  
Тел.: +7-918-580-34-89  
E-mail: [nb1979@mail.ru](mailto:nb1979@mail.ru)

**Владимир Николаевич Анисимов**

Доцент  
ФГОУ ВПО «Донской государственный технический  
университет»  
Тел.: (863)2381564  
E-mail: [nb1979@mail.ru](mailto:nb1979@mail.ru)

**Валентин Степанович Минаков**

Доктор технических наук, профессор  
ФГОУ ВПО «Донской государственный технический  
университет»  
Тел.: (863)2381564  
E-mail: [nb1979@mail.ru](mailto:nb1979@mail.ru)

**Андрей Николаевич Кочетов**

Кандидат технических наук, доцент  
ФГОУ ВПО «Донской государственный технический  
университет»  
Тел.: (863)2381564  
E-mail: [nb1979@mail.ru](mailto:nb1979@mail.ru)

W.H. AL-TIBBI, V.S. MINAKOV, V.N. ANISIMOV, A.N. KOCHETOV

**ABOUT NANOSIZE EFFECT AT HARDENING OF MACHINE PARTS BY  
THE METHOD OF ELECTROACOUSTIC COATING  
WITH AUTOMATIVE EQUIPMENT**

*Researches of electroacoustic coating technological modes influence on crystalline grid parameters. X-ray analysis was used for researches of crystal structure.*

**Key words:** *electroacoustic coating, nanosize effect, crystalline grid parameter, X-ray analysis.*

**BIBLIOGRAPHY**

- [1] Gusev, A.I. Nanokristallichesky materials [Text] / A.I. Gusev, A.A. Rempel. - Moscow: Fizmatlit, 2000. - 223 p.
- [2] Valiev, R. Z. Nanostructured materials received by a method of intensive plastic deformation [Text] / R.Z. Valiev, I.V. Alexandrov. - Moscow, Logos, 2000. - 272 p.
- [3] Minakov, V. S. Mechanical and electrophysical processes complex of work out on the basis of transformed ultrasonic fluctuations energy using [Text] : The dissertation of a Dr.Sci.Tech / V.S. Minakov. - Rostov on Don, 1989. - 350 p.
- [4] Kochetov, A.N. Bordered-dislokational gear of cars details hardening by a method of an electro-acoustic dusting [Text] : The dissertation of a Dr.Sci.Tech / A.N. Kochetov. - Rostov on Don, 1996. - 185 p.
- [5] Minakov, V. S. Influence of materials with various physicomachanical properties on wear resistance of the cutting tool strengthened by a method of an electro-acoustic dusting [Text] / V. S. Minakov, V. H. Al-Tibbi, D.D. Dymochkin, D.A. Chilikin / 9th international practical conference «Technologies of repair, restoration and hardening of details of cars, gears, the equipment, the tool and industrial equipments» - Saint-Petersburg, 2007.
- [6] Usmanskiy, J.S. Physics of metals [Text] / J.S. Usmanskiy, Ju.A. Skakov. - Moscow, Atomizdat, 1978. P. 45.
- [7] Vishnyakov, Ja.D. Modern methods of deformed crystals structure probe [Text] / Ja.D. Vishnyakov. - Moscow: Metallurgiya, 1975.
- [8] Gorelik, S.S. Radiographic and electron-optical analysis [Text] / S.S. Gorelik, J.A. Skakov, L.N. Rastorguev. - Moscow: MISIS, 1994.

[9]Kofanov, N.B. About dimensional effects in титанате барium [Text] / N.B. Kofanov, J.A. Kuprina, M.F. Kuprijanov // News of academy of Sciences, series of the physicists. – 2002 - p.66 - №6. - Pp. 839-841.

**Wisam Husamovich AL-Tibbi**

Candidate of technical sciences, senior lecturer

«Don State Technical University»

Phone: +7-918-580-34-89

E-mail: [nb1979@mail.ru](mailto:nb1979@mail.ru)

**Valentin Stepanovich Minakov**

Doctor of technical sciences, professor

«Don State Technical University»

Phone.: : (863)2381564

E-mail: [nb1979@mail.ru](mailto:nb1979@mail.ru)

**Vladimir Nikolaevich Anisimov**

Senior lecturer

«Don State Technical University»

Phone: (863)2381564

E-mail: [nb1979@mail.ru](mailto:nb1979@mail.ru)

**Andrey Nikolaevich Kochetov**

Candidate of technical sciences, senior lecturer

«Don State Technical University»

Phone: (863)2381564

E-mail: [nb1979@mail.ru](mailto:nb1979@mail.ru)

УДК 621.7.043

Е.Г. БЕРДИЧЕВСКИЙ

## **ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ХУДОЖЕСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ**

*Рассмотрены инновационные технологии художественной обработки металлов. Рекомендованы лазерная гравировка, сверхпластическое формообразование, применение наноматериалов.*

*Ключевые слова: инновационные технологии, лазерная обработка, сверхпластичность, нанотехнологии, наноматериалы.*

Технологии художественной обработки металлов (ХОМ) в ряде случаев существенно отличаются от традиционных технологий металлообработки. Отличие вызвано различием в требованиях к технологическим процессам. При ХОМ на первый план выступает такое требование как обеспечение эстетических показателей изготавливаемого изделия и, в первую очередь, его внешних поверхностей. Структура эстетических показателей качества, которые должны обеспечиваться соответствующими технологиями, представлена на рисунке 1. Номенклатура художественных изделий, изготавливаемых на металлообрабатывающих производствах, широка. Здесь и товары культурно-бытового назначения (часы, музыкальные инструменты, сувениры, ордена и медали, столовые приборы, металлические игрушки и др.). Часто высокие эстетические требования предъявляются к изделиям медицинского назначения, к спортивным и канцелярским товарам. Чаще всего, производство художественных изделий мелко- или среднесерийное. Массовое тиражирование художественных изделий встречается редко, в качестве примера можно привести изготовление обручальных колец, металлических денег, некоторых автомобильных аксессуаров, светильников.

Учитывая вышеизложенное, проблема поиска и внедрения инновационных технологий ХОМ весьма актуальна. Анализ технической информации и результатов работы ряда научных коллективов позволил выделить пять инновационных технологий, использование которых наиболее целесообразно в ХОМ: лазерное гравирование, листовая формовка в условиях сверхпластичности, полирование наноалмазными материалами, использование смазочно-охлаждающих средств с наномодификаторами трения, применение наноматериалов для механохимической защиты декора и рельефа изделия.

Современные лазерные технологии позволяют создавать на металле графические изображения (плоские или рельефные) различных цветовых оттенков. Отечественные лазерные комплексы ДМОРК – 06 (производства ООО «Центр Лазерных Технологий», СПб) и система прецизионной лазерной гравировки ДИО – Маркер Д10 (производства ООО «Лазерный центр», СПб) показали высокую эффективность при декоративной отделке металлических

поверхностей [1]. Это оборудование обладает достаточно протяженной зоной изменения удельной мощности, где наблюдается плавление поверхностного слоя, что обеспечивает получение большей цветовой палитры. Эти лазерные комплексы позволяют получать высококачественное углубленное изображение даже на металлах с высокой теплопроводностью. В обоих комплексах использовалась инновационная полупроводниковая система накачки лазерного излучателя, расположенного в сканирующей головке. Характеристики системы сканирования вышеуказанных комплексов следующие [1]:

1) Тип лазера	волоконный
2) Тип гальванометрического сканатора	Ст325ДГ
3) Зона обработки, мм <sup>2</sup>	100×100
4) Скорость обработки, мм/с	1÷2500
5) Разрежение, мкм	2,5
6) Глубина фокусировки, мм	до 3
7) Воспроизводимость, мкм	5



Рисунок 1 - Структура эстетических показателей качества изделий художественного назначения

Цветные оксидосодержащие структуры при лазерном облучении возникают в режиме плавления. Вариацией технологических параметров можно оптимизировать процесс лазерной гравировки для конкретной ситуации.

Инновационной следует признать технологию лазерного гравирования стали по покрытиям с последующим оксидированием [2]. Показано, что при скорости движения луча лазера до 40 мм/с, при частоте модуляции в диапазоне от 2 до 6 кГц и силе тока не менее 32 А обеспечивается полное удаление никелевого покрытия толщиной до 8 мкм, а также двойного покрытия (никель-нитрид титана). При последующем оксидировании достигается черный насыщенный фон изображения. Эстетически приемлемая шероховатость обработанной лазером поверхности составляет  $R_{max} = 20$  мкм и достигается при скорости движения луча свыше 10 мм/с. Четкость линий воспроизводимого рисунка достигается при диаметре луча лазера не более  $0,03 \pm 0,05$  [2]. Технология успешно апробирована при гравировальной отделке охотничьих ружей.

Известная технология обработки металлов давлением в условиях сверхпластичности обычно реализуется при объемной штамповке. Применительно к проблемам изготовления художественных изделий это технология адаптирована под листовую сверхпластическую формовку и являются инновационной [3,4]. Сущность технологии заключается в следующем: тонколистовые заготовки с мелкозернистой структурой нагреваются до температуры проявления эффекта сверхпластичности (например, латуни до  $500\div 700^{\circ}\text{C}$ ) и деформируются по форме матрицы за счет давления сжатого газа ( $0,5 \div 2$  МПа). Деформация в режиме сверхпластичности позволяет формировать сложный высокохудожественный рельеф с использованием сравнительного простого технологического оборудования. Технологический процесс предусматривает вычленение из дизайна изделия особо трудно деформируемых элементов рельефа (сфера и угловой рифт), которые требуют наибольшего давления и времени деформирования. Продолжительность процесса сверхпластического формования сложного художественного рельефа высокого качества проработки может составлять до 60 мин при давлении формообразования до 1,25 МПа. Увеличение указанных режимов может привести к исчезновению эффекта сверхпластичности из-за структурных превращений в деформируемом металле.

*Описываемой технологией можно формировать высокохудожественный рельеф с утонением элементов рельефа до 0,2 мм, а также элементов с угловыми размерами от 10 до 120 градусов. Традиционной чеканкой достичь подобные показатели качества формования часто невозможно.*

При формировании художественного профиля из высоколегированных сталей, когда эффект сверхпластичности труднодостижим или невозможен, можно рекомендовать такую инновационную технологию как электрогидроимпульсная штамповка [5].

Полирование является одной из ведущих технологий в процессах ХОМ, так как обеспечивает не только требуемую микрогеометрию поверхности, но и такие эстетические характеристики как блескость, зеркальность, матовость, восприимчивость к декоративным покрытиям. Полированием можно, в зависимости от замысла дизайнера, вскрыть или затушевать фактуру и текстуру материала.

Традиционные технологии полирования, используемые в общем машиностроении, часто мало эффективны при изготовлении художественных изделий. Инновационным решением является использование в полировальных композициях нанокремниевых алмазов [6], являющиеся лидером среди наноматериалов.

Наноалмазная шихта – первичный продукт детонационного синтеза, представляет собой однородный порошок черного цвета [8]. Коэффициент поглощения света составляет 99 % от абсолютно черного тела. Содержание наноалмазов  $30\div 60$  %.

#### **Характеристики наноалмазов**

Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$	400÷500
Насыпная плотность, $\text{г}/\text{см}^3$	0,4÷0,6
Психометрическая плотность, $\text{г}/\text{см}^3$	3,0÷3,3
Средний размер монокристаллов, нм	120÷140
Заряд частиц	отрицательный
Температура начала окисления на воздухе, $^{\circ}\text{C}$	350
Температура начала графитизации в вакууме, $^{\circ}\text{C}$	900
Постоянная кристаллической решетки	$0,373\div 0,0005$
Размер области когерентного рассеяния, $\text{Нм}^2$	10

Кластерные частицы наноалмазов агрегатированы в сложные фрактальные структуры, величина которых, а также их коллоидные свойства, в сильной степени зависят от способа приготовления и состава жидкой дисперсионной среды. Наноалмазы обладают сильным структурирующим влиянием на полировальную композицию уже в количестве  $0,1\div 0,3$  масс. %.

Фрактальная структура наноалмазов способствует эффективному рассеиванию локальных нагрузок, возникающих при сближении рабочих поверхностей полировальника и обрабатываемых материалов от деформаций и напряжений в приповерхностном слое. При соответствующем подборе режимов обработки и материалов полировальников на большинстве станков и на всех обрабатываемых материалах наблюдается выравнивание рельефа с образованием высокоэстетичной зеркальной поверхности разного уровня блескости и без микродефектов. Установлено [6], что с уменьшением величины наноалмазных частиц с 1 мкм до 3-5 нм протекают несколько процессов:

- 1) Уменьшение шероховатости поверхности;
- 2) Химико-механическое полирование химически-активными полировальными композициями наноалмазов;
- 3) Переход от пластической деформации материала (анизотропное удаление) к напцарапанию.

Преимущества полирования наноалмазными композициями столь существенны, что, как показали наши расчеты, перекрывают относительно высокую стоимость наноматериалов.

Использование наноматериалов в качестве модификаторов трения в смазочно-охлаждающих средах на таких операциях как горячая штамповка и шлифование существенно смягчает тепловой режим обработки и тем самым уровень дефектности обрабатываемых поверхностей [7]. Внедрение в практику наноматериалов облегчается при их использовании в микрокапсулированной форме. Кроме того, исследования показали, что вместо относительно дорогостоящих наноматериалов на основе фуллеренов  $C_{60}$  –  $C_{70}$  вполне можно использовать дешевую фуллереновую чернь [7].

Сохранение художественного рельефа и декоративного изображения на металлической поверхности является ответственной процедурой. Традиционно защита внешней поверхности изделия заключалась в нанесении гидрофобизирующего слоя. Данная технология ненадежна, так как через короткое время защитный гидрофобизирующий слой растрескивается. Шелушение защитного слоя наносит дополнительные повреждения поверхности. Инновационным решением является использование в качестве защитного покрытия сверхтонких пленок наноматериалов – фуллеренов на основе водорастворимых полимеров [8]. Стабилизирующий эффект фуллеренового покрытия основан на том, что фуллереновый фрагмент действует как акцептор свободных радикалов и тем самым прерывает процессы радикального окисления (коррозии) и деструкции материала поверхности. Такой механизм действия сверхтонкого (вплоть до молекулярного) покрытия не требует, как показали исследования, сохранения его полной целостности. Даже при наличии трещин и непокрытых участков поверхности защитные свойства покрытий сохраняются.

## **ВЫВОДЫ**

Рассмотренные инновационные технологии на основе лазерной гравировки, эффектов сверхпластичности и наноматериалов весьма перспективны и рекомендованы к использованию при художественной обработке металлов.

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Государственный университет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).*

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Афонькин, М.А. Анализ технологических возможностей лазерно-гравировальных комплексов [Текст] / М.А. Афонькин, Е.Д. Ларионова, С.В. Горный // Фототехника. - 2010. - №5. - С. 4-10.
2. Матюшина, А.Э. Исследование влияния лазерного воздействия на покрытия при гравировании орнаментов на стали [Текст] / А.Э. Матюшина, М.М. Черных // Дизайн. Материалы. Технология. – 2007. - №2(3). - С. 74-77.
3. Целин, М.А. Оценка условий работы оснастки и инструмента при их нагреве и сверхпластической формовке изделий с художественным рельефом / М.А. Целин [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. - 2005. - №11. - С.28-37.

4.Коровкин, О.Н. Совершенствование дизайна и технологии изготовления рельефа художественных изделий листовой сверхпластической формовкой [Текст] : автореферат дис. ... канд. / О.Н. Коровкин. - Киров, 2007. - 23 с.

5.Земцов, М.И. Оценка предельной степени формообразования при электрогидроимпульсной формовке из трубчатых заготовок тонкостенных многогранных деталей [Текст] / М.И. Земцов // Дизайн. Материалы. Технология. - 2010. - №2. - С.45 - 49.

6.Долматов, В.Ю. Современная промышленная технология получения детонационных наноалмазов и основные области их использования [Текст] / В.Ю. Долматов // Труды международной научно-практической конференции «Нанотехнологии – производству 2006». - Фрязино, 2006. – С.113-151.

7.Бердичевский, Е.Г. Модификаторы трения как основа смазочных композиций для металлообработки [Текст] / Е.Г. Бердичевский // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2010. - №5(283) – С.43-46.

8.Зуев, В.В. Сверхтонкие фуллереновые покрытия для защиты памятников архитектуры [Текст] / В.В. Зуев // Труды международной научно-практической конференции «Нанотехнологии – производству - 2006». - Фрязино, 2006. – С.249-251.

**Евсей Григорьевич Бердичевский**

Кандидат технических наук, профессор

ФГОУ ВПО «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого»

Тел.: 8(816) 62-66-14

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

---

E.G. BERDICHEVSKY

**INNOVATIVE TECHNOLOGIES OF ART PROCESSING OF METALS**

*Considered innovative technologies of artistic processing of metals. Recommended by laser engraving, superplastic forming, the use of nanomaterials.*

**Key words:** *innovative technologies, laser treatment, superplasticity, nanotechnology, nanomaterials.*

**BIBLIOGRAPHY**

[1]Afonkin, M.A. Analiz of technological possibilities of laser and engraving complexes [Text] / M.A. Afonkin, E.D. Larionov, S.V. Gorny // Photoequipment. - 2010. - №5. – Pp. 4-10.

[2]Matyushina, A.E. Investigation of the effect of laser irradiation on the cover for engraving on steel ornament [Text] / A.E. Matyushina, M.M. Cherny // Design. Materials. Technology. – 2007. - №2 (3). – Pp. 74-77.

[3]Tsepin, M.A. Assessment of the condition of the equipment and tools at their heating and superplastic forming of products with artistic relief [Text] / M.A. Tsepin, [etc.] // Forging and stamping production. - 2005. - №11. - Pp. 28-32.

[4]Korovkin, O.N. Improvement of design and manufacturing techniques of a relief of art products sheet superplastic formovka [Text] : Author's abstract edging. Dissertations / O.N. Korovkin. - Киров, 2007. – 23 p.

[5]Zemtsov, M.I. An assessment of limiting degree of a formoobrazovaniye at an electrohydropulse formovka from tubular preparations of thin-walled many-sided details [Text] / M.I. Zemtsov // Design. Materials. Technology. - 2010. - №2. - Pp. 45-49.

[6]Dolmatov, V.U. Modern industrial technology of receiving detonation nanodiamonds and main areas of their use [Text] / V.U. Dolmatov // Works of the international scientific and practical conference «Nanotechnologies – to production 2006». - Fryazino, 2006. – Pp. 113-151.

[7]Berdichevsky, E.G. Friction modifiers as a basic of lubricant compositions for metal working [Text] / E.G. Berdichevsky // Fundamental and Applied Problem of Engineering and Technology. - 2010. - №5 (283). - Pp. 43-46.

[8]Zuyev, V.V. Superthin fullerenny coverings for protection of monuments of architecture [Text] / V.V. Zuyev // Works of the international scientific and practical conference «Nanotechnologies – to production - 2006». - Fryazino, 2006. – Pp. 249-251.

**Evsey Grigoryevich Berdichevsky**

Can. Sc. Tech., Prof., Chief of department

“Artistic and plastic material processing”

Novgorod Yaroslav Mudry State University

Phone: 8(816) 62-66-14,

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

---

## К ВОПРОСУ О ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОГРЕССИВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖУЩИХ ПЛАСТИН

*В статье рассматриваются вопросы проектирования сменных многогранных пластин прогрессивных конструкций. Описывается экспресс-методика определения положения стружкозавивающих элементов на передней поверхности, обеспечивающих устойчивое дробление стружки. Предлагаются многофункциональные конструкции режущих пластин с дискретной режущей кромкой*

**Ключевые слова:** резание металлов, сменная многогранная пластина (СМП), передняя поверхность, режущая кромка, дробление стружки

Возможности современного инструментального производства снимают технологические ограничения формирования формы режущей кромки сменных многогранных пластин (СМП), которые существовали ранее. Это позволяет проектировать поверхности режущих пластин принципиально новых конструкций, в том числе решая вопросы с выбором новых форм, как передней, так и задней поверхностей и, соответственно, режущей кромки.

В условиях современного машиностроения в автоматизированном производстве при организации процесса механической обработки материалов, которые обладают высокими эксплуатационными характеристиками, а при точении дают сливную стружку, повышается необходимость решения задачи обеспечения дробления стружки.

В общем случае, передняя поверхность современных СМП, которые выпускают как отечественные, так и зарубежные фирмы-производители твердосплавного инструмента, состоит из сопряженных между собой вогнутых, плоских и выпуклых участков. Каждый из этих участков может быть непрерывным, т.е. располагаться по периметру режущей кромки, или локальным - отдельно стоящим в строго определенном месте. Форма, размеры и месторасположение отдельных участков передней поверхности СМП, определяются функциями, которые они выполняют в процессе срезания припуска. Каждый из таких участков может одновременно выполнять одну или несколько функций в процессе резания или менять их при изменении условий обработки. Однако методики проектирования передней поверхности СМП являются секретами фирмы изготовителя и не доступны для отечественных производителей.

В Тульском государственном университете разработан экспресс-методика проектирования передней поверхности СМП, в основе которой положен принцип коррекции существующей формы передней поверхности для условий конкретного производства.

Известно, что для чистовых режимов обработки изменение «установочного» главного угла в плане  $\phi$  для СМП стандартного исполнения при выполнении условия  $t \leq R$  не приводит к изменению параметров поперечного сечения срезаемого слоя. При этом изменяется положение стружкозавивающих элементов относительно направления схода стружки. Соответственно, изменяются условия контакта стружки со стружкозавивающими элементами, что приводит к изменению параметров витка и траектории ее движения и, как следствие, условий дробления. На рисунке 1 приведены образцы стружки, полученной при чистовом точении заготовки из стали 45X1 резцом, оснащенным пластиной CMNG120408-HF. Анализ образцов стружки показал, что варьирование значением угла  $\phi$  можно использовать как технологический прием, позволяющий управлять параметрами витка стружки и траекторией ее движения, что расширяет потенциально возможный диапазон режимов резания с дроблением стружки. Такой технологический прием положен в основу экспресс-методики проектирования передней поверхности СМП.

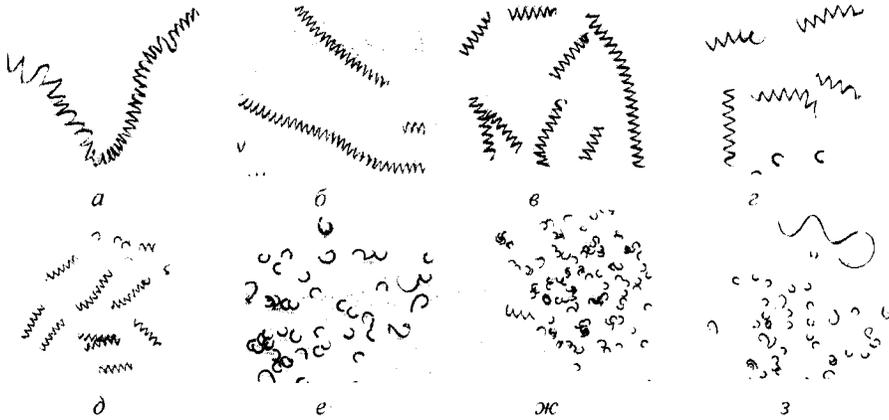


Рисунок 1 - Образцы стружки, полученные при точении стали 45X1 СМП с индексом формы передней поверхности HF с  $v = 204$  м/мин,  $s = 0,15$  мм/об,  $t = 0,5$  мм при  $\phi$ : а - 90°; б - 85°; в - 80°; г - 75°; д - 70°; е - 65°; ж - 60°; з - 55°

Для удобства описания положения поверхностей стружкозавивающего элемента или его отдельных участков предложена система отсчета. В качестве системы отсчета использованы три точки:  $Q$  - центр тяжести фигуры, которую очерчивает поперечное сечение срезаемого слоя;  $\Theta$  - точка пересечения векторов скоростей при различных значениях глубины резания («базовая») (рисунок 2);  $O$  - центр дуги окружности формообразующего участка («опорная»).

Векторы скорости, проведенные из точки  $Q$ , которая совпадает с центром тяжести фигуры, очерченной поперечным сечением срезаемого слоя, пересекаются в точке  $\Theta$ , принадлежащей передней поверхности, которая может рассматриваться, как «базовая» для оценки места расположения локального выступа. Изменение, как глубины резания  $t$  в пределах радиуса  $R$  при вершине СМП, так и подачи  $s$ , не вызывает изменения координат точки  $\Theta$ .

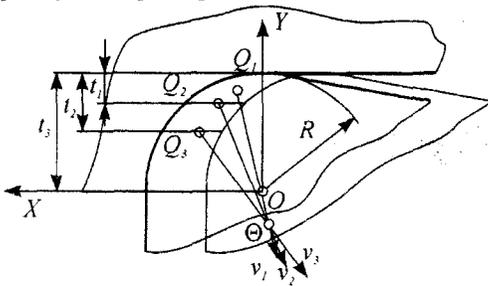


Рисунок 2 - Расчетная схема для определения точки пересечения векторов скоростей при изменении глубины резания

Координаты  $X_Q$  и  $Y_Q$  точки  $Q$  центра тяжести, определяются по зависимостям:

$$X_Q = \frac{I_1}{S}; \tag{1}$$

$$Y_Q = \frac{I_2}{S}, \tag{2}$$

где  $S$  - площадь поперечного сечения срезаемого слоя:

$$S = \frac{s}{2} \sqrt{R^2 - \frac{s^2}{4}} + R^2 \arcsin \frac{s}{2R} - (R-t) \cdot s,$$

где  $s$  - подача;  $t$  - глубина резания;  $R$  - ра-

диус при вершине.

Параметры  $I_1$  и  $I_2$  вычисляется по формулам:

$$I_1 = \frac{s}{2} \left[ -(R-t)(2X_A + s) + \frac{s}{2} \sqrt{R^2 - \frac{s^2}{4}} + X_A \sqrt{R^2 - X_A^2} + R^2 \left( \arcsin \frac{s}{2R} + \arcsin \frac{X_A}{R} \right) \right]; \tag{3}$$

$$I_2 = \frac{s}{2} \left[ \left( X_A + \frac{s}{2} \right)^2 - \frac{s}{3} (s^2 + 3X_A) \right], \tag{4}$$

где  $X_A = \sqrt{2tR - t^2}$ . Координаты  $X_\Theta$  и  $Y_\Theta$  точки  $\Theta$  рассчитывается по зависимостям:

$$X_{\theta} = \frac{k_1 + k_2}{k_3 + k_4}; \quad Y_{\theta} = \frac{k_5}{k_6}.$$

В работе [1] установлены зависимости для определения коэффициентов  $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5$  и  $k_6$ .

Экспресс-методика включает четыре этапа. Первый этап связан с измерением передней поверхности и построением 3D модели конструкции СМП. В качестве исходной конструкции передней поверхности принимается существующая конструкция СМП. Второй этап включает расчет параметров поперечного сечения срезаемого слоя: действительной максимальной толщины и действительной ширины. По зависимостям (1-4) рассчитываются координаты точки  $Q$ , совпадающей с центром тяжести фигуры, которую очерчивает поперечное сечение срезаемого слоя. Определяется положение «базовой» точки  $\Theta$ . По сканированному изображению исходной режущей пластины проводится анализ топографии передней поверхности СМП и выбирается «опорная» точка  $O$  на передней поверхности (рисунок 3). Третий этап включает экспериментальное определение положения стружкозавивающего элемента, обеспечивающего благоприятную форму стружки, при этом используется технологический прием описанный ранее.

На четвертом этапе осуществляется коррекция формы передней поверхности с учетом результатов третьего этапа. Проводится перерасчет результатов измерения профиля передней поверхности, полученных на первом этапе, с учетом системы отсчета и строится 3D модель СМП.

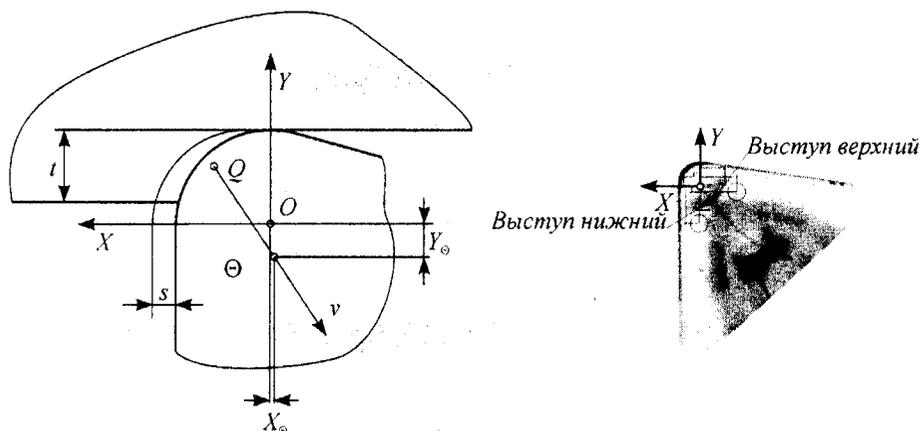


Рисунок 3 - Схема для определения начального положения «опорной» точки

В результате использования экспресс-методики устанавливаются параметры отдельных участков скорректированной формы передней поверхности СМП, которая гарантирует дробление стружки с требуемыми формой и параметрами ее элементов.

Форма задней поверхности обусловлена методами ее получения. Возможность варьирование ее формы до настоящего времени не получило пристального внимания как в теоретических, так и в экспериментальных работах.

Используя принцип условного разделения активной части режущей кромки по ее функциональному назначению были разработаны конструкции СМП, получившие название «Wire» или режущие пластины с «видоизмененной» режущей кромкой [2]. В этом случае, режущая кромка у вершины СМП выполнялась в форме лекальной кривой, состоящей из трех сопряженных дуг окружностей с разными радиусами (рисунок 4).

Однако изменение формы переходного (режущего) участка, с целью обеспечения наиболее благоприятных условий срезания припуска, в ряде случаев, входит в противоречие с рекомендациями по выбору рациональной формы формообразующего участка. Эти проти-

воречия можно исключить, если формировать эти участки режущей кромки независимо друг от друга.

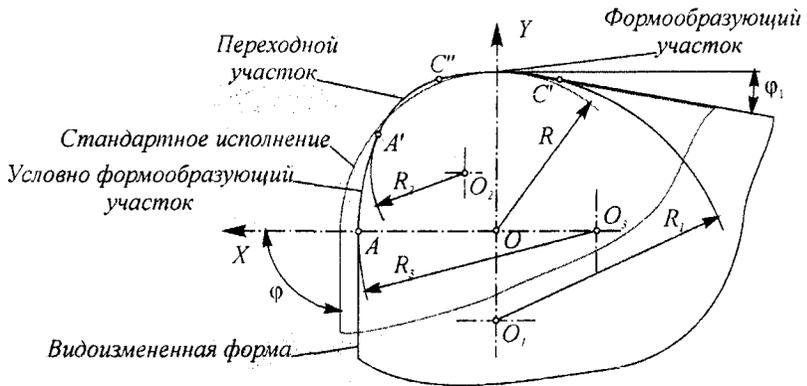


Рисунок 4 - Расчетная схема для определения радиусов формообразующих и переходного участков по первому варианту

В Тульском государственном университете разработана методика проектирования специальных СМП с рациональной формой дискретной режущей кромки с заданным функциональным назначением каждого из ее участков (рисунок 5).

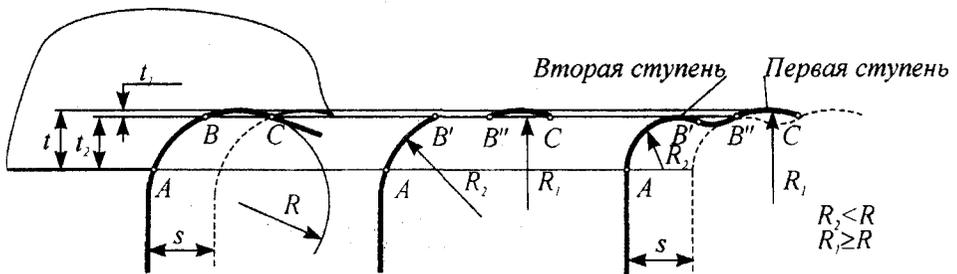


Рисунок 5 - Разделение припуска на два участка

В этом случае, активная часть режущей кромки разделялась на режущий участок  $AB'$ , не участвующий в формировании обработанной поверхности, и формообразующий  $B''C$ , который выполнял функцию формообразования обработанной поверхности. Вершина пластины исполнялась в форме двух ступеней. Припуск  $t$  разделялся на  $t_1$ , срезаемый первой ступенью, и  $t_2$ , удаляемый с поверхности заготовки второй ступенью.

В зависимости от принятой приоритетности тех или иных задач для конкретного производства, выбирались варианты исполнения активной части режущей кромки на каждой из ступеней и устанавливались численные значения параметров  $t_1$  и  $t_2$ .

Выбор значений  $t_1$  и  $t_2$ , устанавливает область использования данной конструкции СМП. Для режущей пластины, получившей название СМП с двумя вершинами, приведенной на рисунке 6, глубина резания  $t_1$  была принята равной высоте гребешков микронеровностей, сформированных второй ступенью

$$t_1 = \frac{s^2}{8R_1},$$

где  $s$  – подача, мм/об;  $R_1$  – радиус первой ступени.

В этом случае СМП имела две симметричные ступени, расположенные относительно друг друга на определенном расстоянии  $L = 1,5s$ .

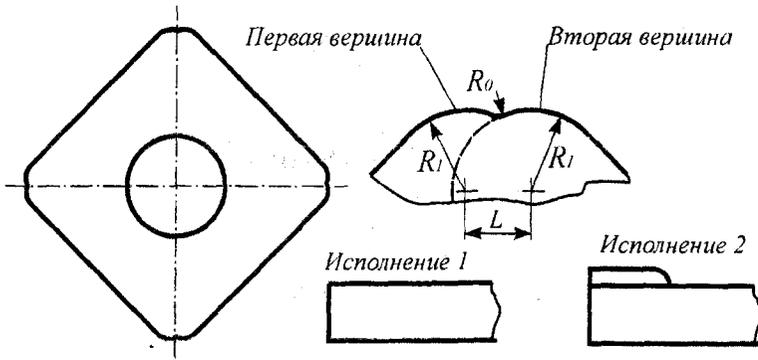


Рисунок 6 - СМП с двумя вершинами

Вторая ступень работала на срезание припуска и формирование микропрофиля обработанной поверхности. Первая ступень деформировала неровности, сформированные первой вершиной. Таким образом, в конструкции СМП с двумя вершинами совмещаются операции чистового точения и выглаживания.

Если глубина резания  $t_1$  принималась равной глубине наклепанного слоя ( $\approx 0,02$  мм), то в этом случае совмещались операции чистового точения и финишной обработки (рисунок 7).

СМП выполнялась с двумя ступенями по лекальной кривой, состоящей из четырех сопряженных дуг окружностей разных радиусов. Первая ступень имела зачистную режущую кромку, а вторая - конструктивные параметры чистовой пластины стандартного исполнения.

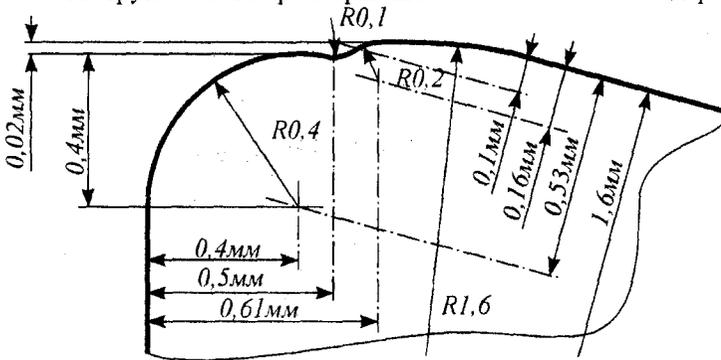


Рисунок 7 - Параметры режущей кромки СМП для чистовой и финишной обработки

СМП такой конструкции позволяет формировать обработанную поверхность с низкой шероховатостью и высокой точностью. Так как ступень с зачистной режущей кромкой работает в условиях предварительно нагруженной технологической системы, финишная обработка осуществляется в наиболее благоприятных условиях. В качестве недостатка конструкции с двумя ступенями и зачистной режущей кромкой следует отметить, что такие СМП можно использовать только для чистового точения на проход.

Если глубина резания  $t_1$  принималась равной 0,5 мм, что соответствует чистовому точению, припуск разделялся на получистовую и чистовую обработки. Одна из вершин выполнялась как у СМП для получистовой обработки, а другая имела форму режущей кромки, характерную для чистовых СМП с радиусом  $R_1$  формообразующего участка (рисунок 8):

$$R_1 = \frac{R_2^2}{32R_2}, \quad (2)$$

где  $R_2$  - радиус режущей кромки второй ступени;  $R_2$  - высота микронеровностей по чертежу детали.

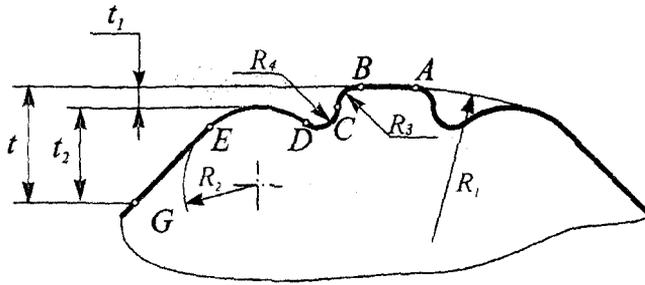


Рисунок 8 - Режущая пластина с двумя ступенями для получистовой и чистовой обработки

В процессе точения вторая ступень вершины режущей пластины работала в условиях получистового точения, формируя поверхность под последующую чистовую обработку, осуществляемую первой ступенью. За один проход в условиях получистовой обработки осуществлялась окончательная обработка поверхности детали. Разделение припуска на получистовую и чистовую обработку позволяло исключить из технологического процесса операцию чистового точения и обеспечить требуемую шероховатость обработанной поверхности при работе с подачей, характерной для получистовых операций.

Если к инструменту предъявлялись повышенные требования по обеспечению виброустойчивости процесса точения, например при растачивании глубоких отверстий в тонкостенных деталях, режущая кромка и на первой и на второй ступенях СМП выполнялась по лекальной кривой, состоящей из пяти сопряженных дуг окружностей разных радиусов, для уменьшения соотношения радиальной и осевой составляющих силы резания.

Проверка работоспособности СМП с дискретной режущей кромкой проводилась при точении сталей групп Р и М. При использовании экспериментальной СМП (рисунок 9) параметр  $Ra$  шероховатости обработанной поверхности деталей из стали 30ХГСА в области подачи  $s > 0,2 \text{ мм/об}$  был 3 раза меньше параметра шероховатости обработанной поверхности, полученного при точении СМП со стандартным исполнением режущей кромки.

При измерении температуры резания методом естественно образующейся термопары, было установлено, что в процессе точения СМП стандартного исполнения температура на 10...15 % выше, чем при использовании СМП с двумя вершинами.

Экспериментально установлено, что разделение тепловых потоков и уменьшение глубины резания, обеспечило повышение стойкости на первой ступени в 2,5 раза по сравнению с СМП стандартного исполнения. При точении пластиной с двумя ступенями нарастание износа на задней поверхности первой ступени происходило равномерно вдоль всей активной части режущей кромки. При точении стандартной пластиной наблюдались проточкины по краям активной части режущей кромки, которые отсутствовали на первой ступени специальной СМП.

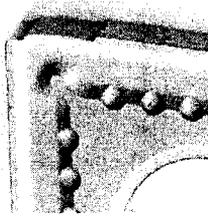


Рисунок 9 - Экспериментальная режущая пластина с дискретной режущей кромкой

При точении стандартной пластиной наблюдались проточкины по краям активной части режущей кромки, которые отсутствовали на первой ступени специальной СМП.

## ВЫВОД

Предложенная экспресс-методика проектирования передней поверхности СМП со стандартным и не стандартным исполнением режущей кромки, позволяет обеспечить для конкретного обрабатываемого материала гарантированное дробление стружки на элементы с заданными формой и размерами. Дискретное исполнение режущей кромки обеспечивает создание многофункциональных конструкции СМП, разделяющих припуск для:

– получистовой и чистовой обработки, которые позволяют повысить производительность за счет минимизации количества операций;

- чистовой и финишной обработки, которые обеспечивают снижение шероховатости;
- обработки с повышенными требованиями к виброустойчивости процесса точения.

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.Благовещенский, А.В. Управление качеством чистового точения на основе выбора рациональной формы и геометрических параметров передней поверхности режущей пластины [Текст] / А.В. Благовещенский [и др.] - Тула: Гриф и К, 2007.– 208 с.

2.Хлудов, С.Я. Механизмы стружкодробления при точении [Текст] / Хлудов С.Я. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2004. – 152 с.

### **Олег Игоревич Борискин**

Доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет»  
Тел. (4875) 33-24-30, 33-25-38  
E-mail: [imstulgu@pochta.ru](mailto:imstulgu@pochta.ru)

### **Георгий Анатольевич Нуждин**

Руководитель органа по сертификации  
ООО «Консерсиум»  
Тел. (499) 237-92-17  
E-mail: [imstulgu@pochta.ru](mailto:imstulgu@pochta.ru)

### **Сергей Викторович Зябрев**

Генеральный директор  
ООО «Щекинский завод РТО»  
Тел. (48751) 4-42-94  
E-mail: [rto@home.tula.net](mailto:rto@home.tula.net)

### **Сергей Яковлевич Хлудов**

Доктор технических наук, доцент  
ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет»  
Тел. (4875) 33-24-30, 33-25-38  
E-mail: [Freedom100000@yandex.ru](mailto:Freedom100000@yandex.ru)

O.I. BORISKIN, S.V. ZJABREV, G.A. NUZH DIN, S.Y. HLUDOV

## TO THE QUESTION ON PROGRESSIVE CONSTRUCTION MULTIPURPOSE CUTTING INSERTS PROJECTIONS

*The question considered in article is projection of replaceable many-sided inserts of progressive designs. The express technique of definition of chip-turning elements position on the face of the inser, which providing steady chip-breaking is described. Multipurpose designs of cutting inserts with a discrete cutting edge are offered.*

**Keywords:** cutting of metals, a replaceable many-sided inserts, the forward surface, a cutting edge, shaving crushing.

## BIBLIOGRAPHY

[1]Blagoveshchenskij, A.V. A quality management of cutting process on the basis of the rational form and geometrical parameters choice of cutting inserts face [Text] / A.V. Blagoveshchenskij [etc.] - Tula: "Grif & K", 2007. - 208 p.

[2]Hludov, S.J The chip-breaking mechanism in cutting process [Text] / Hludov S.J. - Tula: Publishing house TulGu, 2004. – 152 p.

### **Oleg Igorevich Boriskin**

Dr.Sci.Tech., the professor of  
TSU  
Ph. (4875) 33-24-30, 33-25-38  
E-mail: [imstulgu@pochta.ru](mailto:imstulgu@pochta.ru)

### **Sergey Viktorovich Zjabrev**

The general director of  
"Shhekinskij zavod RTO"  
Ph. (48751) 4-42-94  
E-mail: [rto@home.tula.net](mailto:rto@home.tula.net)

### **George Anatolevich Nuzhdin**

The head of certification department  
Open Company "Consersium"  
Ph. (499) 237-92-17  
E-mail: [imstulgu@pochta.ru](mailto:imstulgu@pochta.ru)

### **Sergey Jakovlevich Hludov**

Dr.Sci.Tech., TSU  
Ph. (4875) 33-24-30, 33-25-38  
E-mail: [Freedom100000@yandex.ru](mailto:Freedom100000@yandex.ru)

## ВЛИЯНИЕ НЕТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И СБОРКИ ДЕТАЛЕЙ НА ОТКЛОНЕНИЯ МЕХАНИЗМА И ЕГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ

В статье рассматривается влияние погрешностей формы и относительного положения сопрягаемых поверхностей деталей при сборке их в узел при действии небольшой силы прижима, ориентирующей детали. Экспериментально установлено, что при изготовлении сопрягаемых цилиндрических поверхностей по 9 качеству точности указанные погрешности серьезного влияния не имеют.

**Ключевые слова:** сборка, погрешности формы и размера, точность относительного положения, контактные деформации.

Несмотря на достижения электроники, в высокотемпных автоматических машинах для гарантированного обеспечения их функционирования в самых сложных условиях эксплуатации, используют механическую автоматику. Одним их таких ответственных узлов является спусковой механизм. Конструкция узла спускового механизма, в который входит шептало с крышкой представлена на рисунке 1.

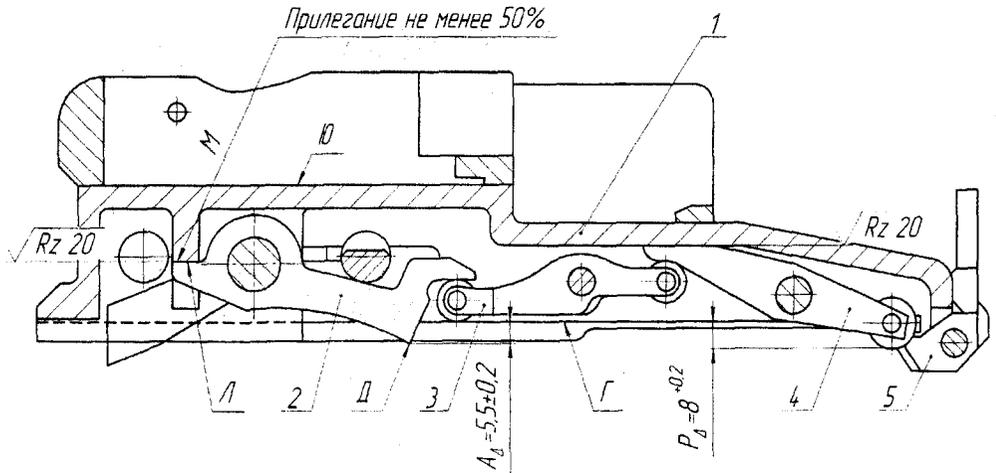


Рисунок 1 - Типовая конструкция спускового механизма

Конструкция спускового механизма (рисунок 1), является типовой. Она включает крышку 1, шептало 2, рычаг шептала 3, рычаг толкателя 4, защелку 5. Техническими условиями на сборку и приемку механизма предусматривается нормированный по кофоти контакт плоскостей  $M$  и  $L$  шептала и базовой детали-крышки (не менее 50 % от номинально площади). Одновременно с этим должен быть обеспечен выход выступа  $D$  правого плеча шептала относительно плоскости крышки  $\Gamma$ , - измерительной базы, на величин  $A_d = 5,5 \pm 0,2$  мм. Обычно техническими условиями на сборку рычажных механизмов предписывается обеспечение нормированного по кофоти контакта одного из плеч с базовой деталью и выход противоположного плеча, относительно той же базовой детали, который задается линейным или угловым размером. Обеспечение предписанных норм точности при изводится слесарной доработкой контактируемой поверхности рычага, а их контроль осуществляется при приложении к нему определенной статической нагрузки. Величина прикладываемой статической нагрузки относительно невелика ( $Q \approx 150$  Н), однако с учетом передаточного отношения плеч рычага на соприкасающихся поверхностях она увеличивает (300...500 Н), вызывая деформацию в стыках и самих деталей. При слесарной доработке рь

чага деформации, возникающие от приложенной силы, учитываются при периодическом контроле выходных параметров.

Обеспечение указанных требований возможно при соблюдении соотношения допусков на размеры крышки -  $B_i$ , размеры шептала, как рычага механизма -  $A_i$  и размеры шептала, как звена-компенсатора, используемые для достижения точности при пригонке -  $K_i$ .

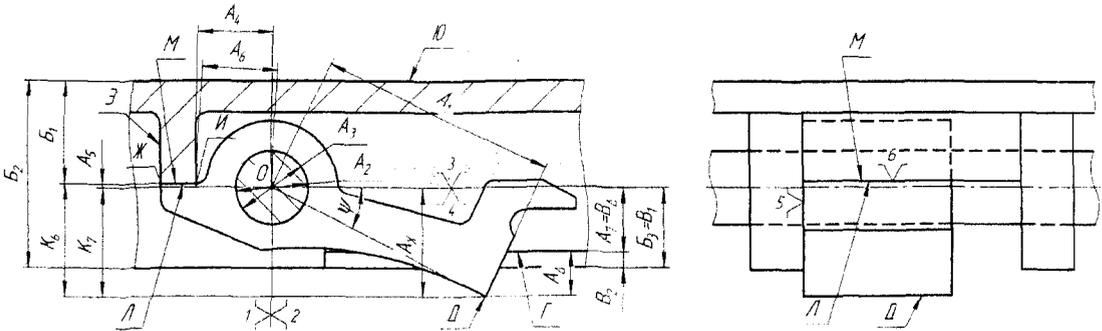


Рисунок 2 - Схема базирования шептала в спусковом механизме

На рисунке 2 размерная цепь шептала включает в себя следующие звенья:

$A_1$  - расстояние от точки  $D$  правого плеча рычага шептала до центра  $O$  пальца.

$A_2$  - диаметр пальца в механизме.

$A_3$  - диаметр отверстия под палец в шептале.

$A_4$  - расстояние от ближайшей точки  $I$ , принадлежащей плоскости  $L$ , до центра пальца  $O$ , измеренное параллельно плоскости  $L$ .

$A_5$  - расстояние от плоскости  $L$  до центра пальца  $O$ , измеренное по нормали к плоскости  $L$ .

$A_6$  - расстояние от ближайшей точки  $I$ , принадлежащей плоскости  $L$ , до центра пальца  $O$ .

$A_x$  - ордината точки  $D$  относительно точки  $O$ .

$A_\Delta$  - выступание точки  $D$  относительно измерительной базы  $\Gamma$ , измеренное по нормали к последней.

Определим условия для выполнения изложенных выше требований. В идеально выполненном механизме контактирование будет происходить по всей поверхности при одновременном выдерживании замыкающего размера  $A_\Delta$ .

Звенья размерной цепи, определяющей возможное раскрытие стыка обозначим буквами  $\Gamma_i$ :

$\Gamma_1 = B_\Delta$  - погрешность вертикального положения центра отверстия под палец в крышке.

$\Gamma_2 = B_4$  - горизонтальная координата центра пальца относительно поверхности  $\Xi$ , являющейся вспомогательной базой.

$\Gamma_3$  - расстояние от плоскости  $M$  до центра пальца  $O$ .

$\Gamma_4$  - расстояние от точки  $I$  контакта плоскостей  $M$  и  $L$ , измеренное параллельно плоскости  $M$  (рисунок 3).

$\Gamma_5$  - радиальное смещение центра отверстия в шептале относительно оси пальца.

$\Gamma_6$  - ширина поверхности  $L$  (гипотетической поверхности контакта плоскостей  $M$  и  $L$ ).

$\gamma_2$  (рисунок 3) - возможное значение угла раскрытия стыка.

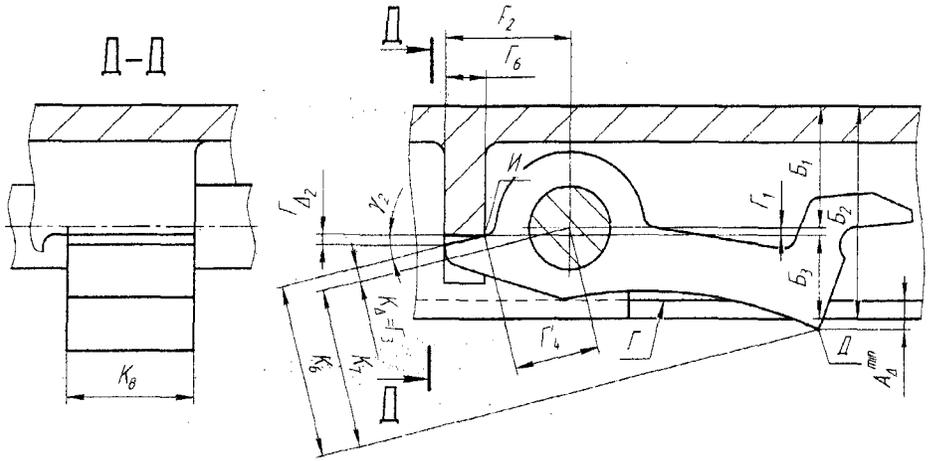


Рисунок 3 - Схема предельного положения шептала

В реальном же механизме, изготовленном с отклонениями, пусть даже небольшими, контакт будет осуществляться по линии. На рисунке 3 показано возможное крайнее положение линий контактирования, обусловленных сочетанием отклонений размеров рычажного механизма. Возникающие в результате неблагоприятного сочетания размеров рычажного механизма раскрытие стыка  $\Gamma_{\Delta}$  и погрешность величины выхода плеча шептала  $\Delta A_{\Delta}$  могут превышать допустимые значения.

На чертежах задаются нормы точности размеров положения и формы поверхностей. При сборке они случайным образом сопрягаются и, взаимно компенсируясь или усиливаясь, влияют на точность замыкающего размера. В нашем случае это выход правого плеча шептала на величину  $A_{\Delta} = 5,5 \pm 0,2$  мм.

Для выявления этого влияния был проведен специальный эксперимент. В эксперименте шептало 1 объединялось с моделью крышки 2 спускового механизма (рисунок 4).

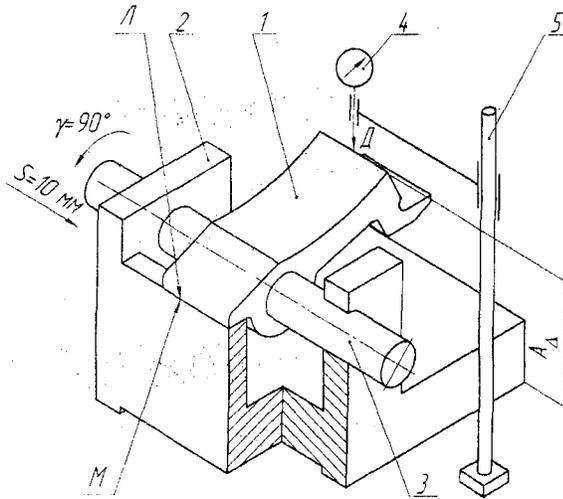


Рисунок 4 - Схема измерения положения точки Д шептала

Базирование шептала производилось с помощью пальца 3, а его угловое положение определялось сопряжением плоскости М с плоскостью крышки Л. Сопряжение пальца в от-

верстиях модели крышки осуществлялось по посадке  $H9/h8$ , сопряжение шептала с пальцем - по такой же посадке  $H9/h8$ . Поверхность  $L$  модели крышки фрезеровалась, обработанная поверхность имела шероховатость  $Rz = 20$  мкм. Шлифованная поверхность  $M$  рычага имела шероховатость  $Rz = 10$  мкм. Схема измерения отклонений относительного положения контрольной точки  $D$  плеча шептала представлена на рисунке 4.

Измерения проводились с помощью индикатора 4 с ценой деления шкалы 0,001 мм, закрепленного на стойке 5. Отклонения положения контрольной точки  $D$  плеча шептала фиксировались в вертикальной плоскости.

Для варьирования условий контакта поверхностей пальца с шепталом и корпусом, измерения отклонений положения контрольной точки  $D$  проводились по следующей схеме:

а - измерение положения контрольной точки - совмещение отметки "0" шкалы со стрелкой индикатора;

б - поворот пальца на  $90^\circ$  - измерение;

в - поворот пальца на  $90^\circ$  - измерение;

г - поворот пальца на  $90^\circ$  - измерение;

д - сдвиг пальца в осевом направлении относительно шептала на 10 мм - измерение;

е - поворот пальца на  $90^\circ$  - измерение и т.д.

Измерение положения контрольной точки  $D$  осуществлялось при приложении силы 5 Н, обеспечивающей беззазорный контакт сопрягаемых поверхностей. Сила, действующая на плечо шептала по направлению стрелки, создавалось с помощью пружины. Наблюдаемые значения случайной величины  $x_i$ , которые определялись при изменении положений контрольной точки  $D$  в десяти моделях, сведены в таблицу.

Таблица - Колебания положений контрольной точки  $D$  в десяти моделях

№ опыта	Изменение относительного положения сопрягаемых поверхностей шептала и пальца [мм <sup>-3</sup> ] положения															
	0°	90°	180°	270°	10мм	90°	180°	270°	20мм	90°	180°	270°	30мм	90°	180°	270°
1	0	2	-1	0	2	-1	1	0	1	1	0	2	0	2	1	1
2	0	+1	0	+0	+1	2	2	0	-1	1	0	1	-1	0	0	-1
3	0	+2	+3	1	1	0	-1	0	1	0	1	0	2	2	1	0
4	0	-1	1	2	-1	2	1	2	0	1	2	0	1	-1	0	1
5	0	2	-1	2	1	1	0	2	1	-1	0	0	1	0	1	1
6	0	3	1	2	2	-1	0	1	1	1	2	0	3	2	1	3
7	0	1	0	1	2	2	3	0	2	1	-1	0	2	2	1	0
8	0	1	1	0	1	0	2	-1	2	1	0	1	2	3	1	0
9	0	1	2	0	1	2	1	2	-1	0	2	1	2	0	2	1
10	0	2	2	1	-1	1	0	0	1	2	1	1	2	3	0	2

Анализ результатов измерения показывает, что несмотря на то, что каждая сборочная модель собиралась из одних и тех же деталей, наблюдалось изменение положения контрольных точек  $D$  при измерении всех десяти моделей. Различие в положении контрольных точек может быть объяснено лишь тем, что, с изменением относительного положения цилиндрической поверхности пальца и поверхностей отверстия в крышке и шептале, их контакт происходил по разным точкам.

В результате менялось относительное положение основных и вспомогательных баз. Статистическая обработка результатов измерения, проведенная по методике, изложенной в работе [1], позволила определить среднее значение случайной величины  $\bar{x} = 0,84$  мкм и ее среднеквадратическое отклонение  $S = 1,078$  мкм. Для определения составляющей допуска

замыкающего звена  $TA_{\Delta\phi}$  следует найти его верхнее  $\Delta_{вA_{\Delta\phi}}$  и нижнее  $\Delta_{нA_{\Delta\phi}}$  предельные отклонения. Возможное рассеивание случайной величины определяем по уравнениям [2]:

$$\Delta_{вA_{\Delta\phi}} = \bar{x} + A_1S \quad (1)$$

$$\Delta_{нA_{\Delta\phi}} = \bar{x} - A_2S \quad (2)$$

Для симметричного распределения по закону Гаусса:

$$A_1 = A_2 = A = \frac{t_{q,k}}{\sqrt{n-1}} + l_v\eta \quad (3)$$

где  $t_{q,k}$  - параметр распределения Стьюдента;

$\eta$  - коэффициент распределения;

$l_v$  - коэффициент;

$n$  - количество измерений.

Значения коэффициента  $l_v$  подсчитаны и приведены в работе [2]. Составляющая допуска замыкающего звена, учитывающая погрешности формы сопрягающихся поверхностей  $TA_{\Delta\phi} = \Delta_{вA_{\Delta\phi}} - \Delta_{нA_{\Delta\phi}} = 0,006\text{мм}$ , что составляет всего около 1,5 % от величины предписанного техническими условиями допуска на размер  $A_{\Delta}$ . Небольшое влияние погрешностей форм и относительного положения сопрягаемых деталей на отклонения замыкающего размера объясняется малым количеством стыков (два), имеющих поверхности небольшой площади при весьма высокой точности обработки.

На основании проведенного расчета можно сделать заключение, что в рычажных механизмах, типичным представителем которых является механизм, изображенный на рисунке 1, нет необходимости вносить поправки, учитывающие погрешности формы сопрягаемых поверхностей, вследствие незначительного их влияния на размер замыкающего звена.

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солонин, И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения [Текст] / И.С. Солонин. - М.: Машиностроение, 1972.- 216 с.
2. Дунаев, П.Ф. Расчет допусков размеров [Текст] / П.Ф. Дунаев, О.П. Леликов. - М.: Машиностроение, 1981. - 189 с.

**Григорьев Игорь Владимирович**  
Тульский государственный университет, г. Тула  
соискатель кафедры «Технология машиностроения»;  
Тел. (84872) 33-23-10  
E-mail: [tms@tsu.tula.ru](mailto:tms@tsu.tula.ru)

**Ямников Александр Сергеевич**  
Тульский государственный университет, г. Тула  
Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения»  
E-mail: [yamnikovas@mail.ru](mailto:yamnikovas@mail.ru)

Y.W. GRIGOROV, A.S. YAMNIKOV

## INFLUENCE OF DISCREPANCY OF MANUFACTURING AND ASSEMBLAGE OF DETAILS ON MECHANISM DEVIATIONS ON ITS FUNCTIONING

*In article influence of errors of the form and relative position of interfaced surfaces of details at their assemblage in knot is considered at action of small force of the clip focusing details. It is experimentally established that at manufacturing of interfaced cylindrical surfaces on 9 quality the specified errors of serious influence have no accuracy.*

**Keywords:** *assemblage, form and size errors, accuracy of relative position, contact deformations.*

## BIBLIOGRAPHY

[1]Solonin, I.S. Mathematical of the statistican in technology of mechanical engineering [Text] / I.S. Solonin. - M: Mechanical engineering, 1972. - 216 p.

[2]Dunaev, P. F. Calculation of admissions of the sizes [Text] / P.F. Dunaev, O.P. Lelikov. - M: Mechanical engineering, 1981. - 189 p.

**Grigorov Igor Vladimirovich**  
The Tula state university, Tula  
The competitor of chair «Technology of mechanical engineering»;  
Ph. (84872) 33-23-10

**Yamnikov Alexander Sergeevich**  
Tula state university, Tula  
Doctor of technical science, professor of of chair «Technique of machine industry»  
E-mail: Yamnikovas@mail.ru

УДК 620.172.224.2

А.М. ИВАНОВ

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМБИНИРОВАНИЯ ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ СТАЛЕЙ

*В статье рассматриваются вопросы комбинирования методов термопластической обработки материалов. Дается сравнение различной комбинации методов для обработки металлических материалов: ковки, кручения, равноканального углового прессования и термической обработки (закалки).*

**Ключевые слова:** *сталь, термопластический метод, деформация, ковка, кручение, равноканальное угловое прессование, закалка.*

### ВВЕДЕНИЕ

В решении вопроса повышения прочности и эксплуатационной надежности машин и конструкций, работающих, в том числе в условиях низких температур, путем повышения качества и улучшения свойств металлических материалов важная роль отводится различным методам обработки, в том числе комбинированным. Задача термомеханических методов обработки состоит в управлении структурой для достижения необходимых механических характеристик материалов. Широкое применение в технологических операциях упрочнения нашли термопластические методы [1-5]. Результат зависит от правильного сочетания видов обработки и деформации, степени пластической деформации и температуры обработки. В зависимости от условий эксплуатации обработка может быть направлена на достижение высокопрочного состояния, сочетание высокой прочности и удовлетворительную пластичность, вязкость разрушения.

Существуют различные методы обработки материалов давлением, направленные на их упрочнение: кручение под высоким гидростатическим давлением (КГД), равноканальное угловое прессование (РКУП), прокат, всесторонняя ковка и др. Поскольку в последнее время интенсивно развиваются методы интенсивной пластической деформации (ИПД), то для эффективного управления структурой материала целесообразно сочетание ИПД с другими методами механической и термической обработки. Одним из методов ИПД, позволяющим получать объемные образцы с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой, является РКУП [6, 7].

В настоящей работе рассмотрено влияние комбинирования методов механической обработки (ковка, кручение и РКУП), а также механической и термической обработки на структуру и механические свойства конструкционных сталей.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе схему термопластической обработки с применением ИПД можно представить в двух, или трехступенчатом виде: предварительное механическое воздействие, термическая обработка (или без неё) и РКУП. В данном случае ведущим видом обработки является интенсивная пластическая деформация, поскольку она обладает более высокой степенью реализуемой деформации. УМЗ структуру формирует метод ИПД, остальные способы, хотя и имеют самостоятельное значение, в данной схеме выступают в роли дополнительных. Как известно, исходное состояние материала имеет большое влияние на процесс создания дислокационной структуры и её термомеханическую стабилизацию. Роль предварительной обработки, предшествующей ИПД, заключается в получении равновесной структуры, изменении твердости, прочности, вязкости, пластичности, обрабатываемости, формы и величины зерна, выравнивании химического состава, снятии внутренних напряжений. Например, закалка повышает твердость и прочность, снижает вязкость и пластичность, но вместе с тем исключает мягкие ферритные включения, образуется мартенситная структура и уменьшение размера зерна, а ковка и кручение уменьшают размер зерна, повышают твердость и прочность.

Основной процесс – ИПД по схеме РКУП существенно измельчает зерно за счет сдвиговой деформации в месте пересечения каналов прессования, повышает твердость и прочность. А постдеформационный (после ИПД) отжиг при разных температурах позволяет снимать внутренние напряжения и способствует повышению пластичности стали при некотором снижении прочности. При этом важно то, чтобы достигнутый мелкий размер зерна сохранялся или увеличивался незначительно, прочность была выше, чем для исходного состояния, а пластичность была не хуже исходной.

Исследуемый материал: конструкционная низколегированная сталь 09Г2С в состоянии поставки, после деформации кручением,ковки, после термомеханической обработки по режимам «кручение + закалка + РКУП» и «ковка + закалка + РКУП». РКУП заготовок выполняли в технологической оснастке с углом пересечения каналов  $120^\circ$  на базе гидравлического пресса «ПСУ 125» типа ЗИМ с максимальным усилием 1250 кН. Химический состав материала в %: 0,12 С, 0,008 N, 0,5–0,8 Si, 0,035 P, 0,04 S, 0,3 Cr, 1,3–1,7 Mn, 0,3 Ni, 0,3 Cu, 0,08 As, остальное Fe. Сталь 09Г2С имеет ферритно-перлитную структуру со средним размером зерна 18,5 мкм в исходном состоянии. Химический анализ проведен на атомно-эмиссионном спектрометре «Foundry-Master» фирмы «Worldwide Analytical Systems AG (WAS AG)».

Для деформирования кручением нагрев цилиндрической заготовки из 09Г2С осуществлялся в кузнечном горне. Температуру заготовки при нагреве и кручении контролировали с помощью инфракрасного термометра DT-8859, у которого диапазон измеряемой температуры 223-1873 К, разрешение 0,1 градуса, спектральная чувствительность 8~14 мкм.

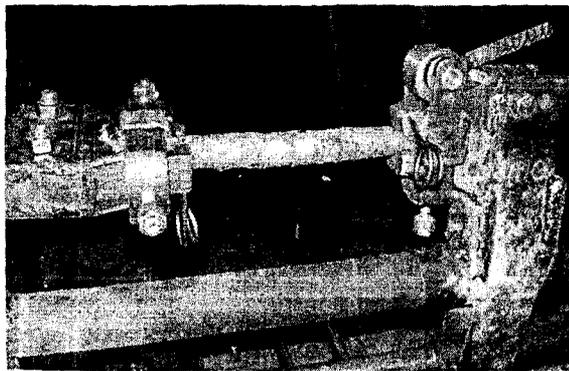


Рисунок 1 – Кручение заготовки с помощью приспособления

Температура начала деформации кручением цилиндрических заготовок соответствует 1173 К, а окончания – 1023 К. Кручение заготовок выполнялось в специальном приспособлении (рисунок 1). Для этого предварительно нагретая цилиндрическая заготовка размером  $\varnothing 25 \times 220$  мм устанавливалась в захваты и с помощью поворотного механизма подвергалась деформации кручением в 2 оборота. Из закрученных заготовок изготавливали по два образца размером  $\varnothing 20 \times 100$  мм. После кручения заготовки закаливали в воде от температуры 1203 К.

Цилиндрические заготовки из стали 09Г2С были подвергнуты РКУП по маршруту «Вс» в  $n=4$  прохода при температуре 673 К. Угол пересечения каналов использованной оснастки при РКУП составляет  $120^\circ$ . Степень деформации заготовки при РКУП за 4 прохода составляет  $\varepsilon_4=2,67\%$ .

Нагрев заготовок для всестороннейковки осуществлялся как в горне, так и в муфельной печи Nabertherm. Более точная выдержка температуры заготовки обеспечивается естественно нагревом в печи. Предварительно нагретая заготовка  $\varnothing 20 \times 60$  мм подвергалась всесторонней свободной ковке с помощью пневматического молота МА4129А производства астраханского завода кузнечно-прессового оборудования с номинальной массой молота 75 кг (рисунок 2). Осуществлялось трехкратное повторение последовательности операций свободнойковки–осадки и протяжки со сменой оси прилагаемого деформирующего усилия. Температуру заготовки при ковке контролировали с помощью инфракрасного термометра DT-8859. Варьировали скоростью остывания заготовки послековки и РКУП.

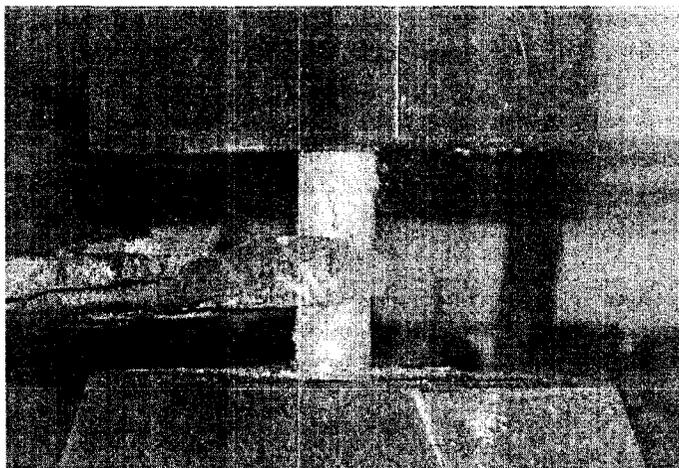


Рисунок 2 – Всесторонняяковка заготовки пневматическим молотом

Режимы обработки стали 09Г2С следующие:

- 1) ковка в 3 цикла с нагревом в горне при температурековки 1173-1023 К;
- 2) ковка в три цикла с нагревом в горне при температуре 1173-1023 К с последующей закалкой в воде от температуры 1203 К и РКУП в  $n=4$  прохода по маршруту Вс (поворот заготовки относительно её продольной оси перед каждым последующим циклом прессования на угол  $90^\circ$ ) при температуре прессования 673 К;
- 3) ковка в 3 цикла с нагревом в печи в течение 1 часа с варьированием температуры началаковки (1173/1023 К и 1273/1023 К) и скоростью охлаждения заготовки (охлаждение в масле или выдержка в теплой золе с остыванием на воздухе) с последующим РКУП по маршруту Вс в 4 прохода при температуре 673 К с остыванием заготовки на воздухе или в воде после прессования.

Накопленная при ковке деформация при коэффициенте трения  $\mu > 0$  составила 2,25.

Механические свойства исследовали при растяжении образцов на испытательных машинах Instron-1195 и «UTS-20k» при постоянной скорости нагружения, равной  $\approx 3,33 \cdot 10^{-5}$  м·с<sup>-1</sup>.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате кручения в 2 оборота средний размер зерна уменьшился до 12,5 мкм. В свою очередь комбинированная термомеханическая обработка обеспечило измельчение зерна до 4-5 мкм.

Из полученных заготовок были изготовлены плоские образцы типа I размером рабочей части  $25 \times 3 \times 1,5 \cdot 10^{-2}$  м для испытаний на статический разрыв. На рисунке 3 приведены условные диаграммы растяжения стали 09Г2С в исходном состоянии (1), после кручения в 2 оборота (2), а также после кручения, закалки и РКУП (3). Механические характеристики представлены в таблице 1.

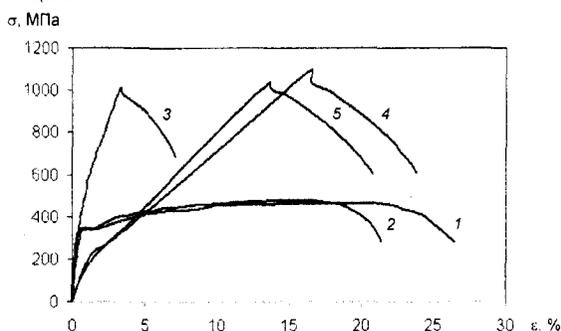


Рисунок 3 - Диаграммы растяжения стали 09Г2С в различных состояниях:

1 – состояние поставки; 2 – деформация кручением; 3 – кручение, закалка и РКУП;

4 – ковка в 3 цикла с нагреванием заготовки в печи при 1173/1023 К с охлаждением в масле + РКУП по маршруту В<sub>С</sub> в n=4 прохода при 673 К с остыванием на воздухе; 5 – ковка в 3 цикла с нагреванием заготовки в печи при 1273/1023 К с охлаждением в масле +

РКУП по маршруту В<sub>С</sub> в n=4 прохода при 673 К с остыванием на воздухе

Таблица 1 – Механические характеристики стали 09Г2С в различных состояниях

№№ п/п	Состояние материала	σ <sub>т</sub> , МПа	σ <sub>в</sub> , МПа	δ, %
1	Исходное (состояние поставки)	337	462	24,4
2	Кручение при 1173-1023 К в 2 оборота	340	477	20,9
3	Кручение при 1173-1023 К в 2 оборота + Закалка в воде от 1203 К + РКУП (В <sub>С</sub> , 673 К, n=4)		1003	6,1
4	Ковка в 3 цикла с нагревом в горне, 1173/1023 К, охлаждение в масле	393	484	23,2
5	Ковка в 3 цикла с нагревом в горне, 1173-1023 К, охлаждение в масле + закалка в воде от 1203 К + РКУП (В <sub>С</sub> , n = 4, 673 К), остывание на воздухе		1045	7,5
6	3. Ковка в 3 цикла с нагревом в печи, 1173/1023 К, масло + РКУП (В <sub>С</sub> , n=4, 673 К), остывание на воздухе		1097	10,22
7	4. Ковка в 3 цикла с нагревом в печи, 1173/1023 К, масло + РКУП (В <sub>С</sub> , n=4, 673 К), остывание в воде		1013	9,67
8	5. Ковка в 3 цикла с нагревом в печи, 1173/1023 К, выдержка в теплой золе, затем остывание на воздухе + РКУП (В <sub>С</sub> , n=4, 673 К), остывание на воздухе		931	9,89
9	6. Ковка в 3 цикла с нагревом в печи, 1173/1023 К, выдержка в теплой золе, остывание на воздухе + РКУП (В <sub>С</sub> , n=4, 673 К), остывание в воде		942	9,34
10	7. Ковка в 3 цикла с нагревом в печи, 1273/1023 К, масло + РКУП (В <sub>С</sub> , n=4, 673 К), остывание на воздухе		1030	9,29
11	8. Ковка в 3 цикла с нагревом в печи, 1273/1023 К, масло + РКУП (В <sub>С</sub> , n=4, 673 К), остывание в воде		994	7,99

Как видно из рисунка 3 и таблицы 1, кручение заготовки при данных режимах практически не изменяет прочностные характеристики, но снижает пластичность в 1,2 раза (состояние 2). Последующая после кручения закалка и РКУП в 4 прохода повышают прочность 09Г2С в  $\sim 3 \pm 2,2$  раза, пластичность уменьшается в 4 раза (состояние 3). При этом предел текучести практически достигает предела прочности, равного 1003 МПа. Также более чем в 5 раз увеличилась область упругих деформаций стали 09Г2С и достигает 3,4 %. Вместе с тем существенно уменьшилась доля пластической деформации.

Всесторонняя ковка в три цикла с нагревом в горне (состояние 4) повысила прочность на  $\sim 5-16,5$  %, при этом пластичность снизилась на 5 %. Закалка и РКУП послековки (состояние 5) более значительно (в 3–2,3 раза) повысили прочность стали по сравнению с исходным состоянием при снижении пластичности на 25 % [8]. Результаты исследования микроструктуры стали 09Г2С показали, что после обработки заготовок по режимам 4 и 5 формируется мелкозеренная структура со средним размером зерна 3–5 мкм.

Для упрочненной по режимам 6 и 10 стали 09Г2С величина упругой стадии деформирования еще более увеличилась. Упрочнение стали ИПД приводит к образованию высокого зуба текучести (кривые 3, 4 и 5 на рисунке 3). Как известно, возможность возникновения резкой текучести материала с малой исходной плотностью подвижных дислокаций в начале пластического течения описывается теорией Гана, согласно которой чем меньше средняя скорость движения дислокаций и длина (плотность) подвижных дислокаций в исходном состоянии, тем выше зуб текучести [9]. Более высокий зуб текучести соответствует большей плотности дислокаций в образце.

Таким образом, послековки и РКУП стали 09Г2С происходит заметное уменьшение размеров зерен, возрастает плотность дислокаций, что влияет на повышение прочностных показателей. В результатековки и РКУП прочность стали 09Г2С повышается. Наряду с повышением предела прочности происходит повышение предела текучести, который после комбинированной обработки становится сравнимым с пределом прочности.

Как видно из таблицы 1, ковка в 3 цикла с охлаждением в масле и с дополнительным упрочнением РКУП в 4 прохода по маршруту  $V_C$  при температуре 673 К (состояние 6) обеспечивает существенное повышение прочностных характеристик стали 09Г2С (в 3 раза по пределу текучести и в 2,4 раза по пределу прочности по сравнению с состоянием поставки материала), но с существенным падением пластичности (в 2,4 раза). Изменение режима охлаждения как послековки, так и после РКУП влияют на прочность и пластичность стали 09Г2С. Например, при одинаковом режиме РКУП предел прочности в случае охлаждения заготовки в масле послековки на 165 МПа (на 15 %) выше, чем в случае выдержки в теплой золе с остыванием на воздухе, а остаточное удлинение на 3,5 % (см. состояния 6 и 8). Повышение температуры началаковки на 100 градусов при тех же режимах РКУП снижает прочностные характеристики на 20...70 МПа, что составляет около 2...6 % от предела прочности в случае температуры началаковки в 1173 К (см. пп. 6 и 10, 7 и 11). Это связано со снижением плотности дислокаций. В обоих случаях пластичность снижается на 9...17 %. Более лучшие результаты по характеристикам прочности и пластичности получились по режиму 6 (ковка в 3 цикла, 1173/1023 К, охлаждение в масле + РКУП ( $V_C$ ,  $n=4$ , 673 К), остывание на воздухе). Как известно, высокую пластичность можно обеспечить последующим отжигом. При этом можно добиться высокой пластичности при сохранении прочности стали, превосходящей её прочность в исходном состоянии.

## **ВЫВОДЫ**

Результаты исследований показывают, что варьированием режимов предварительной термопластической обработки (ковки и кручения) и РКУП можно регулировать состояние и механические свойства низколегированной стали 09Г2С. При рассмотренных случаях обработки наилучшие показатели по прочности и пластичности достигнуты при следующем режиме: 1) ковка в 3 цикла с началом циклаковки при 1173 К и его завершением при 1023 К, и с последующим охлаждением в масле; 2) РКУП в  $n=4$  прохода по маршруту  $V_C$  при темпера-

туре 673 К с последующим остыванием заготовки на воздухе. Кручение при данных режимах не дает желаемых результатов по прочности. Для более эффективного использования обработки необходимо, по-видимому, деформацию кручением выполнять до более высоких степеней.

Таким образом, определенное сочетание традиционных методов термопластического упрочнения и интенсивной пластической деформации позволяет существенно повысить прочность сталей.

*Работа выполнена при финансовой поддержке проекта № III.20.3.3 Программы № III.20.3 СО РАН и проекта №3 Программы фундаментальных исследований Президиума РАН №25.*

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1.Иванова, В.С. Новые пути повышения прочности металлов [Текст] / В.С. Иванова, Л.К. Гордиенко. - М.: Наука, 1964. - 118 с.
- 2.Бернштейн, М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов [Текст] / М.Л. Бернштейн. - Т. 1. - М.: Металлургия, 1968. - 596 с.
- 3.Гуляев, А.П. Структурные изменения при термомеханической обработке стали и их влияние на механические свойства [Текст] / А.П. Гуляев // Металловедение и термическая обработка металлов, 1965. - № 11. - С. 9-17.
- 4.Григорьев, А.К. Термомеханическое упрочнение стали в заготовительном производстве [Текст] / А.К. Григорьев, Г.Е. Коджаспиров. - М.: Машиностроение, Л.О., 1985. - 143 с.
- 5.Садовский, В.Д. Сталь [Текст] / В.Д. Садовский, Г.В. Маханёк. - М.: Наука, 1990. - 112 с.
- 6.Сегал, В.М. Процессы пластического структурообразования металлов [Текст] / В.М. Сегал [и др.] - Минск: Наука и техника, 1994. - 231 с.
- 7.Валиев, Р.З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства [Текст] / Р.З. Валиев, И.В. Александров. - М.: Академкнига, 2007. - 398 с.
- 8.Иванов, А.М. Термопластическое упрочнение конструкционных сталей [Текст] / А.М. Иванов // Деформация и разрушение материалов. - 2012. - № 2. - С. 31-35.
- 9.Золоторевский, В.С. Механические свойства металлов [Текст] : учебник для вузов / В.С. Золоторевский. - М.: Металлургия, 1983. - 352 с.

**Афанасий Михайлович Иванов**

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник  
ФГБУН «Институт физико-технических проблем Севера  
им. В.П. Ларионова СО РАН»

Тел: (4112) 39-05-79

E-mail: [a.m.ivanov@iptpn.ysn.ru](mailto:a.m.ivanov@iptpn.ysn.ru)

A.M. IVANOV

### PERFORMANCE COMBINATION OF METHODS OF THERMOPLASTIC PROCESSING STEEL

*The article deals with the combination of thermoplastic materials processing techniques. Provides a comparison of different combinations of methods for processing of metallic materials: forging, torsion, equal channel angular pressing and heat treatment (quenching).*

*Key words: steel, thermoplastic method, deformation, forging, torsion, equal channel angular pressing, quenching.*

BIBLIOGRAPHY

- [1]Ivanova, V.S. New ways to increase the strength of metals [Text] / V.S. Ivanova, L.K. Gordienko. - Moscow: Science, 1964. - 118 p.
- [2]Bernchteine, M.L. Thermomechanical processing of metals and alloys [Text] / M.L. Bernchteine. - Vol. 1. - Moscow: Metallurgy, 1968. - 596 p.
- [3]Gulyaev, A.P. Structural changes in the thermomechanical processing of steel and their influence on the mechanical properties [Text] // Metallography and heat treatment of metals. - 1965. - No. 11. - Pp. 9–17.
- [4]Grigoriyev, A.K. Thermomechanical hardening steel in blank production [Text] / A.K. Grigoriev, G.E. Kodzhaspirov. - Moscow: Engineering, L.B., 1985. - 143 p.
- [5]Sadowskiy, V.D., Makhanek G.V. Steel [Text] / V.D. Sadowskiy, G.V. Makhanek. - Moscow: Science, 1990. - 112 p.
- [6]Segal, V.M. Structure formation processes of plastic metal [Text] / V.M. Segal [etc.] - Minsk: Science and technique, 1994. - 231 p.
- [7]Valiev, R.Z. Bulk nanostructured metallic materials: obtaining, structure and properties [Text] / R.Z. Valiev, I.V. Alexandrov. - Moscow: Akademkniga, 2007. - 398 p.
- [8]Ivanov, A.M. Thermoplastic hardening of structural steel [Text] / A.M. Ivanov // Deformation and fracture of materials. 2012. - No. 2. - Pp. 31–35.
- [9]Zolotarevskiy, V.S. Mechanical properties of metals [Text] : textbook for High Schools / V.S. Zolotarevskiy. - Moscow: Metallurgy, 1983. - 352 p.

Afanasiy Mikhailovich Ivanov

Can. Sc. Technical., Senior Research Employees  
of the Institute of Physical-  
Technical Problems of the North,  
Siberian Branch of the RAS, Yakutsk  
Phone: (4112) 39-05-79  
E-mail: [a.m.ivanov@iptpn.ysn.ru](mailto:a.m.ivanov@iptpn.ysn.ru)

УДК 620.179.1.082.7

В.В. МАРКОВ

УНИВЕРСАЛЬНАЯ СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯ

*Универсальная структурная модель трибосопряжения позволяет представить триботехническую систему произвольной конфигурации в виде совокупности элементарных фрикционных контактов и связей между ними. На основе данной модели можно получить зависимости для активного сопротивления, электрической ёмкости и температуры поверхностей деталей трибосопряжения с произвольным количеством зон трения.*

**Ключевые слова:** трение; трибология; триботехническая система; фрикционный контакт; зона трения; активное электрическое сопротивление; электрическая ёмкость; температура; структурная модель

Трибосопряжение представляет собой систему, состоящую из нескольких элементов, зон трения и является совокупностью некоторого количества элементарных фрикционных контактов. Это позволяет представить любое трибосопряжение в виде структурной модели, которая может быть использована для математического моделирования физических процессов, основанных на анализе состояния элементарного фрикционного контакта: тепловых процессов, электрорезистивных процессов (электрическое сопротивление или проводимость) электропотенциальных процессов (электрическая ёмкость), электрогенераторных процессов (трибо-ЭДС или термо-ЭДС), вибрационных и других. Данная структурная модель может стать универсальным инструментом для создания базовых математических моделей комплексных диагностических параметров триботехнических систем [1, 2].

При разработке структурной модели трибосопряжения приняты *ограничения* [2]:

- для описания топографии поверхностей используются функции распределения материала по высоте шероховатого слоя (нормированное выражение кривой опорной поверхности) и материала по высоте единичного выступа (форма выступа);
- в качестве модели единичной неровности применяется сферический сегмент;
- контакт считается упругим, для описания деформации используются формулы Герца;
- для математического описания высоты микронеровностей рабочих поверхностей используется распределение Найака;
- расчеты выполняются применительно к контакту шероховатой поверхности с гладкой, переход к контакту двух шероховатых поверхностей осуществляется путем оценки композиции законов распределения.

Элементы структурной модели трибосопряжения показаны на рисунке 1.

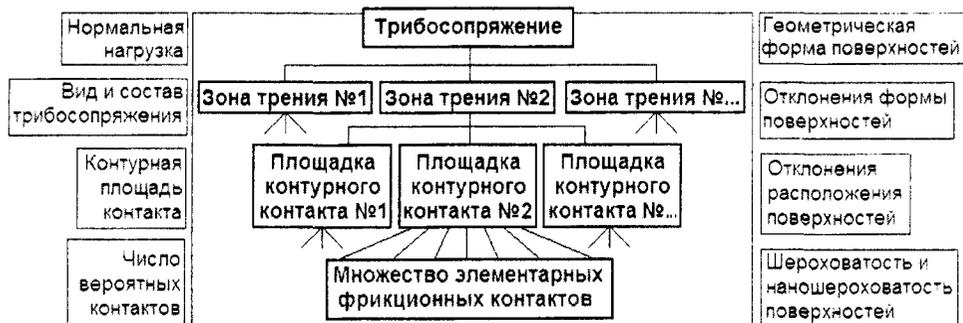
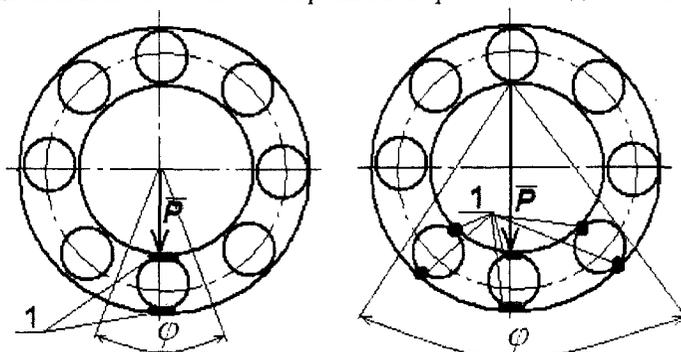


Рисунок 1 - Элементы структурной модели трибосопряжения

Рассмотрим порядок применения предложенной модели при создании математического описания структуры произвольного трибосопряжения.

*Этап 1. Анализ конструкции трибосопряжения, оценка количества зон трения.* На этом этапе изучаются особенности конструкции трибосопряжения, определяются его вид, состав и режимы работы, в соответствии с которым определяется возможное количество зон трения. Трибосопряжения разных видов и конструкций могут иметь различное количество зон трения. Например, подшипники скольжения, как правило, имеют одну зону трения, а количество зон трения в подшипнике качения зависит от значения нормальной нагрузки и наличия радиального зазора между телами качения и кольцами. На рисунке 2 показан механизм возникновения одной или нескольких зон трения в шариковом подшипнике качения.



1 – зоны трения в подшипнике качения;  $P$  – нормальная нагрузка;  $\varphi$  – угол контакта

Рисунок 2 - Возникновение зон трения в подшипнике качения

Результатом первого этапа структурного моделирования трибосопряжения является оценка количества зон трения с учётом режимов работы объекта. Решается задача распределения нормальной нагрузки между зонами трения объекта, а определяется часть общей нагрузки, приходящаяся на каждую зону трения.

Этап 2. Анализ особенностей зоны трения, оценка границ площадки контурного контакта, определение числа вероятных элементарных фрикционных контактов в её пределах. На этом этапе анализу подвергается каждая зона трения. Для конкретной зоны трения предварительно задают: геометрическую форму контактирующих поверхностей, нормальную нагрузку в контакте, наличие отклонений формы, расположения и локальных дефектов поверхностей, значения параметров шероховатости и наношероховатости (в данной работе под наношероховатостью понимается совокупность мельчайших неровностей на поверхности микронеровностей профиля контактирующих поверхностей высотой менее 0,1 мкм, рисунок 3).

Затем, зная геометрическую форму контактирующих поверхностей, определяют *типичную схему контактирования*, что необходимо для расчёта контурной площади контакта  $A_c$  и числа вероятных контактов  $n$  в её пределах.

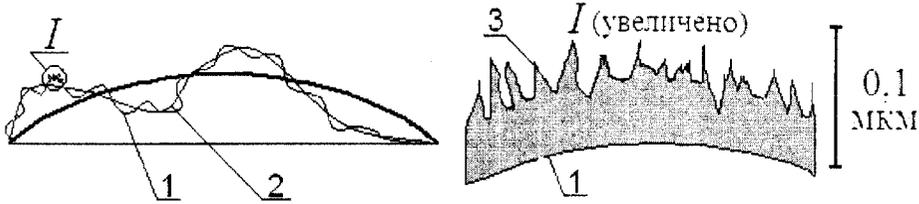


Рисунок 3 - Виды неровностей на поверхностях деталей машин

Типовые схемы контактирования поверхностей подробно рассмотрены и обобщены в работе [1]. К ним относятся такие типовые схемы, как «два шара», «шар и плоскость», «два цилиндра», «шар и цилиндр», «шар и цилиндрический жёлоб», «шар и вогнутая шаровая поверхность», «шар и поверхность вращения», «две поверхности вращения», «шар и внутренняя коническая поверхность», «ролик и плоскость», «два ролика», «две плоскости».

Тип схемы контактирования поверхностей деталей трибосопряжения определяет виды формул для расчёта таких геометрических параметров площадки контурного контакта, как сумма главных кривизн  $\Sigma\rho$  и сближение  $\delta$ , а они, в свою очередь, определяют контурную площадь контакта  $A_c$  и число вероятных контактов  $n$ . Пример типовой схемы контактирования поверхностей трения, соответствующий контакту шарика подшипника качения с дорожками качения его внутреннего и наружного колец показан на рисунке 4.

Согласно теории упругого контактирования поверхностей, контурная площадь контакта  $A_c$  в пределах зоны трения в общем случае определяется из выражения [1 – 6]:

$$A_c = \pi \cdot n_a \cdot n_b \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{3 \cdot F_r}{E \cdot \Sigma\rho}\right)^2} - A_d, \quad (1)$$

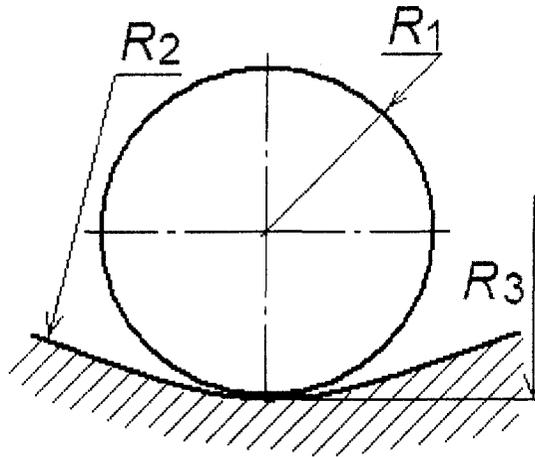
- где  $F_r$  – нормальная нагрузка в зоне трения;
- $E$  – приведённый модуль упругости первого рода (модуль Юнга);
- $n_a, n_b$  – коэффициенты, зависящие от геометрической формы поверхностей;
- $\Sigma\rho$  – сумма главных кривизн контактирующих поверхностей;
- $A_d$  – площадь локального дефекта.

Формулы для суммы главных кривизн  $\Sigma\rho$ , соответствующие схеме контактирования, показанной на рисунке 4.5, имеют вид [1]:

$$\Sigma\rho = \frac{2}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}, \quad \text{при } R_3 > 0, \quad (2)$$

$$\Sigma\rho = \frac{2}{R_1} - \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_3}, \quad \text{при } R_3 < 0, \quad (3)$$

- где  $R_1$  – радиус шарика подшипника;
- $R_2$  – радиус жёлоба дорожки качения кольца;
- $R_3$  – радиус дорожки качения кольца подшипника.



Типовая схема контактирования «Шар радиусом  $R_1$  и поверхность вращения радиусами  $R_2$  и  $R_3$ , причём  $R_2 > R_1$ ».

Схема соответствует конструктивным особенностям шарикового подшипника качения (для контакта шарика с дорожкой качения внутреннего кольца  $R_3 > 0$ , а для наружного кольца  $R_3 < 0$ )

Рисунок 4 - Пример типовой схемы контактирования, соответствующий контакту шарика подшипника качения с дорожками качения его колец

Формула (2) соответствует контакту шарика с внутренним кольцом подшипника, а формула (3) – контакту шарика с наружным кольцом.

Контурная площадь контакта оказывает влияние на «номинальное» (то есть, максимально возможное) число элементарных фрикционных контактов, которые могут находиться в пределах контурной площадки контакта. Обозначим его, как  $N$ :

$$N = \frac{A_c}{S_{m1} \cdot S_{m2}}, \quad (4)$$

где  $A_c$  – контурная площадь контакта поверхностей;

$S_{m1}, S_{m2}$  – средний шаг неровностей в продольном и поперечном сечениях.

Число  $N$  – это исходный параметр для определения числа вероятных элементарных фрикционных контактов  $n$  в пределах контурной площадки контакта. В работе [1] подробно рассмотрена цепь математических и логических переходов для получения зависимости  $n(N)$ . Не приводя её подробно, отметим, что данная зависимость получена на основе известной модели Гринвуда – Вильямсона, которая позволяет установить вероятностную взаимосвязь между числом вероятных контактов и высотой микронеровностей рабочих поверхностей деталей трибосопряжения. Выражение для оценки числа вероятных контактов имеет вид [1]:

$$n = N \cdot \left[ \frac{1}{2} - L \left( \frac{d}{R_q} \right) \right], \quad (5)$$

где  $L(d/R_q)$  – функция Лапласа (табулирована);

$d$  – номинальный зазор между контактирующими поверхностями;

$R_q$  – среднеквадратическое отклонение профиля поверхностей.

Зазор  $d$  является функцией высоты неровностей профиля поверхностей, и может быть найден по формуле:

$$d = R_p - \delta, \quad (6)$$

где  $R_p$  – приведенная высота сглаживания (расстояние от линии выступов до средней линии) неровностей профиля ( $R_p = R_{p1} + R_{p2}$ );

$\delta$  – сближение контактирующих поверхностей.

Отметим, что если профиль поверхности стационарный, и его можно рассматривать, как случайную функцию, а высота микронеровностей распределена нормально (что соответствует технологическим методам формообразования рабочих поверхностей деталей подшипников качения), то справедливо соотношение:

$$R_q = 1,25 \cdot Ra, \quad (7)$$

где  $Ra$  – среднее арифметическое отклонение профиля от средней линии.

В формуле (6) важнейшим параметром является сближение  $\delta$  контактирующих поверхностей деталей трибосопряжения. Согласно теории контактных деформаций Герца, сближение  $\delta$  контактирующих гладких поверхностей определяется по формуле:

$$\delta = a \cdot \sqrt[3]{\Sigma\rho}; \quad a = \frac{3}{2} \cdot \frac{2K}{\pi m_a} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{1-\eta^2}{E}\right)^2 \cdot F_r^2}, \quad (8)$$

где  $E$  и  $\eta$  – соответственно, приведенные модуль упругости и коэффициент Пуассона;

$F_r$  – нормальная нагрузка в зоне трения;

$(2K/\pi m_a)$  – табличный коэффициент;

$\Sigma\rho$  – сумма главных кривизн контактирующих поверхностей, определяемая по радиусам их кривизны.

Из формул (8) следует, что сближение  $\delta$  зависит от суммы главных кривизн  $\Sigma\rho$ , а сумма главных кривизн, как уже отмечалось выше, определяется схемой контактирования поверхностей деталей трибосопряжения. Значит, сближение поверхностей также зависит от типа схемы их контактирования. Например, для контакта шарика подшипника качения с дорожками качения его внутреннего и наружного колец (схема показана на рисунке 4), формулы для расчёта сближения поверхностей будут иметь следующий вид:

$$\delta = a \cdot \sqrt[3]{\frac{2}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}; \quad a = \frac{3}{2} \cdot \frac{2K}{\pi m_a} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{1-\eta^2}{E}\right)^2 \cdot F_r^2}; \quad \text{при } R_3 > 0, \quad (9)$$

$$\delta = a \cdot \sqrt[3]{\frac{2}{R_1} - \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_3}}; \quad a = \frac{3}{2} \cdot \frac{2K}{\pi m_a} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{1-\eta^2}{E}\right)^2 \cdot F_r^2}; \quad \text{при } R_3 < 0, \quad (10)$$

где  $R_1$  – радиус шарика подшипника;

$R_2$  – радиус жёлоба дорожки качения кольца;

$R_3$  – радиус дорожки качения кольца подшипника.

Формула (9) соответствует контакту шарика с внутренним кольцом подшипника, а формула (10) – контакту шарика с наружным кольцом.

Ценность формул (2), (3) и (9), (10) заключается в том, что с их помощью можно учесть отклонения формы контактирующих поверхностей, причём не только в продольном направлении, но и в поперечном. Если радиусы  $R_1 \dots R_3$  представить постоянными значениями, получаются, соответственно, выражения для суммы главных кривизн и сближения идеально круглых поверхностей. Если же задать радиусы рядом Фурье, появляется возможность учёта отклонений формы.

Для учёта отклонений формы (эксцентриситет, овальность, огранка) шарика подшипника используется выражение (радиус  $R_1$ ) [3, 4]:

$$R_1(\varphi) = R_1 + \sum_{k=1}^p Q_k \cdot \sin(k \cdot \varphi + \varphi_k), \quad (11)$$

где  $R_1$  – номинальное значение радиуса шарика;

$Q_k, \varphi_k$  – амплитуда и фазовый угол  $k$ -й гармоники отклонения;

$k$  – номер гармоники (первая гармоника характеризует эксцентриситет, вторая – овальность, третья – трёхвершинную огранку и т.п.);

$p$  – предельный номер учитываемой гармоники;

$\varphi$  – угловая координата.

С помощью аналогичной формулы учитываются отклонения формы дорожки качения подшипника в продольном направлении (радиус  $R_3$ ):

$$R_3(\varphi) = R_3 + \sum_{k=1}^p Q_k \cdot \sin(k \cdot \varphi + \varphi_k), \quad (12)$$

где  $R_3$  – номинальное значение радиуса дорожки качения кольца подшипника;

$Q_k, \varphi_k$  – амплитуда и фазовый угол  $k$ -й гармоники отклонения;

$k$  – номер гармоники (первая гармоника характеризует эксцентриситет, вторая – овальность, третья – трёхвершинную огранку и т.п.);

$p$  – предельный номер учитываемой гармоники;

$\varphi$  – угловая координата.

Моделируя аналогичным образом  $R_2$ , можно учесть отклонения формы жёлоба дорожки качения в направлении, перпендикулярном качению шариков:

$$R_2(\varphi) = R_2 + \sum_{k=1}^p Q_k \cdot \sin(k \cdot \varphi + \varphi_k), \quad (13)$$

где  $R_2$  – номинальное значение радиуса жёлоба дорожки качения кольца;

$Q_k, \varphi_k$  – амплитуда и фазовый угол  $k$ -й гармоники отклонения;

$k$  – номер гармоники (первая гармоника характеризует эксцентриситет, вторая – овальность, третья – трёхвершинную огранку и т.п.);

$p$  – предельный номер учитываемой гармоники;

$\varphi$  – угловая координата.

Теперь рассмотрим цепь логических переходов, с помощью которых в структурной модели трибосопряжения учитывается эффект приработки контактирующих поверхностей. Для этого вернёмся к формуле (6), по которой в данной модели определяется зазор  $d$  между контактирующими поверхностями:

$$d = R_p - \delta.$$

Приведённая высота сглаживания неровностей профиля  $R_p$  (расстояние от линии выступов до средней линии) функционально связана со средней высотой неровностей профиля контактирующих поверхностей  $h$  или её безразмерным аналогом  $h_1$  [4]:

$$h = R_{max} - R_p; \quad h_1 = \frac{h}{\sqrt{m_0}}, \quad (14)$$

где  $R_{max}$  – наибольшая высота неровностей профиля;

$m_0$  – момент спектральной плотности высоты неровностей профиля.

Дифференциальная функция распределения высоты неровностей рабочих поверхностей при использовании распределения Найака выражается формулами [5]:

$$f(h_1) = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \left\{ \begin{aligned} & h_1 \sqrt{\frac{3(2\alpha-3)}{\alpha^2}} \exp(-C_1 \cdot h_1^2) + \frac{3\sqrt{2\pi}}{2\alpha} (h_1^2 - 1) \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( h_1 \sqrt{\frac{3}{2(2\alpha-3)}} \right) \right] \times \\ & \times \exp \left( -\frac{h_1^2}{2} \right) + \sqrt{\frac{2\pi\alpha}{3(\alpha-1)}} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( h_1 \sqrt{\frac{\alpha}{2(\alpha-1)(2\alpha-3)}} \right) \right] \exp \left( -\frac{\alpha h_1^2}{2(\alpha-1)} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

$$\alpha = \frac{m_0 \cdot m_4}{m_3^2}; \quad C_1 = \frac{\alpha}{2\alpha-3}; \quad (16)$$

где  $h_1$  – безразмерная высота неровностей профиля контактирующих поверхностей;  
 $\alpha$  – параметр широкополосности профиля поверхности;  
 $C_1$  – коэффициент пропорциональности;  
 $m_2, m_4$  – моменты спектральной плотности высоты микронеровностей профиля.

Параметр широкополосности профиля поверхностей  $\alpha$  определяет вид дифференциальной функции распределения высоты неровностей рабочих поверхностей деталей трибосопряжения. Он изменяется в пределах от  $\alpha = 1,5$  до  $\alpha = \infty$  [5].

Можно утверждать, что в процессе приработки параметр широкополосности  $\alpha$  изменяется в пределах от 1,5 до  $\infty$ . Тогда его можно представить функцией времени:

$$\alpha = 1,5 + k \cdot t, \quad (17)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности;  
 $t$  – срок эксплуатации поверхности (детали трибосопряжения).

Задавая в выражении (16) параметр  $\alpha$  в соответствии с выражением (17), можно получить функцию распределения  $f(h_1)$  высоты неровностей рабочих поверхностей деталей трибосопряжения, вид которой изменяется во времени, соответствуя в начальный момент времени новым деталям, а в впоследствии – приработанным или изношенным.

*Результатом второго этапа структурного моделирования* трибосопряжения является оценка количества элементарных фрикционных контактов в пределах площадки контурного контакта каждой зоны трения. На этом этапе в структурную модель трибосопряжения вводятся отклонения формы и локальные дефекты поверхностей деталей, шероховатость поверхностей и учитывается фактор приработки.

*Этап 3. Анализ физических процессов, происходящих в пределах элементарного фрикционного контакта.* На этом этапе анализу подвергается каждый элементарный фрикционный контакт. Применительно к моделированию тепловых процессов, происходящих в трибосопряжении, определяется температура фрикционного контакта. Если моделированию подлежит активное электрическое сопротивление, то определяется активное сопротивление элементарного фрикционного контакта.

*Результатом третьего этапа структурного моделирования* трибосопряжения является оценка интенсивности физических процессов, происходящих в пределах элементарного фрикционного контакта.

*Этап 4. Получение комплексной модели физических процессов, происходящих в трибосопряжении.* На этом этапе начинается обратный переход от элементарного фрикционного контакта к трибосопряжению в целом. Физические процессы, определённые в пределах элементарного фрикционного контакта, комплексуются в пределах площадок контурного контакта, затем – в пределах каждой зоны трения, и, наконец – для трибосопряжения в целом. Необходимо отметить, комплексирование физических процессов необходимо проводить по таким диагностическим признакам, которые допускают суммирование. Например, при комплексировании тепловых процессов необходимо работать с количеством теплоты, а при комплексировании электропараметрических процессов – с электрическим сопротивлением. Алгоритм структурного моделирования трибосопряжения показан на рисунке 5.

Разработанная структурная модель трибосопряжения предназначена для декомпозиции сложных объектов с произвольным количеством зон трения при математическом моделировании диагностических признаков технического состояния триботехнических систем, таких, как активное электрическое сопротивление, электрическая ёмкость, трибо-ЭДС, объёмная и поверхностная температура деталей трибосопряжения [7]. При наличии математического описания указанных признаков для элементарных фрикционных контактов, с помощью данной структурной модели можно получить математическое описание заданного диагностического признака для всей триботехнической системы.

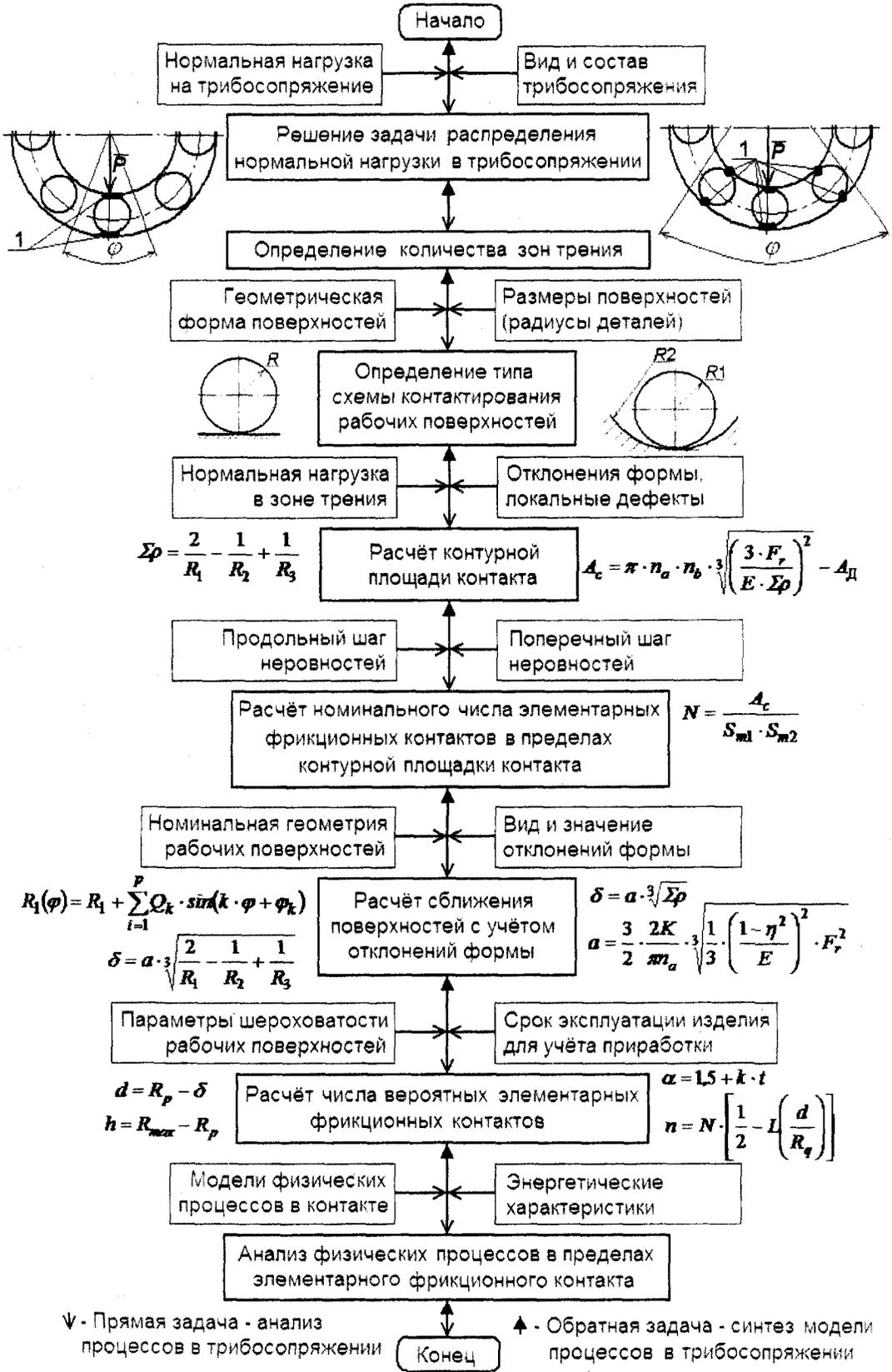


Рисунок 5 - Алгоритм структурного моделирования трибосопряжения

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалев, М.П. Расчет высокоточных шарикоподшипников [Текст] / М.П. Ковалев, Н.З. Народецкий // 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение. – 1980. – 373 с.
2. Демкин, Н.Б. Теория контакта реальных поверхностей и трибология [Текст] / Н.Б. Демкин // Трение и износ. – 1995. – Т. 16. – № 6. – С. 1003-1024.
3. Дунин-Барковский, И.В. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности [Текст] / И.В. Дунин-Барковский, А.Н. Карташова. – М.: Машиностроение, 1978. – 232 с.
4. Лоповок, Т.С. Волнистость поверхности и ее применение [Текст] / Т.С. Лоповок. – М.: Издательство стандартов, 1973. – 184 с.
5. Мышкин, Н.К. Трибология. Принципы и приложения [Текст] / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – Гомель: ИММС НАНБ, 2002. – 310 с.
6. Пахолкин, Е.В. Моделирование и теоретическое исследование влияния локальных дефектов рабочих поверхностей трибосоприятия на состояние смазочного слоя в зоне трения (на примере подшипника качения) [Текст] / Е.В. Пахолкин, К.В. Подмастерьев // Известия ОрелГТУ. – Сер. Машиностроение. Приборостроение. – Орел: ОрелГТУ, 2003. – № 3. – С 71-74.
7. Марков, В.В. Методика математического моделирования электрического сопротивления фрикционного контакта при реализации электрорезистивного метода контроля [Текст] / В.В. Марков // Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности. 8-я Международная конференция: Тезисы докладов. Москва, 18-20 марта 2009 г. – М.: ИД «Спектр», 2009. – С.151-152.

**Марков Владимир Владимирович**

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», город Орёл, Россия

доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация», к.т.н., доцент

телефон (4862)41-98-76; E-mail: [pms35vm@yandex.ru](mailto:pms35vm@yandex.ru)

V.V. MARKOV

## UNIVERSAL STRUCTURALLY MODEL OF TRIBOLOGICAL ELEMENT

*The universal structurally model of tribological element is allow offer the tribotechnical system of arbitrary configuration in the condition of combined the elementary friction contacts and ties between they. On the base of they model may be receive the functions of active electrical resistance, electrical capacity and temperature of surfaces the details of tribological elements, with are has the arbitrary quantity the zones of friction.*

**Key words:** friction; tribology; tribotechnical system; friction contact; zone of friction; active electrical resistance; electrical capacity; temperature; structurally model

## BIBLIOGRAPHY

- [1] Kovalev, M.P. Calculation of the precision bearings [Text] / M.P. Kovalev, N.Z. Narodetcky // 2-th. cd., rem. and add. – M.: Machine building. – 1980. – 373 p.
- [2] Demkin, N.B. Theory of contact the reality surfaces and tribology [Text] / N.B. Demkin // Friction and Wear. – 1995. – V. 16. – № 6. – Pp. 1003-1024.
- [3] Dunin-Barkovsky, I.V. Measuring and analysis the roughing, waving and non-round surface / I.V. Dunin-Barkovsky, A.N. Kartashova. – M.: Machine building. – 1978. – 232 p.
- [4] Lopovok, T.S. Waving surface and she application [Text] / T.S. Lopovok. – M.: Publishing House of standards, 1973. – 184 p.
- [5] Mishkin, N.K. Tribology. The principles and supplements [Text] / N.K. Mishkin, M.I. Petrokovec. – GomeI: National Academy of Belarus, 2002. – 310 p.
- [6] Pakholkin, E.V. Modeling and theoretical researches the influences of local defects the worked surfaces tribological objects on the condition the lubrication layer in the zone of friction (for example the bearing of rolling) [Text] / E.V. Pakholkin, K.V. Podmasteryev // Proceedings of OrelSTU. Ser. Machine-building, Device-building. – Oryol: OrelSTU, 2003. – № 3. – Pp. 71-74.

[7] Markov, V.V. Methodic of mathematical modeling the electrical resistance of friction contact by realization the electroresistive method of control [Text] / V.V. Markov // Non-destroy control and technical diagnostics in the industry. 8-th. Intern. Conf.: inform. Moscow, 18-20 march 2009 year. – M.: Publishing House «Spectrum», 2009. – Pp. 151-152.

Markov Vladimir Vladimirovich

State-University, Oryol, Russia

reader of sub-faculty «Device-building, metrology and certification», Ph.D, reader

telephone (4862)41-98-76; E-mail: [pms35vm@yandex.ru](mailto:pms35vm@yandex.ru)

УДК 621.9.025.7

М.Ш. МИГРАНОВ

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОНТАКТНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ

*В статье на основе термодинамики неравновесных процессов рассматриваются вопросы возможности повышения износостойкости режущего инструмента и других триботехнических параметров тяжело нагруженных высокотемпературных сопряжений.*

*Ключевые слова:* резание металлов, контактный процесс

Известно [1, 2], что основные явления при трении концентрируются в тонком приповерхностном слое. Представляет научный и практический интерес термодинамические аспекты состояния этого слоя и связь изнашивания с этим состоянием. В работе [3] убедительно показано, что любую трибосистему следует рассматривать как открытую неравновесную термодинамическую систему. В работах [2,3,4] сформулирован принцип вторичной диссипативной гетерогенности, согласно которому в процессе трения происходят явления структурной приспособляемости (адаптации) контактирующих материалов, при которых все виды взаимодействия тел локализируются в тонкопленочном объекте – вторичных структурах (ВС). В соответствии с этим принципом вторичные структуры необходимы для рассеяния энергии при ее переходе из зоны трения в трущиеся тела, причем, рассеяние энергии должно происходить с наименьшей скоростью прироста энтропии. Вторичные структуры выполняют защитные функции, ограничивая распространение взаимодействия внутри трущихся тел и снижая интенсивность этого взаимодействия, поэтому их появление соответствует принципу Ле Шателье.

Известно [3], что изменение энтропии любой термодинамической системы равно

$$dS = d_e S + d_i S, \quad (1)$$

где  $d_e S$  – изменение энтропии, обусловленное обменом веществом и энергией с внешней средой;

$d_i S$  – изменение энтропии, обусловленное «некомпенсированным преобразованием», т.е. эта энтропия произведена необратимыми процессами внутри системы.

В равновесном стационарном состоянии изменение энтропии по времени  $t$  равно нулю, т.е.

$$\frac{dS}{dt} = \frac{d_i S}{dt} + \frac{d_e S}{dt} = 0 \quad (2)$$

и при этом  $\frac{d_i S}{dt} > 0$ , тогда  $\frac{d_e S}{dt} < 0$ .

В термодинамике необратимых процессов важную роль играет диссипативная составляющая  $\frac{d_i S}{dt}$ , описывающая производство энтропии за счет внутренних источников в системе

$$\frac{d_i S}{dt} = \sum J_k \cdot X_k, \quad (3)$$

где  $X_k$  – обобщенная сила;  $J_k$  – вызванный ею обобщенный поток [6].

При разработке принципов рационального выбора и применения износостойких инструментальных материалов рассмотрим трибосистему «инструмент – обрабатываемый материал». Во вторичных структурах этой трибосистемы проходят следующие основные термодинамические потоки: поток тепла, поток вещества, поток физико-химических превращений и поток дополнительных воздействий (применение СОЖ, нестационарность режимов резания и т.п.).

Представим систему, состоящую из трущегося тела и источников энергии в зоне трения. Считаем, что источники энергии не имеют массы, и поэтому не обладают энтропией.

Рассмотрим изменение производства энтропии одного из контактирующих тел – режущего инструмента – при резании металлов. Вначале предположим, что ВС трущихся поверхностей инструмента проходят только два термодинамических потока: поток тепла и поток вещества. Тогда изменение производства энтропии ВС со временем в рассматриваемой системе (без учета взаимосвязи потоков между собой) равно:

$$\frac{d_i S}{dt} = \frac{dS_q}{dt} + \frac{dS_m}{dt}. \quad (4)$$

Здесь  $\frac{dS_q}{dt}$  – изменение производства энтропии теплового потока – равно:

$$\frac{dS_q}{dt} = J_q \cdot X_q, \quad (5)$$

где  $J_q$  – поток тепла,  $X_q = (\text{grad } T)/T^2$  – термодинамическая сила, вызывающая поток тепла ( $T$  – температура), по закону переноса теплоты Био-Фурье  $J_q = -\lambda \cdot \text{grad } T$  ( $\lambda$  – теплопроводность). Принимаем, что лишь некоторая часть ( $X$ ) механической энергии трения рассеивается потоком тепла, т.е.

$$J_q = f_m \cdot p_r \cdot V \cdot X \quad (X < 1) \quad (6)$$

( $f_m$  – коэффициент трения;  $p_r$  – удельная нормальная нагрузка;  $V$  – скорость резания-скольжения).

Тогда после соответствующих подстановок и преобразований выражение (5) примет вид

$$\frac{dS_q}{dt} = \frac{(f_m \cdot p_r \cdot V \cdot X)^2}{\lambda \cdot T^2}. \quad (7)$$

Изменение энтропии потока вещества в ВС равно:

$$\frac{dS_m}{dt} = J_m \cdot X_m, \quad (8)$$

где  $J_m$  – поток переноса вещества;  $X_m = (\text{grad } C)/T$  ( $C$  – концентрация вещества). По закону переноса вещества Фика  $J_m = m_e - D \cdot \text{grad } C$  ( $D$  – коэффициент диффузии). Принимаем, что некоторая часть ( $Y$ ) общего производства энтропии при трении расходуется на формирование потока вещества, т.е.

$$J_m = f_m \cdot p_r \cdot V \cdot Y \quad (Y < 1). \quad (9)$$

Тогда выражение (8) примет вид

$$\frac{dS_m}{dt} = f_m \cdot p_r \cdot V \cdot Y \cdot \frac{m_e}{D \cdot T}. \quad (10)$$

После подстановки выражений (8), (10) в формулу (4) получим:

$$\frac{d_i S}{dt} = \frac{(f_m \cdot p_r \cdot V \cdot X)^2}{\lambda \cdot T^2} + f_m \cdot p_r \cdot V \cdot Y \cdot \frac{m_e}{D \cdot T}. \quad (11)$$

Согласно теореме Пригожина И. [3] изменение производства энтропии со временем в системе в стационарном состоянии минимально и устойчиво в определенных пределах изменения параметров.

Дифференцируя выражение (11) по скорости резания  $V$  (скорости скольжения) – как независимой переменной рассматриваемой трибологической системы – и приравнявая результат к нулю, получим условие стационарности этой системы:

$$\frac{2 \cdot f_m^2 \cdot p_r^2 \cdot V \cdot X^2}{\lambda_{cp} \cdot T} - \left| Y \frac{m_c}{D_{cp}} \right| = 0. \quad (12)$$

Знак перед вторым членом принят отрицательным, так как из условия аддитивности [6] он пропорционален интенсивности изнашивания материала трущегося тела, а частицы износа удаляются из трибосистемы со своим содержанием энтропии.

Из выражения (12) можно определить поток вещества:

$$m_c = \frac{2 \cdot f_m^2 \cdot p_r^2 \cdot V \cdot X^2 \cdot D_{cp}}{\lambda_{cp} \cdot T \cdot Y}. \quad (13)$$

В выражении (13) введены средние значения теплопроводности  $\lambda_{cp}$  и коэффициента диффузии  $D_{cp}$  во вторичных структурах в предположении независимости их от скорости резания.

Очевидно, что величина интенсивности изнашивания режущего инструмента связана с потоком вещества  $m_c$ , который обуславливается градиентом концентрации вещества. И только при износе (удалении насыщенных слоев) возможно продолжение потока вещества, так как снова появляется градиент его концентрации. Тогда линейная интенсивность изнашивания  $J_h$  и поток вещества  $m_c$  могут быть связаны соотношением:

$$J_h = \frac{k \cdot m_c}{\rho \cdot V}, \quad (14)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности;

$\rho$  – плотность вещества изношенных частиц.

Коэффициент трения на задней поверхности режущих инструментов, как показано в работе [4,5], в основном определяется адгезионной составляющей коэффициента трения и равен

$$f_m = \frac{\tau_{nm}}{p_m}, \quad (15)$$

где  $\tau_{nm}$  – прочность адгезионных связей на срез;

$p_m$  – предельное нормальное напряжение на пластическом контакте.

Именно такой контакт имеет место на задней поверхности режущих инструментов, т.е. в выражении (13)  $p_r = p_m$ . Тогда выражение (15) можно представить в виде:

$$J_h = \frac{2 \cdot X^2 \cdot k}{Y} \cdot \frac{\tau_{nm}^2 \cdot D_{cp}}{\lambda_{cp} \cdot T \cdot \rho}. \quad (16)$$

Из выражения (16) видно, что интенсивность изнашивания инструментов по задней поверхности в значительной мере определяется температурными зависимостями  $\tau_{nm}(T)$ .

Формула (16) является аналитическим выражением интенсивности изнашивания режущих инструментов, которое получено из условия устойчивости стационарного состояния с минимальным производством энтропии на фрикционном контакте «инструмент – обрабатываемый материал».

Из выражения (16) следует, что в условиях, когда влияние физико-химических превращений в ВС фрикционного контакта является несущественным и его можно не принимать во внимание:

$$C = \frac{J_h \cdot T}{\tau_{nm}^2} = \frac{2 \cdot X^2 \cdot k}{Y} \cdot \frac{D_{cp}}{\lambda_{cp} \cdot \rho}. \quad (17)$$

Согласно (17) величина  $C$  не должна изменяться с повышением температуры  $T$ .

Таблица 1 - Точение сплава ХН70ВМТЮБ резцом ВК6М;  
 скорость резания  $V = 15 - 65$  м/мин; глубина  $t = 0,5$  мм; подача  $S = 0,08$  мм/об

Температура резания $T$ , К	$\tau_{nn}$ , МПа	$J_h \cdot 10^7$	$C \cdot 10^{10}$ , К / (МПа) <sup>2</sup>
873	620	1,1	2,5
923	540	0,9	2,8
973	500	0,8	2,9
1073	380	2	15
1173	220	4	96

Таблица 2 - Фрезерование стали 30ХГСА (HRCэ 35...38) однозубой торцевой фрезой Т15К6; скорость резания  $V = 40 - 120$  м/мин; глубина  $t = 0,5$  мм; подача на зуб  $S_z = 0,1$  мм/об

Температура резания $T$ , К	$\tau_{nn}$ , МПа	$J_h \cdot 10^5$	$C \cdot 10^8$ , К / (МПа) <sup>2</sup>
923	600	1,3	3,5
993	350	0,53	4,2
1023	300	0,45	4,8
1053	280	1,0	13
1093	210	1,32	33

Таблица 3 - Точение сплава ХН70ВМТЮБ резцом Р18Ф2К8М;  
 скорость резания  $V = 3 - 10$  м/мин; глубина  $t = 0,5$  мм; подача  $S = 0,12$  мм/об

Температура резания $T$ , К	$\tau_{nn}$ , МПа	$J_h \cdot 10^7$	$C \cdot 10^{10}$ , К / (МПа) <sup>2</sup>
593	780	1,1	1,1
693	740	0,9	1,1
763	640	0,7	1,3
783	620	1,8	3,7
813	600	4,8	10,8

В таблицах 1 – 3 представлены результаты экспериментальных исследований и значения величины  $C$ , вычисленные по этим результатам, в зависимости от температуры резания, изменяющейся за счет изменения скорости резания. Из таблиц видно, что для каждого состояния трибосистемы «инструмент – обрабатываемый материал» повышение температуры  $T$  в исследованном диапазоне до некоторой величины, названной как характерная  $T_{хар}$ , практически не изменяет величину  $C$ . Эта температура в работе [4] названа оптимальной температурой резания, т.к. при этой температуре интенсивность изнашивания режущего инструмента минимальна. Это свидетельствует: во-первых, о том, что до температур  $T_{хар}$  физико-химические превращения на фрикционном контакте не могут играть определяющей роли в формировании потока вещества и изнашивании инструмента (возможно в связи с тем, что именно до этих температур рассматриваемые превращения практически отсутствуют); во-вторых, соответствие интенсивности изнашивания режущих инструментов (по меньшей мере до температур  $T_{хар}$ ) выражению (16) показывает, что состояние ВС на фрикционном контакте «инструмент – обрабатываемый материал» может рассматриваться как стационарное с минимальным производством энтропии, устойчивое по отношению к изменению скорости (температуры) резания: в-третьих, при температурах  $T_{хар}$  и выше, очевидно, устанавливаются новые связи между эле-

ментами системы (потоком вещества и температурой), которые можно объяснить появлением новой структуры, способствующей упорядочению системы.

Такие результаты получены для существенно различных условий резания металлов: точение и фрезерование; твердосплавные и быстрорежущие инструментальные материалы; жаропрочные сплавы и конструкционные стали как обрабатываемые материалы.

В работе [11] показано, что если механическая энергия трения является единственным источником изменения производства энтропии, термодинамическая система не теряет устойчивости. Для возможности прохождения самоорганизации необходимо более одного независимых источника диссипации энергии. Ими могут быть несамопроизвольные химические реакции, инициируемые трением [6]. Следовательно, при температурах резания  $T_{\text{нар}}$  и выше на фрикционном контакте появляются новые источники диссипации энергии – несамопроизвольные химические реакции, инициируемые трением, с избыточным производством энтропии, часть которого может стать отрицательной величиной (в зависимости от вида происходящих химических реакций).

Тогда изменение производства энтропии ВС со временем в трибосистеме с учетом физико-химических превращений равно:

$$\frac{d_i S}{dt} = \frac{dS_g}{dt} + \frac{dS_m}{dt} + \frac{dS_\phi}{dt} \quad (18)$$

Здесь изменение со временем энтропии потока физико-химических превращений в ВС согласно [6] равно:

$$\frac{dS_\phi}{dt} = J_x \cdot X_x, \quad (19)$$

где  $J_x$  – скорость химических реакций;  $X_x$  – термодинамическая сила, вызывающая химические реакции;  $X_x = A/T$  ( $A$  – химическое сродство). Согласно исследованиям [4] вблизи термодинамического равновесия скорость химической реакции и химическое сродство связаны соотношением:

$$V_x = L_{11} \cdot R \cdot T \cdot \left( \exp \frac{A}{R \cdot T} - 1 \right) \quad (20)$$

где  $L_{11}$  – коэффициент сопряженных взаимодействий,  
 $R$  – газовая постоянная.

Разложив  $\left( \exp \frac{A}{R \cdot T} \right)$  в ряд и отбросив члены второй и далее степеней малости, получим:

$$V_x \approx L_{11} \cdot A. \quad (21)$$

Примем, что некоторая часть ( $Z$ ) механической энергии трения расходуется на физико-химические превращения в ВС, т.е.

$$J_x = f_m \cdot p_r \cdot V \cdot Z \quad (Z = 1 - X - Y). \quad (22)$$

Тогда выражение (19) примет вид

$$\frac{dS_\phi}{dt} = f_m \cdot p_r \cdot V \cdot Z \frac{V_x}{L_{11} \cdot T}. \quad (23)$$

После подстановки выражений (11) и (23) в (18) получим

$$\begin{aligned} \frac{d_i S}{dt} &= \frac{(f_m \cdot p_r \cdot V \cdot X)^2}{\lambda \cdot T^2} - \\ &- \left| f_m \cdot p_r \cdot V \cdot Y \frac{m_c}{D \cdot T} \right| \pm \\ &\pm \left| f_m \cdot p_r \cdot V \cdot Z \frac{V_x}{L_{11} \cdot T} \right| \end{aligned} \quad (24)$$

Если во вторичных структурах трибосистемы «инструмент – обрабатываемый материал» проходят в общем случае термодинамические потоки тепла, вещества, физико-химических превращений и дополнительных воздействий, то изменение производства ВС со временем будет равно

$$\begin{aligned} \frac{d_i S}{dt} &= \frac{(f_m \cdot p_r \cdot V \cdot X)^2}{\lambda \cdot T^2} - \\ &- \left| f_m \cdot p_r \cdot V \cdot Y \frac{m_c}{D \cdot T} \right| \pm \\ &\pm \left| f_m \cdot p_r \cdot V \cdot Z \frac{V_x}{L_{11} \cdot T} \right| + J_a \cdot X_a \end{aligned} \quad (25)$$

где  $J_a$  – поток дополнительных воздействий;  $X_a$  – термодинамическая сила, вызывающая поток дополнительных воздействий. Конкретизация величин  $J_a$  и  $X_a$  зависит от вида применяемых дополнительных воздействий. Это составляющая производства энтропии в общем случае не зависит от характеристик трения на фрикционном контакте.

Поэтому для прогнозируемой адаптации поверхностей трения и снижения интенсивности изнашивания необходимо применять инструментальные материалы и износостойкие покрытия, содержащие химические элементы и соединения, способные в определенных условиях вступать в химическое взаимодействие с обрабатываемым материалом и с окружающей средой, создавать неравновесные вторичные структуры с отрицательным производством энтропии. Дополнительные воздействия на зону резания (применение СОЖ, нестационарность элементов режима резания и т.п.) должны способствовать этому.

Таким образом, представленные экспериментальные результаты подтвердили прохождение самоорганизации при температурах резания  $T_{хар}$  и выше и образование на фрикционном контакте «инструмент – обрабатываемый материал» неравновесных диссипативных структур.

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бершадский, Л.И. Структурная термодинамика трибосистем [Текст] / Л.И. Бершадский. – Киев: Знание, 1990. – 253 с.
2. Костецкий, Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении [Текст] / Б.И. Костецкий, М.Г. Носовский, Л.И. Бершадский. – Киев: Техника, 1976. – 26 с.
3. Пригожин, И. Современная термодинамика [Текст] / И. Пригожин, Д. Кондипуди. – М.: Мир, 2002. – 461 с.

6. Шустер, Л.Ш. Покрyтия и смазка в высокотемпературных подвижных сопряжениях и металлообработке [Текст] / Л.Ш. Шустер [и др.] – М.: Машиностроение, 2008. - 318 с.

**Мигранов Марс Шарифуллович**

Доктор технических наук, профессор

Россия, г.Уфа

Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ), 450000, г.Уфа - центр, ул. К.

Маркса, 12,

кафедра ОКМиМ.

Тел. (3472) 73-07-34.

E – mail: [migmars@mail.ru](mailto:migmars@mail.ru)

---

M.SH. MIGRANOV

## **THE THERMODYNAMIC ANALYSIS OF CONTACT PROCESSES AT METALS CUTTING**

*In article on the basis of thermodynamics of nonequilibrium processes questions of resistance wear increase possibility of the cutting tool and other tribotechnical parameters hard loaded high-temperature interfaces are considered.*

**Key words:** *cutting of metals, contact process*

### **BIBLIOGRAPHY**

- [1] Bershadsky L.I. Structural thermodynamics of tribosystems / L.I.Bershadsky. – Kiev: Znanye, 1990. – 253 p.
- [2] Kostetsky B. I. Superficial strength of materials at a friction / B.I.Kostetsky, M.G.Nosovsky, L.I.Bershadsky. – Kiev: Technika, 1976. – 26 p.
- [3] Prigozhin I. Modern thermodynamics / I.Prigozhin, D.Kondipudi. – Moscow: Mir, 2002. – 461 p.
- [4] Makarov A.D.optimization of metals cutting processes / A.D.Makarov. – Moscow: Mashinostroenie, 1976. – 278 p.
- [5] Shuster L.Sh., Migranov M. Sh. The device for probe of adhesive interaction. The patent for useful model № 34249 from 24.06.2003 y.
- [6] Shuster L.Sh., Krioni N.K., Sholom V. Ju, Migranov M. Sh. Coverings and lubricant in high-temperature mobile interfaces and metal working. – Moscow: Mashinostroenie, 2008. - 318 p.

**Migranov Mars Sharifulovich**

Dr.Sci.Tech., professor

Russia, Ufa

Ufa state aviation technical university (USATU), 450000, Ufa - center, K.Marx's street, 12,

Chair OkMiM.

Phone. (3472) 73-07-34.

E – mail: [migmars@mail.ru](mailto:migmars@mail.ru)

---

В. А. НОСЕНКО, А. Г. БУРЦЕВ, В. И. КАПЛЯ

## АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УСТРАНЕНИЯ ЗАВИСАНИЙ ПЛК В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ ИЗМЕРЕНИЙ И УПРАВЛЕНИЯ

*В статье рассматривается схема и алгоритм решения задачи по повышению надежности работы системы управления, имеющей в своем составе группу программируемых логических контроллеров, образующих информационно-управляющую сеть. Предложенный метод основан на организации системы взаимного перезапуска контроллеров по питанию.*

**Ключевые слова:** информационно-управляющая сеть, зависание контроллера, идентификация зависания контроллера.

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема надежной работы системы управления производственными процессами является актуальной для оборудования, оснащенного современными программируемыми контроллерами (ПЛК). В информационно-измерительных системах, а также в АСУТП обычно используется структура, состоящая из группы программируемых логических контроллеров (ПЛК) и центральной ЭВМ, организующей визуализацию технологического процесса, сбор и архивирование измерительной информации с каждого ПЛК и посылку управляющих команд. В такой системе на ПЛК обычно возлагают функции опроса датчиков, устройств ввода команд, и выдачи управляющих сигналов на исполнительные механизмы. Связь между датчиками, исполнительными элементами и ПЛК реализуют через аналоговый или цифровой интерфейс (RS-485), а связь между ЭВМ и группой ПЛК может быть реализована через сетевой интерфейс (Ethernet).

Типовая ЭВМ не имеет средств непосредственного воздействия на какие-либо силовые электрические цепи, но может это делать опосредовано, через контроллеры, с которыми имеет информационно-управляющую связь.

Проблема зависания ПЛК состоит в том, что могут существовать сочетания системных и рабочих данных, определяющих состояние контроллера, которые не позволяют ему самостоятельно обновить эти данные и перейти на выполнение актуальных процедур обработки информации и управления внешними устройствами. Подобные зависания возникают в результате:

- сбоя интерфейса RS-485 одного или нескольких устройств в сети (например, в результате электрических наводок);
- некорректно написанной программы, когда контроллер при некоторой комбинации управляющих команд входит в подпрограмму, из которой не может выйти;
- в случае ошибки системного программного обеспечения контроллера.

Зависания ПЛК особенно опасны в таких технологических процессах, где бездействие системы управления может привести к аварии или выходу из строя технологического оборудования. В качестве примера можно привести систему мониторинга и управления группой плавильных трансформаторов, предназначенную для регулирования активной мощности электрических печей [1, 2].

### ИДЕНТИФИКАЦИЯ АНОМАЛЬНОЙ РАБОТЫ ПЛК

Причинами возникновения аномальной работы ПЛК могут являться внешние и внутренние факторы процесса работы контроллера. Возможные формы проявления зависания ПЛК, которые идентифицируются программой ЦЭВМ, можно определить следующим образом:

- 1) Ошибка работы интерфейса RS-485, которую можно выявить, анализируя системную переменную Last Error модуля Modbus Master, если ПЛК выступает в роли "мастера" се-

ти. Значение этой переменной при нормальной работе устройства в сети равно "0". При потере связи с устройством её значение становится "81". Ошибка интерфейса идентифицируется, если на протяжении N циклов опроса устройств в сети RS-485 ПЛК все они выдают сигнал ошибки интерфейса.

2) Зависание или некорректная работа входов/выходов ПЛК. Ошибка может быть идентифицирована путём сравнения вектора текущего состояния входов/выходов ПЛК с вектором недопустимых состояний.

3) Зависание системного программного обеспечения контроллера может быть зафиксировано, если ПЛК не отвечает на запрос ЦЭВМ, или структура пакета ответного сообщения содержит ошибки.

4) Выход за допустимые пределы сразу группы измеряемых величин, прежде всего обнуление или достижение верхнего или нижнего предела диапазона регистрации [3].

Процесс идентификации аномальной работы контроллеров должен осуществляться специальными процедурами центральной ЭВМ, которые должны учитывать особенности контролируемых величин и текущий режим работы объекта управления.

Восстановление нормальной работы контроллера в выше указанных случаях осуществляется перезапуском ПЛК, для чего достаточно выключить его на короткое время и затем опять включить. Перезапуск контроллера заставляет его обновить все системные и рабочие параметры, то есть завершить бесконечный цикл зависания независимо от его принадлежности к программной или системной области.

Рассмотрим возможность создания автоматической системы устранения зависаний ПЛК в информационной сети на примере программируемых контроллеров фирмы ОВЕН, которые имеют типичную для большинства контроллеров этого класса системную и аппаратную структуры. Эти контроллеры программируются с помощью свободно распространяемой среды CoDeSys, поддерживающей язык стандарта МЭК 61131-3 и имеют ряд цифровых интерфейсов для обмена данными: Ethernet, RS-485 (Modbus), RS-232 [4]. ПЛК ОВЕН имеют встроенный инструмент обнаружения и устранения зависания контроллера. Таймер WatchDog предназначен для автоматической перезагрузки контроллера в случае, если его рабочий цикл превысил установленный лимит. Этот инструмент эффективен при бесконечных циклах или ошибках в конфигурировании программных модулей в CoDeSys. Однако на практике встречаются ситуации, когда программа внутри ПЛК продолжает выполняться, но его интерфейсная часть зависает.

### **РЕАЛИЗАЦИЯ СБРОСА ПЛК ПО ПИТАЮЩЕМУ НАПРЯЖЕНИЮ**

Предполагается, что каждый ПЛК в группе опрашивает ряд датчиков и принимает команды от устройства человеко-машинного интерфейса (операторской панели). Каждый интервал времени он передаёт измеренную информацию на ЦЭВМ. Программа в ПЛК имеет ряд базовых переменных технологического процесса, вводимых оператором с панели или накопленных в процессе функционирования системы. Поэтому важным требованием для системы устранения сбоев является восстановление вектора переменных состояния ПЛК после перезагрузки контроллера.

Алгоритм действий системы по устранению зависания контроллера в сети, должен состоять из следующих этапов:

- 1) идентификация аномальной работы ПЛК с помощью центральной ЭВМ;
- 2) реализация сброса ПЛК (путём снятия и включения питающего напряжения) с помощью соседнего контроллера;
- 3) восстановление вектора параметров состояния ПЛК по последним достоверным данным, зафиксированным в ЦЭВМ.
- 4) контроль корректной работы ПЛК по вектору параметров состояния.

Предлагаемые методы направлены на повышение автономности системы по устранению зависаний ПЛК. В работе не ставится задача резервирования работающего контроллера или его узлов [5], но предложенная система устранения зависаний ПЛК решает схожие про-

блемы. Описанный алгоритм следует применять как радикальное средство в случае неэффективности или невозможности перезагрузки ПЛК по команде ЦЭВМ программными утилитами контроллера.

Схема сброса ПЛК путём перезагрузки по питанию рассмотрена на примере системы, состоящей из ЭВМ и двух контроллеров ОВЕН, у которых задействованы релейные выходы. Схема взаимного сброса контроллеров по питающему напряжению приведена на рисунке 1. Например, если зависнет ПЛК1, то ЭВМ идентифицирует факт зависания и отправит команду ПЛК2 на сброс по питанию ПЛК1.

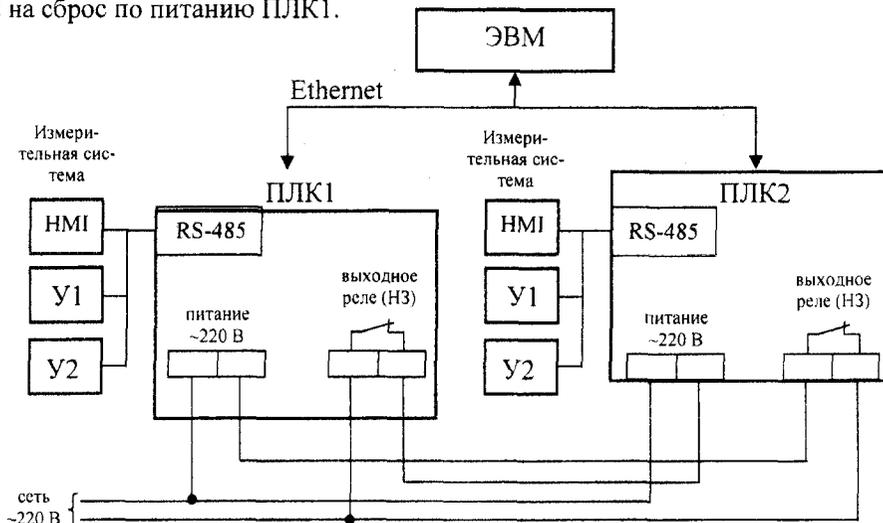


Рисунок 1 – Схема взаимного сброса контроллеров по питающему напряжению

На рисунке: НМИ - человеко-машинный интерфейс (операторская панель); У1, У2 - устройства в сети RS-485 (датчики или исполнительные элементы).

В соответствии со схемой одна фаза питающего напряжения каждого ПЛК проходит через релейный нормально замкнутый (НЗ) выход другого ПЛК. Таким образом, каждый из ПЛК в результате соответствующей команды от ЭВМ имеет возможность временно отключить питание соседнему контроллеру.

Данная аппаратная реализация может быть распространена и на группу ПЛК. В этом случае может быть предложена схема кольцевого контроля ПЛК (рисунок 2). На рисунке стрелками показана возможность сброса питания ПЛК. Предполагается, что опрос контроллеров ведётся по возрастанию номера. Если идентифицирована ошибка в  $i$ -ом ПЛК, то при опросе  $(i + 1)$ -го ПЛК ему посылается команда: сбросить  $i$ -ый контроллер. Таким образом, порядок опроса устройств не нарушается.

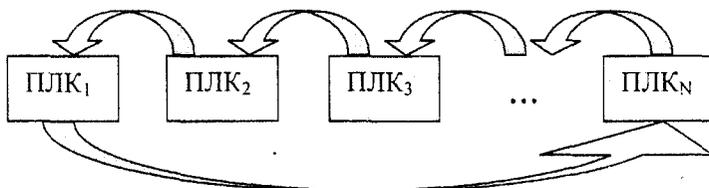


Рисунок 2 - Схема кольцевого контроля группы ПЛК

Выход из строя группы соседних по номеру ПЛК приведёт к их восстановлению по цепочке, начиная с ПЛК со старшим номером. Время восстановления системы определяется

как:  $T_{\text{восст}} \leq T \cdot (N+1)$ , где  $T$  – период опроса всей группы ПЛК;  $N$  – число вышедших из строя соседних ПЛК.

### ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВЕКТОРА ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ ПЛК

Алгоритм процедуры ЦВЭМ циклического опроса ПЛК и корректного устранения зависимостей группы ПЛК приведен на рисунке 3.

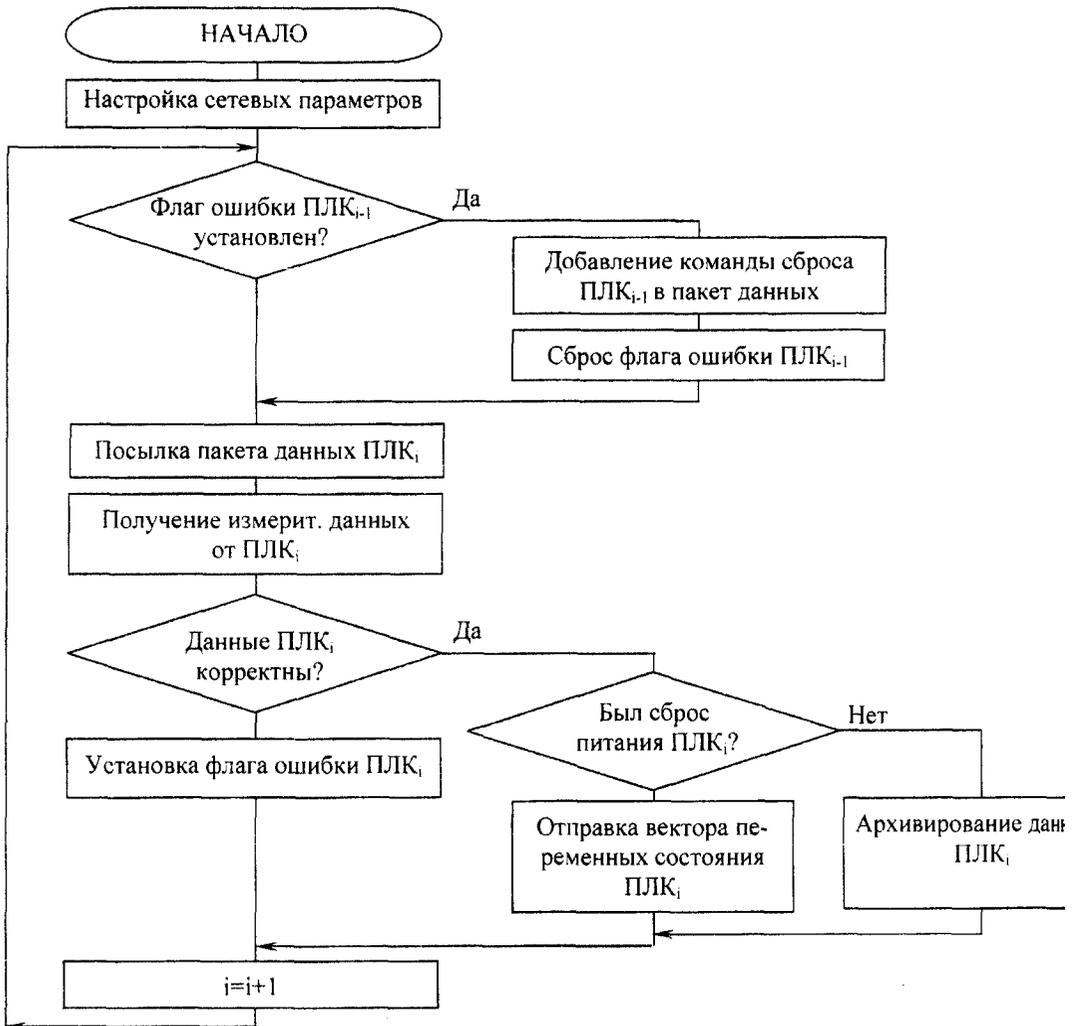


Рисунок 3 - Алгоритм опроса и корректного устранения сбоев в группе ПЛК

Блок настройки сетевых параметров включает установку параметров сетевого соединения TCP или UDP протокола (если используется Ethernet).

Пакет данных, который ЭВМ отправляет на опрашиваемый ПЛК содержит команду запроса данных и может содержать команду на сброс соседнего (младшего по номеру) ПЛК.

Полученный от очередного ПЛК пакет данных с измерительной информацией проверяется на корректность и, в случае обнаружения зависания, выставляется флаг ошибки, по которому при обращении к следующему ПЛК предыдущий контроллер будет перезапущен. Сохранение вектора переменных состояния программы ОВЕН ПЛК в данной схеме реализуется путем архивирования измерительных данных каждого ПЛК на жестком диске ЭВМ. Ар-

хивирование данных происходит в том случае, если данные корректны и зависания ПЛК не было идентифицировано.

В результате перезапуска ПЛК по команде от соседнего ПЛК (или в результате кратковременного пропадания напряжения сети) на него посылается вектор его переменных состояния, сохранённый на ЦЭВМ в последний достоверный сеанс связи. Подтверждение того, что ПЛК был сброшен, осуществляется проверкой факта перезагрузки контроллера за межопросный период.

Идентификация перезагрузки ПЛК ОВЕН может быть выполнена внутренними средствами самого контроллера. Эта функция может быть реализована с помощью программного модуля Statistic и содержащейся в нём переменной Power Status, которая меняет своё состояние на "false" при пропадании питания ПЛК. Причём обнаружение в CoDeSys изменения состояния переменной Power Status должно осуществляться с помощью триггера (тип данных F\_TRIG). Другая переменная (например Pit\_Off : bool) по значению Power Status должна становиться в "true", если недавно было отключение ПЛК и держать это состояние до следующего запроса с ЭВМ. Переменная Pit\_Off должна быть типа Retain - энергонезависимая.

Фрагмент кода в CoDeSys определения факта пропадания питания ПЛК:

```

ROGRAM PLC_PRG
VAR
FTRIG1 : F_TRIG;
END_VAR
VAR RETAIN
Pit_Off : BOOL;
END_VAR

FTRIG1 (CLK:= %IX9.3); (*%IX9.3 - адрес
переменной Power Status*)
IF FTRIG1.Q THEN Pit_Off:=TRUE; END_IF
    
```

Таким образом, разработанная система устранения сбоев ПЛК может быть интегрирована в существующую информационно-управляющую систему, содержащую группу логических контроллеров и ЦЭВМ. Для этого требуется наличие у каждого ПЛК одного свободного дискретного выхода и внесение изменений в программы ЦЭВМ и ПЛК в соответствии с предложенными алгоритмами.

### **ВЫВОД**

Предложенная система идентификации и устранения зависаний ПЛК может использоваться для повышения надежности работы информационной и управляющей системы. Надежность повышается за счет автоматической идентификации зависаний контроллеров, а также автономного принятия мер по их устранению путём сброса ПЛК по питанию. Система использует схему взаимного "контроллер-контроллер" аппаратного перезапуска по командам ЦЭВМ. Анализ измерительной информации на достоверность, получаемой от ПЛК, позволяет оперативно идентифицировать случаи заклинивания любого контроллера системы управления.

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Носенко, В.А. Адаптивная система автоматического управления активной мощностью печи сопротивления [Текст] / В. А. Носенко, А. Г. Бурцев, А. С. Гольцов // Вестник Самарского муниципального института управления. – Самара, 2011. – №2 (17). – С. 170-177.
2. Алхимов, Е. А. Идентификация электрических параметров печи сопротивления [Текст] / Е. А. Алхимов, А. Н. Довгаль, О. Б. Иванова, А. Г. Бурцев, В.И. Капля, В. А. Носенко // Измерительная техника. – 2011. – № 7. – С. 46-48.
3. Браганец С.А., Повышение надёжности измерительной информации [Текст] / Браганец С.А., Савчиц А.В., Севастьянов Б.Г. // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2011. – № 2. – С. 46.
4. Разарёнов, Ф.С. ОВЕН ПЛК – аналог продукции мировых лидеров за умеренную цену [Текст] / Ф.С. Разарёнов // Промышленные АСУ и контроллеры. - 2007. - №10. - С. 32-35.
- 5.5 Фёдоров, Ю.Н. Основы построения АСУТП взрывоопасных производств. В 2-х томах. [Текст] / Ю.Н. Федоров. – М. : СИНТЕГ, 2006. – 632 с.

**Владимир Андреевич Носенко**  
Доктор технических наук, профессор  
Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ  
Тел. (8443) 38-10-49  
E-mail: [nosenko@volpi.ru](mailto:nosenko@volpi.ru)

**Андрей Георгиевич Бурцев**  
Кандидат технических наук  
Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ  
Тел. (8443) 39-25-34  
E-mail: [burtsev-86@mail.ru](mailto:burtsev-86@mail.ru)

**Виктор Иванович Капля**  
Кандидат технических наук, доцент  
Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ  
Тел. (8443) 38-68-35  
E-mail: [yikmail53@yandex.ru](mailto:yikmail53@yandex.ru)

V. A. NOSENKO, A. G. BURTSEV, V. I. KAPLYA

### THE AUTOMATIC SYSTEM OF REMOVAL PLC FREEZES IN AUTOMATED SYSTEM OF MEASUREMENT AND CONTROL

*The scheme and the algorithm of increase the reliability of control system having a group of programmable logic controllers and forming an information network is considered in the article. The offered technique based on the organization the system of controllers mutual restart through supply.*

**Key words:** *information control system, freeze of controller, the identification of PLC freeze.*

### BIBLIOGRAPHY

- [1] Nosenko V.A. Adaptive control system of active power of resistance furnace [Text] / V.A. Nosenko, A.G. Burtsev, A.S. Goltsov // The journal of Samara state institute of control. - Samara, 2011. - 2011. - №2 (17). - p. 170-177.
- [2] Alhimov E.A. Identification of the electrical parameters of a resistance furnace [Text] / E.A. Alhimov, A.N. Dovgal, O.B. Ivanova, A.G. Burtsev, V.I. Kaplya, V.A. Nosenko // Measurement Techniques. - 2011. - Vol. 54, №7 (September). - С. 808-812.
- [3] Braganets S.A., Increase of measurement data reliability [Text] / Braganets S.A., Savchits A.V., Sevastianov B.G. // Industrial ACS and controllers. - 2011. - №2. - p. 46.
- [4] Razarionov F.S. OWEN PLC is the low cost analog of world leaders production [Text] / F.S. Razarionov. - 2007. - №10. - Pp. 32-35.
- [5] Fedorov U.N. The basis of ACSTP building for hazardous productions. Two parts. [Text] / U.N. Fedorov. - M. : SENERG, 2006. - 632 p.

**Vladimir Andreevich Nosenko**  
doctor of science, professor  
Volzhsky politechnical institute  
Tel. 8(8443)38-10-49  
E-mail: [nosenko@volpi.ru](mailto:nosenko@volpi.ru)

**Andrey Georgievich Burtsev**  
candidate of science,  
Volzhsky politechnical institute  
Tel. 8(8443) 39-25-34  
E-mail: [burtsev-86@mail.ru](mailto:burtsev-86@mail.ru)

**Victor Ivanovich Kaplya**  
candidate of science,  
Volzhsky politechnical institute  
Tel. 8(8443) 38-68-35  
E-mail: [yikmail53@yandex.ru](mailto:yikmail53@yandex.ru)

## ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВЫРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ТУРБИНЫ ГТД МЕТОДОМ ГАЗОПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

*В данной работе рассматриваются перспективы ремонта деталей авиационных двигателей, длительная эксплуатация которых приводит к возникновению изношенных поверхностей. Предложенная технология ремонта позволяет не только восстановить эксплуатационные свойства, но и увеличить ремонтпригодность деталей. Приведен анализ полученных структур, представлены результаты исследований жаростойких покрытий.*

*Ключевые слова:* ремонт, восстановление поверхностей.

К задачам любого авиаремонтного производства относится устранение результатов изнашивания и повреждений рабочих поверхностей деталей в процессе их эксплуатации. Представляется весьма важной работа по исследованию механизма износа деталей и разработке перспективных методов ремонта, так как расходы на изготовление новых деталей взамен изношенных требуют значительных материальных вложений.

При разборке и дефектации двигателей ДЗ0-КП проводили визуальный контроль сопловых аппаратов. В процессе контроля на торцах внутренних колец и внутренних поверхностях полок лопаток выявлена выработка контактирующих поверхностей, связанная с вибрациями и воздействием газового потока на проточную часть лопаток (рисунки 1 и 2).

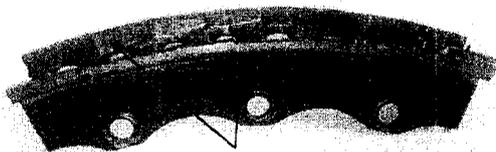


Рисунок 1 - Фрагмент внутреннего кольца СА с изношенными поверхностями



Рисунок 2 - Износ полки лопатки СА

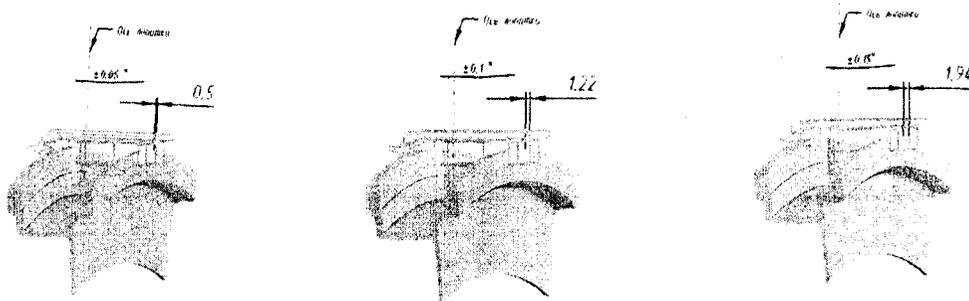
При изготовлении и ремонте сопловых аппаратов минимальный зазор, при котором отсутствует касание внутренних поверхностей полок лопаток с торцами внутреннего кольца, определяется допусками на их изготовление и теплофизическими свойствами материалов, из которых они изготовлены.

При работе двигателя лопатка соплового аппарата, жестко закрепленная верхней полкой к наружному кольцу, сопротивляясь силам газового потока, подвергается кручению и вибрационным нагрузкам. Все поперечные сечения цапфы лопатки и нижней полки, поворачиваясь вокруг общей оси, начинают смещаться относительно закрепленного сечения. Величина смещения тем больше, чем больше выбираемый лопаткой зазор.

В связи с тем, что величина крутящего момента во всех сечениях остается неизменной, поэтому и напряжения во всех поперечных сечениях цапфы и нижних полок лопаток одинаковы. Напряжения передаются на наружные поверхности внутреннего кольца, и пока касательные напряжения не превышают предела пропорциональности, деформации пропорциональны напряжениям. При увеличении касательных напряжений первичное усталостное разрушение материала наступает на поверхности, в районе контура максимального контакта.

Проведенные исследования строения зоны выработки внутренних колец показали наличие перегрева материала.

Для обеспечения прогнозирования повреждаемости деталей предложена модель накопления повреждений, позволяющая определять напряженно-деформируемое состояние деталей от действия газовых и центробежных сил, температурных нагрузок при сложном процессе изменения напряжений и деформаций с учетом требований обеспечения базовых прочностных характеристик (рисунок 3).

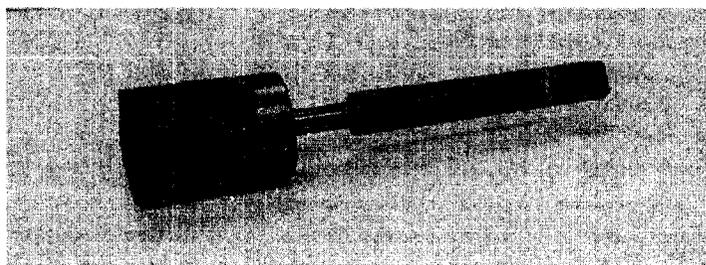


**Рисунок 3 - Модель истирания поверхностей внутреннего кольца**

Так как детали сопловых аппаратов изготовлены из жаропрочных дорогостоящих материалов, экономически целесообразно производить ремонт с постановкой восстановленных деталей на двигатели. Перспективным направлением совершенствования качества защитных покрытий является использование газотермического метода. Одним из важнейших факторов, определяющих качество композита металл - покрытие, является подготовка поверхности подложки и количественная оценка эффективности воздействия на подложку различных технологических операций.

Были проведены опытные работы по отработке технологии восстановительного ремонта методом газотермического напыления для сравнительной оценки свойств и качества покрытий в зависимости от метода механической обработки (токарная обработка и шлифование) и материала покрытия (ВКНА и ПВ-НХ16Ю6Ит).

Для проведения исследований было изготовлено двадцать образцов из материала ХН77ТЮР, соответствующего марке внутреннего кольца (рисунок 4).



**Рисунок 4 - Внешний вид образца**

При подготовке к напылению на десяти образцах была выполнена токарная обработка торца, и на десяти образцах проведено шлифование торцевой поверхности.

Для обеспечения требуемой шероховатости и очистки поверхности подложки от загрязнений и для химической активации подложки, была выполнена сухая абразивная обработка электрокорундом марки 25А зернистостью F20. Давление воздуха при обработке составило 35 МПа, время обдувки образцов – 1 мин.

На подготовленную поверхность наносили газоплазменное покрытие ВКНА и ПВ-НХ16Ю6Ит на установке А-3000S.

Критериями эффективности покрытия служат внешний вид, твердость и оценка адгезионной прочности напыленного покрытия на образцах-свидетелях.

Режимы напыления обеспечили отсутствие цветов побежалости на покрытии и образцах. При внешнем осмотре при помощи лупы 4-х кратного увеличения контролировали общее состояние поверхности напыления всех образцов. Отслоений, трещин, вздутий, сколов и других дефектов покрытий на поверхности не обнаружено.

Толщину напыленного слоя определяли толщиномером, проводя измерения до и после окончания процесса нанесения покрытия (таблица 1).

Таблица 1 – Толщина нанесенного покрытия

Покрытие	№ образца (ток. обработка)					№ образца (шлифование)				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Толщина покрытия, мм									
ВКНА	0,32	0,33	0,30	0,33	0,29	0,31	0,32	0,33	0,28	0,30
ПВ-НХ16ЮБИт	0,28	0,31	0,31	0,32	0,31	0,32	0,29	0,30	0,29	0,32

Основным критерием для оценки качества износостойких и жаростойких покрытий является прочность сцепления покрытия с деталью. Испытание прочности сцепления напыленного покрытия с основным материалом проводили по методике вытягивания штифта по схеме, представленной на рисунке 5.

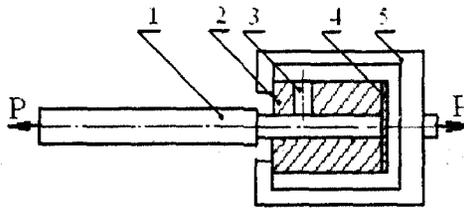


Рисунок 5 - Схема определения прочности сцепления покрытия с основой на образцах

Методика испытаний заключалась в следующем. Центральный стержень 1, устанавливаемый во втулку 2 с зазором (0,008...0,034) мм был зафиксирован при помощи винта 3. Затем проведены работы с образцами-свидетелями, описанные выше по подготовке поверхности под напыление. Для ликвидации влияния расклепывания торца от обдувки винт 3 выкручивался, вытягивался стержень 1 и удалялись заусенцы для свободной установки стержня во втулку. После чего стержень 1 вновь фиксировали во втулке 2 при помощи винта 3 и выполняли напыление торца 4. Напыленный образец устанавливали в разрывную машину типа Р-0,5, зажимали в губках 5 при вывернутом винте 3 и проводили вытягивание центрального стержня 1 до отрыва покрытия (рисунок 6).



Рисунок 6 - Внешний вид образца-свидетеля после выполненных испытаний на прочность

Величина предела прочности сцепления покрытия каждого образца определялась по формуле

$$\sigma_B = P K / F \tag{1}$$

где  $P$  - разрушающее усилие, Н;

$F$  - площадь сечения стержня, мм<sup>2</sup>;

$K$  – коэффициент, учитывающий толщину покрытия.

Затем подсчитывалось среднее арифметическое значение прочности пяти полученных результатов и определялась твердость покрытий на плоских образцах. Данные исследований сведены в таблицу 2.

Таблица 2 - Прочность сцепления и твердость покрытий в зависимости от метода механической обработки под напыление

Покрытие	$\sigma_B$ , МПа (токарная обработка)	$\sigma_B$ , МПа (шлифование)	Твердость HRC, ед.
ВКНА	26,6	15,6	50
ПВ-НХ16Ю6Ит	19,4	14,7	32

Исследования показывают, что правильной подготовкой поверхности к напылению можно обеспечить надежное сцепление напыленного материала с подложкой (основным металлом).

Микроструктурный анализ был выполнен с использованием микроскопа ММР-2Р при увеличении в 200 раз. Образцы для проведения металлографического анализа изготавливались по месту напыления, внутренних дефектов в покрытии и на границе покрытие – подложка (основной материал) в виде трещин, отслаивания и т. д. не обнаружено. Микроструктура напыленных материалов удовлетворительная и представлена на рисунках 7, 8 и 9.



Рисунок 7 - Микроструктура покрытия ВКНА после шлифования



Рисунок 8 - Микроструктура покрытия ПВ-НХ16Ю6Ит после шлифования



Рисунок 9 - Микроструктура покрытия ПВ-НХ16Ю6Ит после токарной обработки

Металлографический анализ переходной зоны покрытие-подложка показывает, что при напылении покрытия ВКНА и ПВ-НХ16Ю6Ит, оба плотно прилегают к основанию, так что границу между ними практически можно наблюдать только после проведения травления.

Механическая обработка напыленных покрытий – исключительно ответственная и трудная в осуществлении операция. Так как необходимо было произвести механическую обработку поверхностей с повышенной твердостью и обеспечением шероховатости Ra 2,5, то был проведен экспериментальный подбор скорости резания при шлифовании.

Заданная шероховатость торцевых поверхностей внутреннего кольца обеспечилась при встречном шлифовании периферийной поверхностью круга с интенсивным охлаждением, так как процесс шлифования сопровождается интенсивным тепловыделением. Скорость составила 25 м/мин при подаче 0,03 мм/об. Указанные режимы резания исключили образование трещин и выкрашиваний. Решающее влияние на высоту микронеровностей оказывают размеры режущих зерен абразивного круга (рисунок 10).

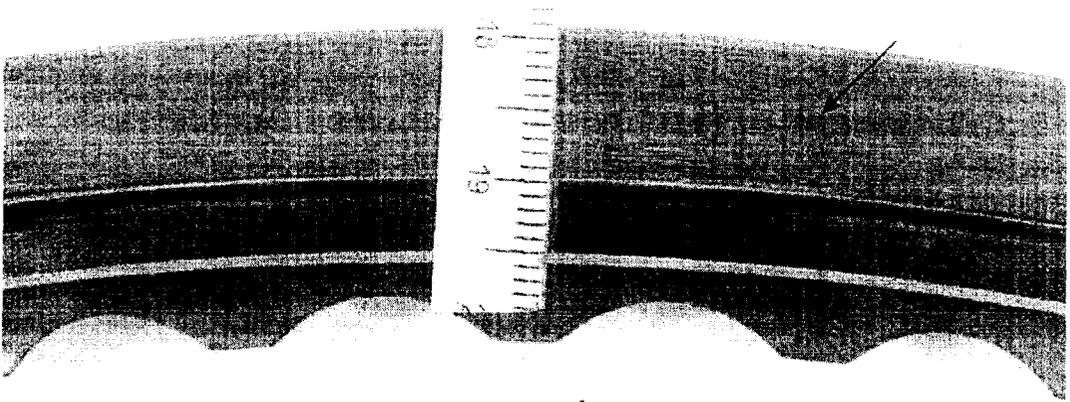


Рисунок 10 - Внешний вид обработанного торца внутреннего кольца методом шлифования

Проведенные исследования позволили установить, что:

1. Возможно восстановление изношенных поверхностей на деталях сопловых аппаратах авиационных двигателей как материалом ВКНА, так и ПВ-НХ16Ю6Ит.
2. Вследствие того, что материал ПВ-НХ16Ю6Ит имеет твердость меньше чем ВКНА, то при эксплуатации не будет происходить истирание ответной детали.
3. Прочность сцепления при газотермическом напылении покрытий ВКНА и ПВ-НХ16Ю6Ит с деталью из материала ХН77ТЮР выше требуемой (11,5 МПа).
4. При подготовке поверхности под напыление методом токарной обработки прочность сцепления выше, чем при шлифовании.

## ВЫВОД

Формирование защитных покрытий является одним из перспективных направлений совершенствования ремонта газотурбинных двигателей. Использование покрытий позволяет увеличить ресурс работы деталей и экономичность двигателей. Работоспособность защитных покрытий в значительной степени определяется технологией их нанесения, которая определяет величину остаточных напряжений, микроструктуру, прочность сцепления и плотность покрытий.

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юркевич, С. Н. Исследование возможности применения газодинамического напыления для восстановления деталей авиатехники [Текст] / С. Н. Юркевич [и др.]. - Новые материалы и технологии производства. 2005. - № 5. - С. 24 - 29.
2. Костиков, В. И. Плазменные покрытия [Текст] / В. И. Костиков, Ю. А. Шестерин. - М.: Металлургия, 1978. - 160 с.
3. Сонин, В. И. Газотермическое напыление материалов в машиностроении [Текст] / В. И. Сонин. - М.: Машиностроение, 1973. - 152 с.

Марина Николаевна Ситникова  
 Аспирант  
 ФГОУ «Рыбинский государственный  
 авиационный технологический университет»  
 Тел: (+7) 9806561951  
 E-mail: ruvva@yandex.ru

M. N. SITNIKOVA

## TECHNOLOGY OF RESTORATION OF THE WORN SURFACES GTE TURBINE DETAILS WITH THE GAZ-PLAZMA METHOD

*Prospects of repair of the aviation engines details which long operation leads to emergence of worn-out surfaces are considered in this work. The offered technology of repair allows not only to restore operational properties, but also to increase maintainability of details. The analysis of the received structures is provided; results of researches of heat resisting coverings are presented.*

**Keywords:** repair, restoration of surfaces.

### BIBLIOGRAPHY

[1] Yurkevich, S.N. Investigation of possibility of application of a gazodynamic spraying for restoration of details of aviation equipment [Text] / S.N. Yurkevich [etc.]. - New materials and production technologies. 2005. - No. 5. - Pp. 24-29.

[2] Kostikov, V.I. Plasma coverings [Text] / V. I. Kostikov, Shesterin. M: Metallurgy, 1978. - 160 p.

[3] Sonin, V.I. Gazothermal spraying of materials in mechanical engineering [Text] / V.I. Sonin. - M: Mashinostroenie, 1973. - 152 p.

**Marina Nikolaevna Sitnikova**

Post-graduate student

Rybinsk State Aviation Technical University

Telephone: (+7) 9806561951

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

УДК 621.787.4

А.Н. ТКАЧЕНКО

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ МЕДИ, ОБРАБОТАННЫХ КОМБИНИРОВАННЫМ ИНСТРУМЕНТОМ ДЛЯ ФРЕЗЕРОВАНИЯ И АЛМАЗНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ

*В данной статье рассмотрена математическая модель шероховатости поверхности электротехнических деталей из меди, обработанных комбинированным инструментом для фрезерной обработки и алмазного выглаживания на специальном приспособлении.*

**Ключевые слова:** шероховатость обработанной поверхности, поверхностно-пластическое деформирование, алмазное выглаживание, обработка меди.

Любое изделие машиностроительного производства должно удовлетворять заданным требованиям точности, надёжности, производительности, а также соответствовать заявленным эксплуатационным свойствам и функциональному предназначению. Соблюдение этих условий, а самое главное, непрерывное их совершенствование, обеспечит устойчивую конкурентоспособность такого изделия.

Одним из немаловажных параметров качества изделий машиностроительного производства является состояние их поверхностного слоя, которое определяется геометрическими (макроотклонение, волнистость, шероховатость) и физико-механическими (микротвёрдость, остаточные напряжения, структура) характеристиками. Все они в большинстве своём зависят от технологии механической обработки деталей и качества сборки узлов. Примером таких деталей, являются диоды большой мощности (рисунок 1), выпускаемые ОАО «Электротекс».

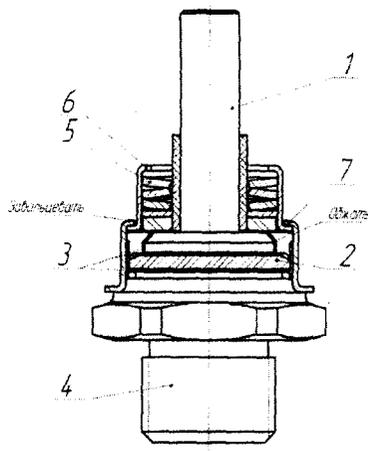


Рисунок 1 – Конструкция плоскостного диода большой мощности:

1 – анод; 2 – полупроводниковый элемент; 3 – посеребренные прокладки из тонкой меди; 4 – основание;  
5 – тарельчатые пружины; 6 – стакан; 7 – кольцо

Технология механической обработки торцевой поверхности детали «Основание», используемая на ОАО «Электротекс» предусматривает две операции: точение на токарном станке с расположением детали по оси шпинделя и шлифование на плоскошлифовальном станке с использованием касетного приспособления. Такая технология далека от совершенства, так как после точения торцовая поверхность имеет низкое качество, а в центре торца из-за погрешности установки резца по оси шпинделя остается не срезанный «хвост». Процесс шлифования является трудоемким и не самым удачным решением при обработке такого материала, как медь. При шлифовании меди имеет место быстрое засаливание шлифовального круга, что требует частой его правки. Кроме того, наблюдается шаржирование абразивных зерен в обрабатываемую поверхность, ухудшающее ее качество.

Для повышения производительности и качества обработки плоских торцевых поверхностей деталей из меди и других мягких материалов авторами разработан комбинированный способ, сочетающий обработку резанием и пластическим деформированием [1, 2]. Способ реализуется на фрезерном станке за один проход с использованием комбинированного инструмента [3, 4] и приспособления [5, 6]. Данный способ позволяет обеспечить требуемые параметры качества изделий при наименьших затратах производства.

Для расчёта средней высоты профиля шероховатости поверхности, в работе [7] авторами была получена методика, применительно к процессу обработки поверхностно-пластическим деформированием (ППД) (рисунок 2):

$$Ra = 0,25 \cdot (h_1 + h_2 + h_3 + h_4). \quad (1)$$

где  $h_1$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная геометрией и кинематикой перемещения рабочей части инструмента, мкм;

$h_2$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности, мкм;

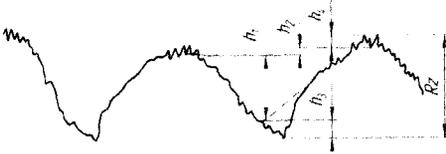
$h_3$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная пластическими деформациями в зоне контакта инструмента и заготовки, мкм;

$h_4$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная шероховатостью рабочей части инструмента, мкм.

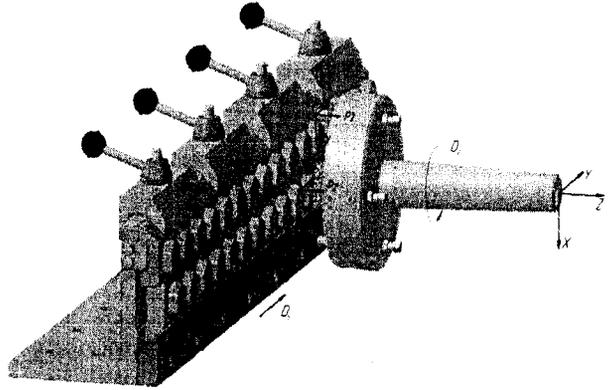
В процессе работы зуб фрезы контактирует с заготовкой по передней грани, через срезаемый слой металла, и по задней грани, через поверхность резания. Отделяющаяся стружка при обработке будет воздействовать на фрезу в виде равнодействующей силы  $R$ .

Помимо сил резания, возникающих при лезвийной обработке, при обработке плоской торцевой поверхности комбинированным инструментом наблюдаются ещё силы, возникающие при алмазном выглаживании. Эти силы не равны по модулю и направлению. При использовании мно-

гоместного приспособления, эти силы могут действовать как по отдельности, так и совместно. В результате чего изменяется результирующая сила, действующая на фрезу и вызывающая отжатие инструмента. Эту силу, можно разложить на следующие составляющие: осевая составляющая  $P_z$ , окружную (тангенциальную) составляющую  $P_x$  и радиальную составляющую  $P_y$  (рисунок 3).



**Рисунок 2 – Исходная схема для расчета высоты профиля шероховатости поверхности при механической обработке**



**Рисунок 3 – Силы резания при фрезеровании**

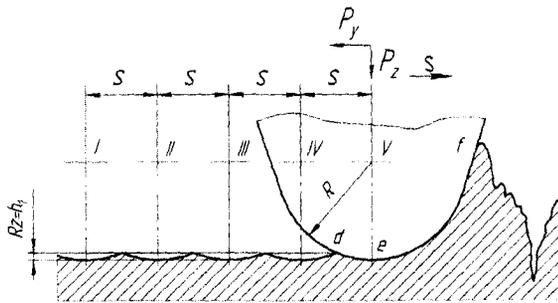
Так как равнодействующая сила не постоянна в процессе обработки при помощи комбинированного инструмента для фрезерования и приспособления, то предложенная методика для расчёта средней высоты профиля шероховатости поверхности, применительно к процессу ППД нуждается в корректировке.

Высота гребешков шероховатости поверхности детали из меди  $h_1$ , обработанной алмазным выглаживанием (рисунок 4), определяется по зависимости [7]:

$$h_1 = \frac{S^2}{8R}, \tag{2}$$

где  $S$  – подача, мм/об;

$R$  – радиус рабочей части алмаза в мм.



**Рисунок 4 – Кинематическая модель обработки торцевой поверхности заготовки**

Воздействуя на технологическую систему, нормальная составляющая силы выглаживания вызывает отжатие инструмента от обрабатываемой поверхности, что приводит к увеличению износа выглаживающей поверхности инструмента, сокращению периода его стойкости, повышению температуры в зоне резания, увеличению шероховатости и снижению точности обработки.

Согласно работам А.Г. Суслова, колебательные перемещения рабочего элемента инструмента при отделочно-упрочняющей обработке поверхностно-пластическим деформированием относительно обрабатываемой поверхности, обусловленные неоднородностью её исходной шероховатости и твёрдости, не оказывают влияния на образование шероховатости и ими можно пренеб-

речь, но из-за непостоянства сил при данном случае обработки, требуют обратить внимание на данную составляющую профиля шероховатости.

Составляющая профиля шероховатости  $h_2$  при алмазном выглаживании определяется амплитудой колебаний вершины выглаживателя относительно обрабатываемой поверхности заготовки с приложенной к ней осевой составляющей силы  $P_z$ . Кроме этого, на параметр  $h_2$  оказывает влияние изменение твёрдости обрабатываемой детали при прохождении инструмента по различным участкам с неравномерной твёрдостью (рисунок 5).

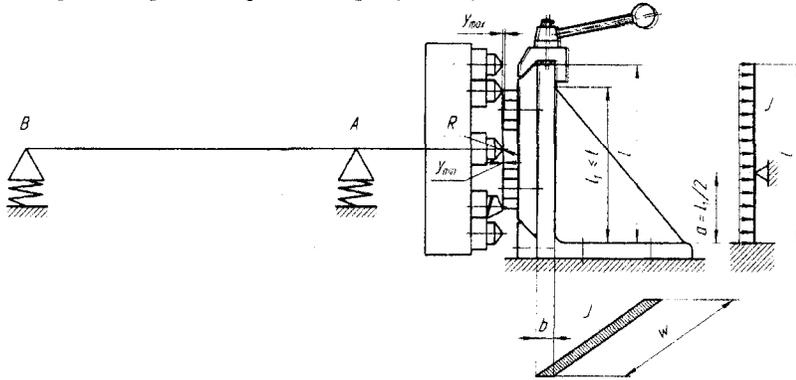


Рисунок 5 – Расчетная схема к определению коэффициента  $h_2$

Сделаем следующие допущения [8]:

- 1) система, состоящая из шпинделя с установленной на его конце комбинированной фрезой, рассматривается как абсолютно жесткий двухопорный ротор;
- 2) стол станка считать абсолютно неподвижным в направлении оси шпинделя;
- 3) колебания рассматриваются в плоскости параллельной оси вращения шпинделя.

$$h_2 = |y_{\max} - y_{\min}|, \quad (3)$$

где  $y_{\max}$  – максимальное значение упругого перемещения плоской торцовой поверхности приспособления под действием осевой составляющей сил обработки, м;

$y_{\min}$  – минимальное значение упругого перемещение плоской торцовой поверхности приспособления под действием осевой составляющей сил обработки, м.

Упругое перемещение поверхности приспособления с заготовками под действием осевой составляющей сил обработки определяем по формуле:

$$y_1 = A \cdot \frac{P_z \cdot l^3}{E \cdot J}, \quad (4)$$

где  $A$  – коэффициент учитывающий характер распределение нагрузки и вид опор, определяется по рисунку 6 [8];

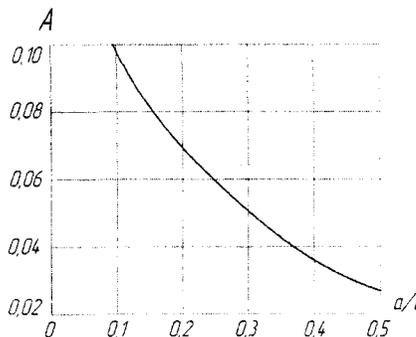


Рисунок 6 – Коэффициент учитывающий характер распределение нагрузки и вид опор

$P_z$  – осевая составляющая силы, действующая со стороны инструмента на приспособление с заготовками, Н;

$l$  – высота боковой поверхности приспособления от верхней грани опоры, м;

$E$  – модуль упругости, для материала из которого изготовлен корпус приспособления для фрезерования и последующего алмазного выглаживания плоских торцовых поверхностей электротехнических деталей, МПа;

$J$  – момент инерции прямоугольного сечения приспособления,  $\text{м}^4$ ;

$a$  – середина высоты ребра жёсткости приспособления, м;

$$a = \frac{l_1}{2}, \quad (5)$$

где  $l_1$  – высота ребра жёсткости приспособления, м (рисунок 5).

Момент инерции прямоугольного сечения приспособления рассчитывается по формуле [9]:

$$J = \frac{b \cdot w^3}{12}, \quad (6)$$

где  $w$  – длина корпуса приспособления, м (рисунок 5);

$b$  – толщина корпуса приспособления в плоскости, параллельной плоскости стола, м.

Полная осевая составляющая силы, действующая со стороны комбинированного инструмента на приспособление с заготовками определяется по формуле:

$$P_z = 0,5 \cdot \sum_0^i P_{xi} + \sum_0^j P_{z \text{ выг } j}, \quad (7)$$

где  $P_{xi}$  – силы резания при фрезеровании для  $i$ -ого реза, Н;

$P_{z \text{ выг } j}$  – осевая составляющая силы выглаживания, Н.

Силы резания при фрезеровании рассчитывается по формуле из [10]:

$$P_x = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot s_x^y \cdot B^u \cdot z}{D_{\text{рез}}^a \cdot n^w} \cdot K_{MP}, \quad (8)$$

где  $C_p$  – поправочный коэффициент;  $t$  – глубина резания, мм;  $s_x$  – подача на зуб фрезы, мм/об;  $B$  – диаметр торцовой поверхности заготовки, мм;  $z$  – число зубьев фрезы;  $D_{\text{рез}}$  – диаметр расположения резцов, относительно центра вращения фрезы, мм;  $n$  – частота оборотов шпинделя, об/мин;  $x, y, u, q, w$  – показатель степени;  $K_{MP}$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние качества меди на силовые зависимости.

Согласно работе [11] подача на зуб фрезы и оптимальный радиус расположения резцов, относительно центра вращения фрезы рассчитывается по формуле:

$$S_x = S_{\text{рез}} = S_{\text{выг}} \cdot n$$

$$D_{\text{рез}} = 2 \cdot \left\{ \left[ \left( \frac{D_{\text{заг}}}{2} \cdot [(Z-1) \cdot 1,5 \cdot \sin 60^\circ + 1] + \Delta_\Phi \right) + S_z \right] + \left[ \sqrt{R_{\text{выг}}^2 - (R_{\text{выг}} - t)^2} + \Delta \right] - \left[ k + \sqrt{R_{\text{рез}}^2 - (R_{\text{рез}} - t_1)^2} \right] \right\}. \quad (9)$$

Наибольшей по величине силой при алмазном выглаживании, является осевая составляющая  $P_z$  [12]. Тангенциальная составляющая  $P_x$  и радиальная составляющая  $P_y$  не превышают 1...5 % величины силы  $P_z$  и ими можно пренебречь. Силы, действующие на инструмент в процессе выглаживания, зависят от размеров и формы рабочей части алмаза, пластичности обрабатываемого материала и величины внедрения алмазного выглаживающего индентора в обрабатываемую поверхность.

Для определения осевой составляющей силы выглаживания комбинированным инструментом, воспользуемся следующей зависимостью [13]:

$$P_{z \text{ выг}} = 0,025 \cdot \pi \cdot g \cdot HV \cdot R^2 \cdot \varepsilon \cdot \left( 5 + \pi + \frac{2 - \varepsilon}{\sqrt{2\varepsilon}} \right), \quad (10)$$

где  $P_{z \text{ выг}}$  – осевая составляющая силы выглаживания в Н;

$g$  – ускорение свободного падения;

$HV$  – твёрдость по Виккерсу обрабатываемого материала;

$R$  – радиус рабочей части алмаза в мм;

$\varepsilon = h^*/R$  – относительная величина внедрения алмаза в обрабатываемую поверхность.

При обеспечении высокой жёсткости комбинированного инструмента, величина внедрения алмазного выглаживателя  $h$ , может равняться  $h_3$  – величине предварительного заданного натяга алмазного выглаживателя.

Так как в процессе обработки одновременно на шероховатость получаемой поверхности влияет резец и (или) алмазный выглаживатель, то полная осевая составляющая сил при фрезеровании комбинированной фрезой в определённый момент времени изменяется от  $P_{z \min}$  до  $P_{z \max}$ . Перепишем уравнение (3) для определения амплитуды упругого перемещения поверхности приспособления с заготовками под действием неравномерной осевой составляющей сил обработки:

$$h_2 = \frac{12 \cdot A \cdot (P_{z \max} - P_{z \min}) \cdot l^3}{E \cdot b \cdot w^3}, \quad (11)$$

В уравнение (7) подставим (8) и (10), а затем полученное выражение в уравнение (11), получим:

$$h_2 = \frac{0,3 \cdot A \cdot \left[ \frac{200 \cdot C_p \cdot (t_{\max}^x - t_{\min}^x) \cdot s_x^y \cdot B^u \cdot z}{D_{\text{рез}}^q \cdot n^w} \cdot K_{MP} \cdot i + \pi \cdot g \cdot (HV_{\max} - HV_{\min}) \cdot R^2 \cdot \varepsilon \cdot \left( 5 + \pi + \frac{2 - \varepsilon}{\sqrt{2\varepsilon}} \right) \cdot j \right] \cdot l^3}{E \cdot b \cdot w^3}, \quad (12)$$

где  $i$  – количество резцов, участвующих в процессе фрезерования плоской торцовой поверхности заготовок из электротехнической меди;

$j$  – количество алмазных выглаживателей, участвующих в процессе выглаживания плоской торцовой поверхности заготовок.

Упрощая формулу (12), получим:

$$h_2 = \frac{6 \cdot A \cdot [(P_{x \text{ фрез max}} - P_{x \text{ фрез min}}) \cdot i + 2 \cdot (P_{z \text{ выг max}} - P_{z \text{ выг min}}) \cdot j] \cdot l^3}{E \cdot b \cdot w^3}. \quad (13)$$

После прохождения инструмента по поверхности происходит частичная компенсация деформации на величину  $\Delta_{\text{упр}}$  (рисунок 7). В связи с этим образуются дополнительные микронеровности в результате упругих и пластических деформаций обрабатываемого материала заготовки в зоне контакта с алмазным выглаживателем. Эти дополнительные микронеровности можно охарактеризовать составляющей профиля шероховатости  $h_3$  при ППД. В ходе преобразований А.Г Сулов установил зависимость для расчёта остаточной высоты исходной шероховатости при поверхностно-пластическом деформировании:

$$h_3 = Rp_{\text{исх}} \cdot \left( 1 - 12 \cdot \left[ \frac{1200 \cdot P_z \cdot (1 + f^2)^{0,5}}{\pi \cdot R \cdot HB_{\text{исх}} \cdot (h_{\text{кин}} - h_{\text{упр}})} \right] \right)^{0,5}, \quad (14)$$

где  $Rp_{\text{исх}}$  – шероховатость от максимального выступа до средней линии;

$P_z$  – осевая составляющая силы, Н;

$f$  – обобщенный коэффициент трения системы инструмент-заготовка;

$R$  – радиус скругления вершины алмазного выглаживателя, м;

$HB_{\text{исх}}$  – твёрдость поверхности детали по Бринеллю, после фрезерования резцами, МПа;

$h_{\text{кин}}$  – глубина внедрения инструмента в обрабатываемую поверхность при скольжении.

Определяется по формуле [7]:

$$h_{\text{кин}} = \left( Rz_{\text{исх}} \cdot \left[ \frac{\pi \cdot R \cdot (\pi \cdot P_z \cdot HB_{\text{исх}})^{0,5}}{2} - \frac{2 \cdot P_z \cdot (1 + f^2)^{0,5}}{\pi \cdot R \cdot HB_{\text{исх}}} \right] \right)^{1/3}, \quad (15)$$

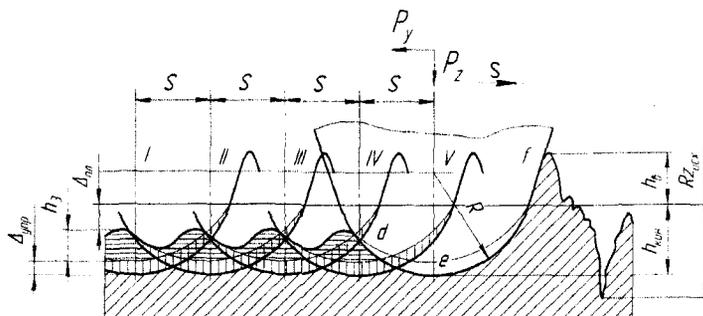


Рисунок 7 – Исходная схема для расчёта составляющей шероховатости  $h_3$  при поверхностно-пластическом деформировании

$h_{упр}$  – упругое восстановление металла в зоне обработки. Определяется по формуле [7]:

$$h_{упр} = \frac{11 \cdot (\pi \cdot HB_{исх})^{0,5}}{32 \cdot E} \quad (16)$$

Составляющая профиля шероховатости  $h_4$  при алмазном выглаживании определяется шероховатостью рабочей поверхности индентора –  $Rz_{инс}$  и зависит от материала используемого для наконечника алмазного выглаживателя [12, 13, 14]:

$$h_4 = Rz_{инс} \leq 0,008 \text{ мкм} \quad (17)$$

Подставив зависимости (2), (13), (14) и (17) в формулу (1) получим среднюю высоту профиля шероховатости при алмазном выглаживании плоских торцовых поверхностей комбинированным инструментом для фрезерования:

$$Ra = 0,25 \cdot \left( \frac{S^2}{8R} + \frac{6 \cdot A \cdot \left[ (P_{x \text{ фрез max}} - P_{x \text{ фрез min}}) \cdot i + 2 \cdot (P_{z \text{ выг max}} - P_{z \text{ выг min}}) \cdot j \right] \cdot l^3}{E \cdot b \cdot w^3} + \right. \\ \left. + Rp_{исх} \left[ 1 - 12 \cdot \frac{1200 \cdot \left( 0,5 \cdot \sum_0^i P_{x \text{ фрез } j} + \sum_0^j P_{z \text{ выг } j} \right) \cdot (1 + f^2)^{0,5}}{\pi \cdot R \cdot HB_{исх} \cdot (h_{кни} - h_{упр})} \right] \right)^{0,5} + Rz_{инс} \quad (18)$$

Полученная математическая модель позволяет рассчитать шероховатость поверхности электротехнических деталей из меди, обработанных комбинированным инструментом для фрезерования и алмазного выглаживания.

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сотников, В.И. Комбинированная обработка плоских торцовых поверхностей деталей из меди [Текст] / В.И. Сотников, А.Н. Дерли, А.Н. Ткаченко // Известия Орёл ГТУ. – Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – Орёл: Орёл ГТУ, 2008. – №2–3/270 (545). – С. 33–37.
2. Степанов, Ю.С. Реализация комбинированного способа обработки плоских торцов деталей из меди [Текст] / Ю.С. Степанов, В.И. Сотников, А.Н. Ткаченко // Известия Орёл ГТУ. – Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – Орёл: Орёл ГТУ, 2009. – №2–2/274 (560). – С. 46–50.
3. Сотников, В.И. Фреза для комбинированной обработки плоских торцовых поверхностей деталей из мягких материалов [Текст] / В.И. Сотников, А.Н. Ткаченко // Известия Орёл ГТУ. – Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – Орёл: Орёл ГТУ, 2008. – № 2-4/270 (545). – С. 87-91.
4. Фреза комбинированная для обработки плоских торцовых поверхностей заготовок деталей из мягких материалов; пат. 2338631 С1 Рос. Федерация. № 2007120954/02 ; заявл. 04.06.2007 ; опубл. 20.11.2008. Бюл. №32. – 6 с.

5. Сотников, В.И. Приспособление для обработки плоских торцов заготовок детали «Основание» [Текст] / В.И. Сотников, А.Н. Ткаченко // Известия Орёл ГТУ. – Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – Орёл: Орёл ГТУ, 2008, № 2-3/270 (545). – С. 92-96.
6. Устройство для обработки плоских торцевых поверхностей заготовок деталей из мягких сталей: пат. 2350435 С1 Рос. Федерация. № 2007120955/02 ; заявл. 04.06.2007 ; опубл. 27.03.2009. Бюл. №9. – 6 с.
7. Суслов, А.Г. Научные основы технологии машиностроения [Текст] / А.Г. Суслов, А.М. Дальский. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
8. Колганов, И.М. Проектирование приспособлений, прочностные расчёты, расчёт точности сборки [Текст] : учеб. пособие / И.М. Колганов, В.В. Филиппов. - Ульяновск: УлГТУ, 2000. – 99 с.
9. Горшков, А.Г. Сопrotивление материалов [Текст] : учеб. пособие / А.Г. Горшков, В.Н. Трошин, В.И. Шалашин. – 2-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 544 с.
10. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 [Текст] / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 496 с.
11. Ткаченко, А.Н. Оптимизация конструкции комбинированного инструмента для фрезерной обработки и алмазного выглаживания торцовых поверхностей деталей из меди [Текст] / А.Н. Ткаченко, В.И. Сотников // Известия Орёл ГТУ. – Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – Орёл: Орёл ГТУ, 2009. – №2/3 (280). – С. 44–50.
12. Одинцов, Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием [Текст] / Л.Г. Одинцов. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
13. Одинцов, Л.Г. Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием [Текст] / Л.Г. Одинцов. – М.: Машиностроение, 1981. – 160 с.
14. Торбило, В.М. Процесс алмазного выглаживания и его эффективность [Текст] / В.М. Торбило // Сб. Новые процессы обработки резанием / под редакцией Ф.С. Демьянюка. – М.: Машиностроение, 1968. – С. 150–169.

**Артём Николаевич Ткаченко**

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

Аспирант кафедры «АСИС», Орёл

Тел.: 89606436332

E-mail: [artyom270286@yandex.ru](mailto:artyom270286@yandex.ru)

A.N. TKACHENKO

## MATHEMATICAL MODEL OF THE SURFACE ROUGHNESS OF ELECTRICAL PARTS COPPER TREATED COMBINED TOOL FOR MILLING AND THE DIAMOND CARESS

*In this paper, the mathematical model of surface roughness of Electro-ray parts of copper processed by a combined instrument for milling and diamond burnishing of a special device.*

**Key words:** machined surface roughness, surface plastic deformation, the diamond caress, copper processing.

### BIBLIOGRAPHY

- [1] Sotnikov, V.I. Combined the treatment of flat surface detail of copper [Text] / V.I. Sotnikov, A.N. Derli, A.N. Tkachenko // New OSTU. – Series «Fundamental and applied problems of engineering and technology». – Orel: Orel STU, 2008. – №2–3/270 (545). – Pp. 33–37.
- [2] Stepanov, Y.S. Realization of combined method processing flat end parts made of copper [Text] / Y.S. Stepanov, V.I. Sotnikov, A.N. Tkachenko // New OSTU. – Series «Fundamental and applied problems of engineering and technology». – Orel: Orel STU, 2009. – №2–2/274 (560). – Pp. 46–50.
- [3] Sotnikov, V.I. Cutter for the combined treatment of a flat machined surface of parts made of soft materials [Text] / V.I. Sotnikov, A.N. Tkachenko // New OSTU. – Series «Fundamental and applied problems of engineering and technology». – Orel: Orel STU, 2008. – № 2-4/270 (545). – Pp. 87-91.
- [4] Combines milling cutter for machining soft material work piece faces: a patent 2338631 C1 Rus. Federation. № 2007120954/02 ; declared 04.06.2007 ; published 20.11.2008. Bulletin №32. – 6 p.
- [5] Sotnikov, V.I. Device for handling flat ends of the pieces parts «Reason» [Text] / V.I. Sotnikov, A.N. Tkachenko // New OSTU. – Series «Fundamental and applied problems of engineering and technology». – Orel: Orel STU, 2008, № 2-3/270 (545). – Pp. 92-96.
- [6] Device to machine flat end face surfaces of soft-steel work pieces: a patent 2350435 C1 Rus. Federation. № 2007120955/02 ; declared 04.06.2007 ; published 27.03.2009. Bulletin №9. – 6 p.
- [7] Suslov, A.G. Scientific basis of mechanical engineering. [Text] / A.G. Suslov, A.M. Dalskiy. – M.: Engineering, 2002. – 684 p.

- [8] Kolganov, I.M., Filippov V.V. Design adaptations, strength calculations, the calculation accuracy of the assembly [Text]: studies. allowance / I.M. Kolganov, V.V. Filippov. – Ulyanovsk: UI STU, 2000. – 99 p.
- [9] Gorshkov, A.G., Resistance [Text]: studies. allowance /A.G. Gorshkov, V.N. Troshin, V.I. Shalashilin. - 2nd ed., Rev. – M.: FIZMATLIT, 2005. – 544 p.
- [10] Directory technologist-mechanic. In 2 vols 2 [Text] / ed. A.G. Kosilova and R.K. Meshcheryakova. - 4th ed., Revised. and add. – M.: Engineering, 1986. – 496 p.
- [11] Tkachenko, A.N. Optimization design of combined tool for milling processing and the diamond caress end surface of components made of copper [Text] / A.N. Tkachenko, V.I. Sotnikov // New OSTU. – Series «Fundamental and applied problems of engineering and technology». – Orel: Orel STU, 2009. – №2/3 (280). – Pp. 44–50.
- [12] Odintsov, L.G. Hardening and finish details surface plastic deformation [Text] / L.G. Odintsov. – M.: Engineering, 1987. – 328 p.
- [13] Odintsov, L.G. Finishing details of diamond caress and caress vibration [Text] / L.G. Odintsov. – M.: Engineering, 1981. - 160 p.
- [14] Torbilo, V.M. The process of diamond caress and efficiency [Text] / V.M. Torbilo // Proc. New machining processes / edited by F.S. Demjanjuk. – M.: Engineering, 1968. – Pp. 150–169.

**Artyom Nikolaevich Tkachenko**

FSEI HVT «State University - ESPC»

Ph.D. student of «Automated machine tools and instrumental systems», Orel

Phone: +79606436332

E-mail: [artyom270286@vandex.ru](mailto:artyom270286@vandex.ru)

УДК 621.91

М.В. УШАКОВ, И.А. ВОРОБЬЕВ, И.В. УШАКОВА

## МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ЛИНИЙ СКОЛЬЖЕНИЯ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ

*В статье рассматривается возможность описания линиями скольжения напряженного состояния зоны линии скольжения при резании. Приводятся результаты расчетов.*

*Ключевые слова:* угол сдвига, линия скольжения, резание.

### ВВЕДЕНИЕ

Условия механической обработки металлов резанием в настоящее время являются трудно аналитически описываемыми в виду сложности процессов, происходящих в зоне резания. Это связано с образованием «застойных» зон, зон упругой и пластической деформации, а также зон разрушения.

Принятый в большинстве научных работ подход, связанный с совмещением «плоскости сдвига» с линией скольжения является малоинформативным, так как дает значительные величины деформаций и сил резания, значительно расходящиеся с экспериментальными данными.

Наиболее перспективным является подход, изложенный в [1], когда текстура металла в зоне формирования стружки, полученная на шлифах корней, является продолжением линий скольжения. Это соответствует линиям Людерса – Чернова в теории пластической деформации (рисунок 1).

В этом случае линию 1-2-3-8 можно условно принять как границу жестко-пластической зоны, «плоскость сдвига» (линия 4-6) – как границу процесса деформирования, а зону 4-5-6 – как зону формирования линий скольжения.

Такое представление позволяет предположить, что вдоль линии 4-6 соотношение нормальных напряжений остается постоянным, что приводит к формированию «прямолинейной» или спиральной стружек. При этом элементные силы стружкообразования, действующие на данной линии, направлены под одним углом действия  $\omega$ .

Это позволяет предположить, что перпендикулярно линии силы  $R$  - стружкообразования проходят линии главных напряжений, которые также под одним углом подходят к линии 4-6. Из этого следует, что и линии скольжения подходят к «плоскости сдвига» также под одним углом  $u = 45^\circ - \omega$ .

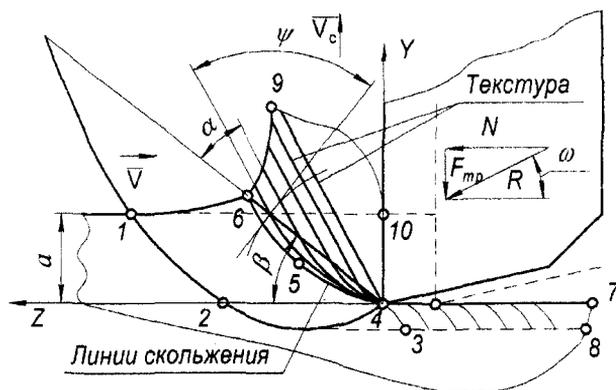


Рисунок 1 - Построение линий скольжения

Согласно результатам экспериментов [1, 2] этому углу соответствует угол текстуры металла корней стружек. Данный эффект был замечен еще Н.Н. Зоревым, однако он не получил дальнейшего развития в его работах.

При обработке металла с малыми скоростями резания ( $V < 1$  м/мин) [2] и получении условно «прямолинейной» стружки случае линии скольжения, охватывающие зону деформации, должны выходить из зоны близкой к полюсу 4 и пересекать линию 4-6 под одним углом, соответствующем расположению текстуры (рисунок 1).

Таким требованиям соответствуют только форма экспоненциальных функций вида:

$$r = e^{n(\varphi - c)}$$

Для эмпирического описания зоны линий скольжения необходимо определить параметры  $n$  и  $c$  для крайней линии, проходящей через точки 4-6. Остальные линии данного семейства могут быть построены изменением с заданным шагом параметра  $c$ .

Параметр  $n$  соответствует углу пересечения линий скольжения с радиальными линиями и равен:

$$n = \operatorname{ctg} \alpha$$

Параметр  $c$  для линии, проходящей через точку 2 определится как:

$$c = -\left(\frac{\ln r_{const}}{n} - \varphi\right)$$

где  $r_{const}$  – длина линии 4-6.

Таким образом, деформацию металла в зоне резания можно рассматривать как изменение скорости движения металла (с  $\bar{V}$  на  $\bar{V}_c$ ) за счет перемещения его частиц по линиям скольжения.

Линия скольжения 2-4 должна выходить к свободному краю деформированного металла под углом, равным  $45^\circ$ . Однако, если рассматривать корни стружек (пример - рисунок 2 [2]), то можно видеть, что для пластического материала в точке 2 – перехода от напыла к стружке – наблюдается излом линии, являющейся границей металла, и даже его разрушение на этой границе, что делает проблематичным определение угла выхода линии скольжения на этой границе.

Это делает возможным предположение, что создаваемые на свободной границе напряжения препятствуют развитию деформаций сдвига, но значения их так велики, что приводят к разрушению металла в точке 2 и выходу линии скольжения под требуемым углом  $45^\circ$ .

К обработанной поверхности линии скольжения также должны выходить под углом  $45^\circ$ . Если данный участок 12-13 (рисунок 2) принять прямолинейным, касательным к линии скольжения, то такое допущение не внесет значительных погрешностей ввиду малой длины данного участка (не более 5 % от линии 2-12-13).

Известное значение величины угловой деформации на линии сдвига

$$j = ctg\beta + tg(\beta - \gamma)$$

позволяет рассчитать напряжения на линии сдвига.

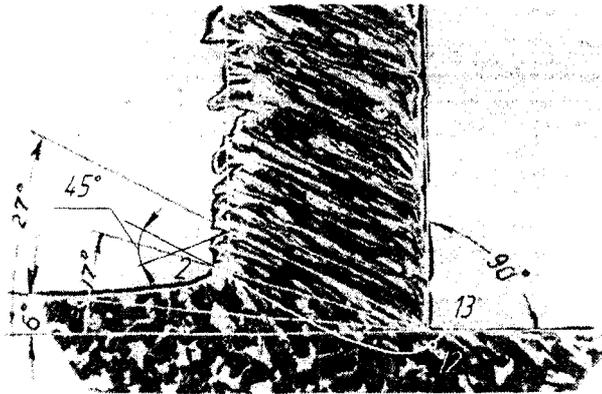


Рисунок 2 - Фотография корня стружки и положение рассматриваемой линии скольжения [2]

Выше приведенные предположения при известном коэффициенте трения  $\mu$  стружки о переднюю поверхность инструмента, позволяют рассчитать составляющие силы стружкообразования  $P_z$  и  $P_y$ .

Просуммировав элементарные силы вдоль всей линии 2-12-13, можно получить составляющие силы резания  $R$  (рисунок 3):

$$\begin{cases} R_{\Sigma y} = \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} P_{zi} \cdot d\varphi + q_z \\ R_{\Sigma x} = \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} P_{yi} \cdot d\varphi + q_y \end{cases}$$

где составляющие сил  $q_z$  и  $q_y$  соответствуют линейному участку  $l_{12-13}$  [1].

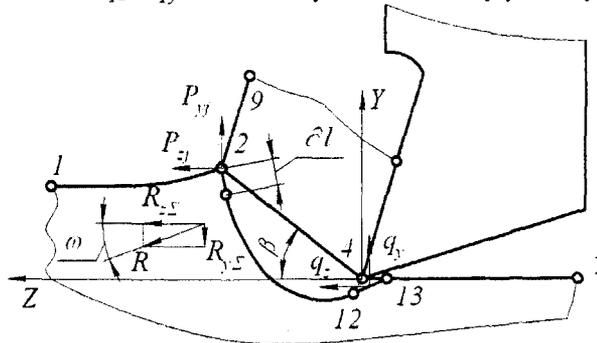


Рисунок 3 - Параметры элементарного участка линии скольжения

Если течение металла предполагается после его прохождения линии 2-8-12-13, то соотношение составляющих  $R_{\Sigma z}$  и  $R_{\Sigma y}$  на этой линии должно давать угол действия  $\omega$ , то есть:

$$\frac{R_{\Sigma y}}{R_{\Sigma z}} = tg\omega$$

значения  $R_{\Sigma}$  и  $R_{\Sigma y}$  должны быть близки к экспериментальным. Данное условие позволяет подобрать величину угла сдвига  $\beta$  (таблица 1), который также должен быть близок к экспериментальному.

Таблица 1 - Результаты расчетов

№	$\gamma$ град	$\mu$	$u$ град	$\beta_{\text{эксп}}$ град	$\beta_{\text{расч}}$ град	$\omega_{\text{эксп}}$ град	$\omega_{\text{расч}}$ град	$R_{\text{эксп}}$ Н	$R_{\text{расч}}$ Н
1	0	0.31	27	17	17	-17	-17,22	3280	3400
2	20	0.36	43	28	28	0	-0,45	1720	1500
3	40	0.46	61	42	44	15	14,83	1210	1100

Предложенная методология определения теоретического значения угла сдвига, в значительной степени повышает точность расчета, однако требует известного угла действия или среднего коэффициента трения. В связи с чем, необходимо совершенствовать теоретические методы определения данных параметров.

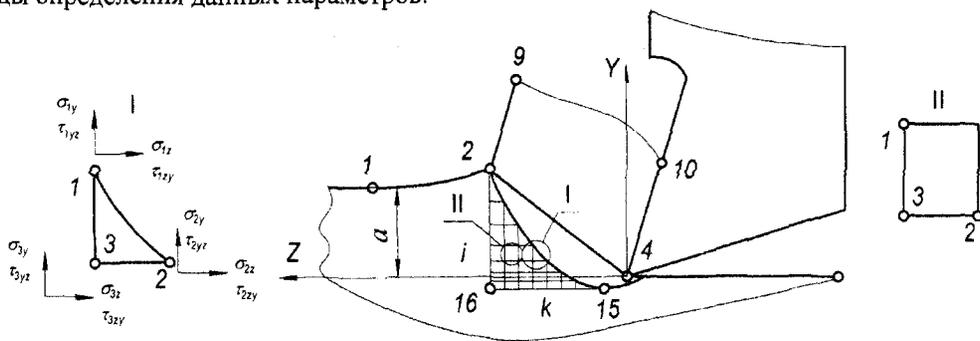


Рисунок 4 – Схема определения напряжений

При известных напряжениях на граничной линии сдвига возможно рассчитать коэффициент усадки стружки, а также разметы зоны деформации. Учитывая теоретическую сложность определения напряжений в деформированном участке 2-15-16 предлагается необходимые расчеты проводить приближенным методом итераций, разбив рассчитываемую зону на большое число элементов (рисунок 4). В пределах боковой границы каждого элемента следует принимать постоянной интенсивность нарастания напряжений, то есть

$$\begin{cases} \left( \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} \right)_{i,k} = const; \left( \frac{\partial \sigma_y}{\partial z} \right)_{i,k} = const \\ \left( \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \right)_{i,k} = const; \left( \frac{\partial \sigma_z}{\partial y} \right)_{i,k} = const \\ \left( \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} \right)_{i,k} = const; \left( \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right)_{i,k} = const \end{cases}$$

При известных значениях напряжений в узловых точках 1 и 2 (вид I рисунок 4) возможно из условия равновесия рассчитать напряжения в узловой точке 3.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{3y} = \sigma_{1y} + \frac{\partial \sigma_{1y}}{\partial y} \Delta y = \sigma_{2y} + \frac{\partial \sigma_{2y}}{\partial z} \Delta z \\ \sigma_{3z} = \sigma_{1z} + \frac{\partial \sigma_{1z}}{\partial y} \Delta y = \sigma_{2z} + \frac{\partial \sigma_{2z}}{\partial z} \Delta z \\ \tau_{3yz} = \tau_{1yz} + \frac{\partial \tau_{1yz}}{\partial y} \Delta y = \tau_{2zy} + \frac{\partial \tau_{2zy}}{\partial z} \Delta z \\ \sum F_y = 0 \\ \sum F_z = 0 \\ \sum M_3 = 0 \end{array} \right.$$

По указанным зависимостям также возможно рассчитать напряжения в элементе (вид II рисунок 4).

Определив напряжения вдоль линии 2-16 (рисунок 4) можно также определить величины деформаций вдоль каждого элемента вдоль данной линии. В этом случае при известном размере участка 2-4 можно определить исходную толщину срезаемого слоя

$$a = \sum_{i=1}^N \frac{\Delta y_{li}}{e_{li} + 1}.$$

Изменяя величину участка 2-4 можно подобрать такое его значение, когда получаемая величина толщины срезаемого слоя  $a$  будут равна исходной. Полученное значение участка 2-4 позволяет определить коэффициент усадки стружки.

## ВЫВОД

Представленный подход к формированию линий скольжения в зоне резания позволит разработать модель напряженного состояния металла в данной зоне.

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев, И.А. Квазистатическая модель формирования зоны первичной деформации при резании металлов [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : спец. : 05.02.07 / Воробьев Илья Александрович ; науч. рук. М. В. Ушаков. — Тула, 2010. — 138 с.
2. Зорев, Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов [Текст] / Н.Н. Зорин. - М.: Машгиз, 1956. 367 с.

**Михаил Витальевич Ушаков**  
доктор технических наук, профессор  
ФБГОУ ВПО «Тульский государственный университет»  
Тел: (4872) 33-25-38  
e-mail: [imstulgu@pochta.ru](mailto:imstulgu@pochta.ru)

**Илья Александрович Воробьев**  
кандидат технических наук, доцент  
ФБГОУ ВПО «Тульский государственный университет»  
Тел: (4872) 33-25-38  
e-mail: [imstulgu@pochta.ru](mailto:imstulgu@pochta.ru)

**Ирина Владимировна Ушакова**  
кандидат технических наук, доцент  
ФБГОУ ВПО «Тульский государственный университет»  
Тел: (4872) 33-25-38  
e-mail: [imstulgu@pochta.ru](mailto:imstulgu@pochta.ru)

M.V. USHAKOV, I.A. VOROBJOV, I.V. USHAKOVA

## METHOD OF FORMATION OF LINES OF SLIDING IN A CUTTING ZONE

*The influences of an angle of emergence of lines of sliding to a free surface of a processed material on size of a corner of shift is considered. Results of calculations are presented.*

**Key words:** shift corner, sliding line, cutting

BIBLIOGRAPHY

[1] Vorobev, I.A.. Quasistatic model of formation of a zone of primary deformation when cutting metals [Text]; yew. Cand.Tech.Sci.: special: 05.02.07/Vorobyov Ilya Aleksandrovich; tech. hands. M. V. Ushakov. — Tula, 2010. — 138 pages.

[2] Zorev, N.N. Questions of mechanics of process of cutting of metals [Text] / N.N. Zorev. - M: Mashgiz, 1956. – 367 p.

**Michael Vitalevich Ushakov**  
Dr.Sci.Tech., the professor  
FBGOU ВПО «the Tula state univer-  
sity»  
Phone: (4872) 33-25-38  
e-mail: imstulgu@pochta.ru

**Ilya Aleksandrovich Vorobev**  
Cand.Tech.Sci., the senior lecturer  
FBGOU ВПО «the Tula state univer-  
sity»  
Phone: (4872) 33-25-38  
e-mail: imstulgu@pochta.ru

**Irina Vladimirovna Ushakov**  
Cand.Tech.Sci., the senior lecturer  
FBGOU ВПО «the Tula state univer-  
sity»  
Phone: (4872) 33-25-38  
e-mail: imstulgu@pochta.ru

УДК: 621.787

И.Ю. ЦУКАНОВ

**ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА ППД РЕЗЬБОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ХОДОВЫХ ГАЕК**

*В статье рассматривается сущность, область применения и основные принципы механики упрочнения ОУО ППД резьбовых поверхностей трения скольжения.*

*Ключевые слова:* упрочнение; винтовая пара; резьба.

Исследования коэффициента трения и интенсивности изнашивания винтовых пар [1, 2], показывают, что большое влияние на их значения оказывают поверхностная микротвердость, остаточные напряжения и параметры шероховатости боковой поверхности резьбы ходовой гайки. Широкими возможностями в управлении этими свойствами поверхностного слоя деталей обладает отделочно-упрочняющая обработка ППД (ОУО ППД). Исходя из эксплуатационных свойств функциональных типов механизмов [3], можно отметить, что ОУО ППД наиболее экономически целесообразна для комбинированных механизмов (работающих при высоких скоростях и умеренных реверсивных нагрузках), что делает его перспективным при изготовлении ходовых гаек приводов линейных перемещений в малой авиации, технологическом оборудовании и транспортных системах.

В качестве основной схемы обработки была принята схема с однороликовым несоосным инструментом, так как она обладает преимуществами применительно к функциональному назначению резьбы ходовых гаек:

- универсальность в отношении оборудования – обработка может производиться на универсальных токарных станках, токарных станках с ЧПУ и обрабатывающих центрах;
- возможность обработки резьб различных диаметров и шагов одним типоразмером инструмента;
- возможность упрочнения противоположных сторон профиля резьбы каждого витка с различными характеристиками;
- простота конструкции инструмента. К недостаткам принятой схемы можно отнести низкую производительность, ограничения по диаметрам резьб ( $D > 30$  мм) и несовпадение характеров физического взаимодействия при обработке и эксплуатации.

Для практической реализации данной схемы на универсальном токарном станке был спроектирован и изготовлен инструмент (рисунок 1).

Резьбовой обкатник состоит из корпуса 1, выполненного из конструкционной стали, в котором запрессована бронзовая втулка 2. Ролик 3, установленный во втулке 2 по скользящей посадке имеет возможность вращения и опирается на упорный подшипник 4, одно из колец которого неподвижно закреплено в толкателе 5, а другое – соприкасается с торцом ро-

лика 3. Бронзовый толкатель соприкасается с пружиной большой жесткости 6, передающей усилие, и имеет боковое отверстие, в которое ввинчен стержень 7, предназначенный для ограничения поворота пружины 6. Стержень 7 перемещается в пазу корпуса 1, который предназначен для ограничения максимального хода пружины. Для соединения толкателя, подшипника и ролика, а также для предотвращения изгиба пружины через центральные отверстия перечисленных деталей проходит шток 8, на котором ролик и пружина сидят свободно, а остальные детали – неподвижно. Таким образом, достигается передача усилия с одновременной возможностью вращения ролика. После установки значения усилия, которое контролируется индикатором часового типа (на рисунке 1 не показан), установленным в пробке 9 и соприкасающимся своей иглой со штоком 8, для предотвращения выпадения ролика 3, он прижимается к подшипнику 4 гайками 10 через смазывающее кольцо 11. Резьбовой обкатник устанавливается в резцедержателе станка, «заводится» в резьбовое отверстие до соприкосновения с витком. С помощью лимба, установленного на резцедержателе, устанавливается необходимая сила обработки, подтягиваются гайки 10. Затем производится обработка витков резьбы за один проход.

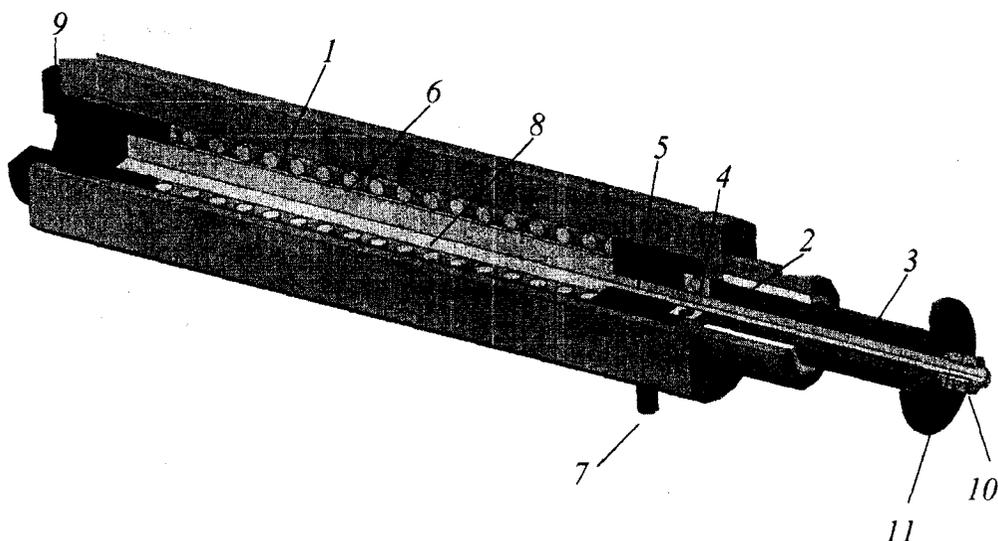


Рисунок 1 - Конструкция инструмента для ОУО ППД ходовых гаек скольжения на токарных станках

Предварительные эксперименты на бронзовых образцах показывают, что для профилей резьбы с малым углом (прямоугольный, упорный) при силах обработки 300-500 Н сложно обеспечить геометрическую точность, вследствие образования рваных наплывов, в месте соприкосновения с боковой поверхностью ролика. В то же самое время, образцы с трапецидальным профилем обрабатываются без повреждений поверхности. Это позволяет сделать вывод, что ОУО ППД резьбовых поверхностей ходовых гаек целесообразна для резьб с трапецидальным профилем.

Причиной данного явления является различная физическая картина взаимодействия. При обработке прямоугольных и упорных резьб геометрическая площадь контакта определяется дугами окружностей наружного диаметра ролика и внутреннего диаметра резьбы. При приложении деформирующей силы и вращении заготовки возле внешней дуги контакта образуется пластическая волна материала. Учитывая, что радиальная компонента деформации, определяемая перпендикуляром к дуге наружной окружности ролика, изменяется по «крутой» зависимости от угловой координаты, напряжения в материале быстро растут, сопровождаясь нагревом и адгезией, что и является причиной возникновения повреждений.

При обработке трапецеидальных резьб имеет место контакт не плоских, а конических поверхностей, соприкасающихся по линии, являющейся рабочей высотой профиля резьбы. При приложении деформирующей силы эта линия переходит в эллиптическую площадку, которую в первом приближении можно заменить описанным прямоугольником со сторонами  $2a$  и  $0,5P$ , где  $a$  – половина стороны площадки контакта, определяемая теорией Герца,  $P$  – шаг резьбы. Процесс образования площадки контакта сопровождается пластическими деформациями в поверхностном слое. При вращении заготовки происходит процесс качения с проскальзыванием, в результате воздействия нормальной нагрузки, определяемой силой деформирования и касательной нагрузки, определяемой тангенциальной силой, возникающей при проскальзывании, сглаживаются исходные неровности и упрочняется поверхность. При этом сила деформирования не должна вызывать в основном материале пластические деформации, чтобы не нарушалась геометрическая точность поверхности. Учитывая малую геометрическую площадь контакта, даже при небольших силах деформирования (300-400 Н) коэффициент упрочнения достигает 1,1-1,2.

Учитывая характер контактного взаимодействия, отличающийся от общепринятой схемы упрочнения, были сформулированы основные положения механики упрочнения трапецеидальных резьб поверхностным пластическим деформированием на отделочно-упрочняющих режимах.

1. Геометрическая площадь контакта определяется произведением рабочей высоты профиля резьбы на сторону площадки контакта, определяемой теорией Герца для внутреннего контакта цилиндров [4]. Приведенный радиус в данном случае определяется по следующей формуле:

$$R_{np} = \frac{1}{\frac{2 \sin(\alpha_n / 2)}{D_p - 0,5P} - \frac{2 \sin(\alpha_n / 2)}{D_2}},$$

где  $D_2$  – средний диаметр резьбы;  $D_p$  – наружный диаметр ролика;  $\alpha_n$  – угол профиля резьбы.

2. На участке поверхностного слоя, ограниченного формирующейся площадкой контакта возникают пластические деформации неровностей профиля шероховатости, которые можно определить, согласно [5]. Учитывая, что сила при обработке недостаточна для деформирования макроотклонения и волнистости, в формуле для определения пластических контактных деформаций учитывается только параметры шероховатости.

3. В процессе проскальзывания возникает деформирование неровностей профиля шероховатости. При этом нормальная составляющая пластических перемещений  $Z_{ин}$  определяется согласно пункту 2., с учетом величины  $2\sqrt{1+f^2} - 1$ , где  $f$  – коэффициент трения при качении с проскальзыванием, определяемый по экспериментальной зависимости [6]. Скорость скольжения определяется как произведение величины упругого скольжения ( $\approx 0,03$ ) и скорости обкатывания:

$$v_o = \frac{v}{60 \cos \left( \arctg \left( \frac{P}{\pi D_2} \right) \right)},$$

где  $v$  – окружная скорость вращения заготовки, м/мин. Касательную составляющую перемещений  $X_k$  определяют по [5] с учетом того, что средняя поперечная сила  $Q$  определяется как:

$$Q = \mu_r \frac{2M_{кр}}{D_2},$$

где  $M_{кр}$  – крутящий момент на шпинделе Н·м;  $\mu_r$  – тангенциальный коэффициент проскальзывания, определяемый согласно [4]:

$$\mu_r = 0,01 \frac{3a}{16R_{np}}$$

4. Параметр шероховатости  $Rz$ , с учетом того, что номинальное контактное давление при обработке меньше  $1,5\sigma_T$  определяется по зависимости:  $Rz_n = Rz_u - Z_{ni}(2\sqrt{1+f^2} - 1)$ , где  $Rz_n$  – параметр шероховатости поверхности резьбы после точения. При нагрузке 500 Н, параметр шероховатости  $Ra$  уменьшается согласно расчетной зависимости в 1,9 раза, экспериментальные исследования показывают его уменьшение примерно в 2 раза (рисунок 2).



Рисунок 2 – Сравнение профиля шероховатости боковой поверхности резьбы до и после ОУО ППД

5. В связи с тем, что бронза является пластичным материалом, даже при малых деформациях, напряжения текучести возрастают по нелинейному закону, определяемому кривой упрочнения [7]. Поэтому коэффициент упрочнения удобно определять по методике [8] через степень деформации сдвига, зависящей от линейных и угловых степеней деформации с учетом контактирующих профилей шероховатости:

$$\varepsilon_z = \frac{Z_{ni}(2\sqrt{1+f^2} - 1)}{Rz_u}; \quad \varepsilon_y = \frac{b - X_k - b_{u,non}}{b_{u,non}}; \quad \varepsilon_x = \frac{b + X_k - b_{u,np}}{b_{u,np}}; \quad \gamma_{xz} = \frac{X_k}{Z_{ni}(2\sqrt{1+f^2} - 1)},$$

где  $b$  – стягивающая хорда неровности на уровне средней линии после ОУО ППД;  $b_{u,non} = 10Smtm$ ,  $b_{u,np} = 10Sm_{np}tm_{np}$  – исходные стягивающие хорды неровностей в поперечном (радиальном) и продольном (тангенциальном) направлении ( $Sm$ ,  $tm$  – шаг неровностей профиля по средней линии и относительная опорная длина профиля на уровне средней линии соответственно). Для определения  $b$  после ОУО ППД получена формула, опирающаяся на уравнение постоянства объемов материала при пластическом деформировании и модель неровности в виде эллиптического параболоида [5]:

$$b = 1,27 \sqrt{\frac{27SmtmSm_{non}tm_{non}Rz_u^2}{Rz_n^2}}$$

Численное моделирование получаемого коэффициента упрочнения при ОУО ППД ходовых резьб по рассматриваемой схеме позволило установить, что наряду с силой деформирования, наиболее значимым фактором является исходная шероховатость поверхности витка (рисунок 3).

6. Допустимый диапазон сил деформирования определяется критической силой при обработке, при которой в основном материале возникают пластические деформации:

$$P_{кр} = \frac{3,63\pi R_{np} \sigma_m^2}{E_{np}}$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести материала гайки;  $E_{np}$  – приведенный модуль упругости 1 рода.

Отметим, что на значение критической силы сильное влияние оказывает наружный диаметр ролика.

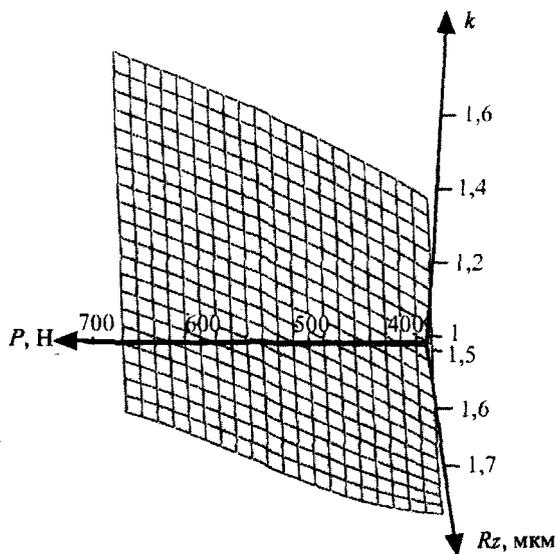


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента упрочнения от силы деформирования и параметра исходной шероховатости  $Rz$

Разработанные принципы механики упрочнения боковой поверхности резьбы ходовой гайки при ОУО ППД позволяют установить функциональную связь между условиями обработки и параметрами качества поверхностного слоя, что позволит в совокупности с математическими моделями изнашивания [2] обеспечивать требуемую износостойкость ходовых гаек, повышать ее при необходимости и, в конечном счете, снизить эксплуатационные расходы на обслуживание винтовых пар скольжения.

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крагельский, И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин [Текст] : справочник. М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
2. Суслов, А.Г. Конструкторско-технологическое обеспечение износостойкости винтовой пары трения скольжения [Текст] / А.Г. Суслов, И.Ю. Цуканов // Трение и смазка в машинах и механизмах. - 2010. - № 6. - С. 16-23.
3. Цуканов, И.Ю. Функционально-ориентированный подход к обеспечению долговечности подвижной резьбы [Текст] / И.Ю. Цуканов // Научно-технические проблемы в машиностроении. - 2011. - № 4(04). - С. 10-19.
4. Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия [Текст] : пер. с англ. / К. Джонсон. - М.: Мир, 1989. 510 с.
5. Инженерия поверхности деталей [Текст] / Колл. авт.; под. ред. А.Г. Сулова. - М.: Машиностроение. 2008. - 320 с.
6. Когаев, В. П. Прочность и износостойкость деталей машин [Текст]: учеб. пособие для машиностр. спец. вузов / В.П. Когаев, Ю.Н. Дроздов. - М.: Высш. шк., 1991. - 319 с.
7. Кроха, В.А. Кривые упрочнения металлов при холодной деформации [Текст] / В.А. Кроха. - М.: Машиностроение, 1968. - 131 с.
8. Смелянский, В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием [Текст] / В.М. Смелянский. - М.: Машиностроение, 2002. - 300 с.

**Иван Юрьевич Цуканов**

Аспирант ФГБОУ ВПО «Московский государственный  
индустриальный университет», редактор журнала  
«Научноёмкие технологии в машиностроении»,  
ООО «Издательство Машиностроение», Москва  
Тел: 8(499)268-26-87, 8(965)1661308  
E-mail: [naukatm@mashin.ru](mailto:naukatm@mashin.ru), [werth32@mail.ru](mailto:werth32@mail.ru)

---

I.Yu. TSUKANOV

## **FINISHING AND HARDENING TREATMENT OF LEAD NUTS THREADED SURFACES BY SURFACE PLASTIC DEFORMATION**

*The nature, application field and hardening mechanics basic principles of sliding threaded surfaces finishing and hardening treatment by surface plastic deformation are considered in this paper.*

**Key words:** *hardening; screw pair; thread.*

### **BIBLIOGRAPHY**

- [1]Kragelskiy, I.V. Machines frictional units [Text] : handbook / I.V. Kragelskiy, N.M. Mikhin. - Moscow: Mashinostroenie, 1984. - 280 p.
- [2]Suslov, A.G. Constructional and technological support of screw pair wear resistance [Text] / A.G. Suslov, I.Yu. Tsukanov // Friction and lubrication in machines and mechanisms, 2010. - № 6. - Pp.16 - 23.
- [3]Tsukanov, I.Yu. Function-oriented approach to sliding thread durability support [Text] / I.Yu. // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2011. - № 4(04). – Pp. 10-19.
- [4]Johnson, K. Contact mechanics [Text] : translation from eng / K. Johnson – Moscow: Mir, 1989. – 510 p.
- [5]Parts surfaces engineering [Text] / authors group:, under the editorship of A.G. Suslov. - Moscow: Mashinostroenie, 2008. 320 p.
- [6]Kogaev, V.P. Strength and wear resistance of machines parts [Text] : tutorial for engineering specialties / V.P. Kogaev, Yu.N. Drozdov. - Moscow.: Vishaya shkola, 1991. - 319 p.
- [7]Krokha, V.A. Curves of metals hardening in cold deformation [Text] / V.A. Krokha. - Moscow: Mashinostroenie, 1968. - 131 p.
- [8]Smelyanskiy, V.M. Hardening mechanics of parts by surface plastic deformation [Text] / V.M. Smelyanskiy. - Moscow: Mashinostroenie, 2002. - 300 p.

**Ivan Yur'evich Tsukanov**

postgraduate of FSEI HVT  
“Moscow State Industrial University”,  
editor of the journal “Science intensive  
technologies in mechanical engineering”  
Mashinostroenie Publishers, Moscow  
Phone: 8(499)268-26-87, 8(965)1661308  
E-mail: [naukatm@mashin.ru](mailto:naukatm@mashin.ru), [werth32@mail.ru](mailto:werth32@mail.ru)

---

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 621.7.02

М.Ю. КУЛИКОВ, А.В. ФЛОРОВ

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ИНСТРУМЕНТЕ ПРИ РЕЗАНИИ

*В статье рассматривается возможность создания более простой методики расчета температурного поля контактной зоны, возникающего при резании для определения температурных деформаций в инструменте и заготовке. Предложен новый методический подход к определению температурного поля в материале на примере реза.*

**Ключевые слова:** Температурные деформации, температурное поле, расчет температуры.

В современном машиностроении резка выросло требование к точности отделочной механической обработки. Известно [4,5], что на эту точность большое влияние оказывают тепловые деформации (ТД) инструмента и обрабатываемой детали, возникающие в результате их нагрева при резании. Существует большое количество математических моделей явления теплопроводности полученных различными путями: «классическим», исходя из положения термодинамики необратимых процессов, исходя из экспериментальных принципов, но в любом случае получаем одни и те же дифференциальные уравнения в частных производных второго порядка с соответствующими краевыми условиями ([6] с.11). Такие уравнения решаются численными методами, что требует создания сложного алгоритма. Поэтому, разработка простого и наглядного метода является актуальной задачей.

Рассмотрим общую постановку. Для конкретизации ее представления будем говорить о теле, которое представляет собой резец. Он имеет поверхности, через которые подводится и отводится тепло и объем, через который от нагретых поверхностей-источников тепла в физическом процессе теплопередачи передается к более холодным поверхностям-стокам. Форма поверхностей-источников тепла и функции распределения плотности тепловых потоков на этих поверхностях заданы задачей резания при обработке конкретной детали. В постановке задачи, они, как и поверхности стоков являются исходными данными. Тепловые потоки здесь эквивалентны механической работе резания обрабатываемой детали.

Процессом теплопередачи по закону Фурье через материал и стока тепла излучением по закону Стефана-Больцмана и конвективным теплообменом с внешней средой с его поверхности управляет, кроме прочих условий, температурное поле:

$$\theta = \theta(x, y, z, \tau)$$

где  $x, y, z$  - координаты точки с температурой  $\theta$ .

$\tau$  - время.

Зная эту функцию, знаем всю картину теплопередачи, выраженную в потоках тепла в материале, излучении и конвекции во внешнюю среду. Но суть в том, что именно исходные потоки тепла нам заданы, а функцию температурного поля мы должны получить такой, чтобы она соответствовала этим исходным потокам тепла. Аналитическое решение задач этого класса возможно лишь в отдельных случаях и, как правило, при нежелательных допущениях. Поэтому, для решения этой задачи, в нашем случае, воспользуемся не аналитическим методом, а вычислительным алгоритмом. Однако, прежде представим в полной, но символически свернутой постановке нашу задачу, которая сводится к уравнению:

$$Q_{\text{нв}}[\theta(x, y, z, \tau)] = Q_{\text{внв}}$$

где  $Q_{\text{нб}}[\theta(x, y, z, \tau)]$  - тепловая мощность на стоках, некоторый функционал, зависящий от функции  $\theta(x, y, z, \tau)$  температурного поля, которую необходимо получить решением этого уравнения.

$Q_{\text{нб}}$  - заданная задачей резания величина тепловой мощности источника.

Известно, что решение этой задачи по переменной  $\tau$  имеет асимптотический вид: со временем температуры во всех точках поля достаточно близко приближаются к своему пределу и перестают зависеть от времени. Температурное поле становится стационарным.

Решение сформулированной здесь задачи для стационарного поля представляется более простым делом. От этого решения проще пройти в обратном направлении от него и получить поле нестационарного отрезка времени  $0 < \tau < \tau_{\text{ст}}$  ( $\tau_{\text{ст}}$  - период формирования поля близкого к стационарному) по оси времени для полноты представления о периоде его формирования.

С этим замечанием напомним две простейшие задачи о теплопередаче, известные из [1].

1. Передача тепла через плоскую стенку при сформировавшемся стационарном поле.

Теплопередача в этой задаче полностью описывается законом Фурье по прямолинейным и параллельным между собой градиентным направлениям. Стационарность поля и прямолинейность градиентов снимает необходимость для описания тепловых потоков решения дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных. Решение получается простым, полным, и без допущений. Но, однако, в практических вопросах оно не может быть использовано без допущений, так как решена для нереального случая бесконечной по двум осям плоскости. Всякая реальная задача имеет дело со стенкой ограниченных размеров. А на границах возникают граничные условия, искажающие условия решения исходной задачи.

2. Передача тепла через стенку бесконечного вдоль оси цилиндра при сформировавшемся стационарном поле. Здесь, как и в первом случае, стационарность поля и прямолинейность (радиальная) градиентов дают простое и полное решение, и тоже без допущений, пока мы остаемся в рамках нереального случая бесконечного вдоль оси цилиндра. Но всякая реальная задача требует ограничить цилиндр вдоль его оси с двух сторон и вызывает искажения в решении исходной задачи.

Нужно заметить, что вторая задача есть первая при свернутом само на себя в окружность одном измерении плоской стенки. Поэтому она имеет ограничение только по одному измерению, только по оси цилиндра. Но можно продолжить этот ряд задач от плоской стенки через цилиндр к сфере, которая сворачивает на себя оба измерения плоской стенки [5]. Поскольку на ее базе мы готовы построить метод приближенного расчета температур при обработке материалов резанием, мы выполним ее решение для нереального, как и ранее, случая замкнутого сферического кольца.

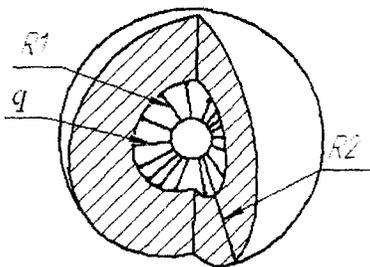


Рисунок 1 - Сферическое кольцо теплопередающего материала

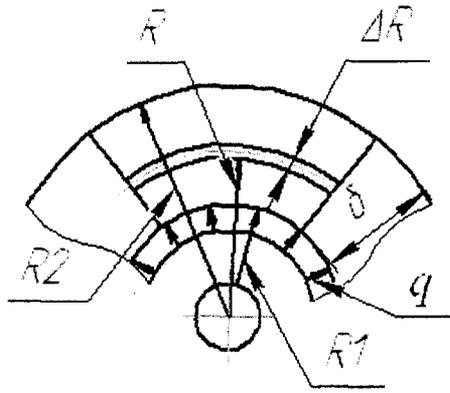


Рисунок 2 - К определению «Интегральной вычислительной заготовки»

где  $q$ -плотность потока,  $R_1$  и  $R_2$ -радиусы внутренней и внешней сфер,  $R$ -радиус сферического слоя,  $\Delta R$ -толщина сферического слоя,  $\delta=R_2-R_1$ .

Мы рассмотрим теплопередачу через материал, ограниченный двумя концентрическими сферическими поверхностями: внутренней и внешней. На внутренней поверхности генерируется тепло. Через материал к внешней сфере идет поток тепла и за счет теплоизлучения и конвекции при необходимости с учётом охлаждающих потоков жидкости или газа уходит во внешнюю среду. Если материал однороден, то температурный градиент во всех точках сферического кольца направлен по радиусу к центру, а все изотермические поверхности являются сферами. Тепловой поток:

Тепловой поток:

$$Q = qF,$$

$q$  -плотность теплового потока, которая описывается законом Фурье

$$q = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x}.$$

$F$  - поперечная площадь теплового потока,

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности,

$\frac{\partial \theta}{\partial x}$  - изменение температуры на единицу изменения координаты  $x$  вдоль градиента

температур. Градиент, как мы сказали ранее, направлен по радиусу к центру поэтому:

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\partial \theta}{\partial r},$$

$Q$  идет в определенном телесном угле, площадь  $F$  сферы в рамках которого зависит от  $R$ . Для полного телесного угла  $F = 4\pi R^2$ . Если тепловой поток  $Q$ -задан то его плотность  $q$  будет переменной от радиуса  $R$ .

$$q = \frac{Q}{4\pi R^2}.$$

Далее:  $-\frac{\partial \theta}{\partial R} = \frac{Q}{4\lambda\pi R^2}$

$$\partial \theta = -\frac{Q}{4\lambda\pi R^2} dR$$

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta = \int_{R_1}^{R_2} \frac{Q}{4\lambda\pi R} \frac{1}{R} dR = \frac{Q}{4\lambda\pi} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

Здесь ради сокращения материала возьмём этот интеграл при условии, что  $\lambda(\theta) = const$ . Однако, разработана и известна подстановка для взятия этого интеграла для общего случая зависимости  $\lambda(\theta)$ .

Получим:

$$\theta_1 - \theta_2 = \frac{Q}{4\lambda\pi} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \text{ и}$$

$$\theta_1 = \theta_2 - \frac{Q}{4\lambda\pi} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right),$$

и, на конец, очевидно, что, если  $R \rightarrow \infty$ , то  $\theta_2 \rightarrow 0$  и для сферического поля

$$\theta = -\frac{Q}{\lambda\varphi R} \text{ если } \bar{Q} = -\frac{Q}{\lambda R} \text{ то}$$

$$\theta = \frac{\bar{Q}}{\varphi} \tag{1}$$

Эта формула  $\theta = \theta(R)$  для заданного теплового потока  $Q$  в части  $\varphi$  полного телесного угла будет иметь значение «интегральной вычислительной заготовки» для определения температур на плоскостях кусочно-сферических полей, аппроксимирующих температурное поле материала.

Для определения времени  $\tau_{ст}$  нестационарного участка по времени от  $\tau_{ст}$  стационарного поля обратно до  $\tau = 0$  воспользуемся уравнением теплопроводности для случая сферического температурного поля. Оно без труда может быть получено и будет иметь вид:

$$\lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial R^2} - C_v \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = 0$$

Здесь граничные начальные условия для стационарного поля.

$Q = 0$  на плоскостях источников тепла

$C_v$ - объёмный коэффициент теплопроводности.

Рассмотрим подход к определению стационарного температурного поля в материале тела (на примере резца) с использованием «интегральной вычислительной заготовки» идеализированного сферического температурного поля.

Мы рассматриваем три принципиальные части материала: источник, сток и передающее тепло тело:

- источник – малая часть тела, в материале которого генерируется тепловая энергия и через ее поверхности передается в материал основного тела;
- сток – наружные поверхности основного тела, находящиеся в контакте с внешней средой, в которую с них «стекает» лучистым и конвективным путем тепловая энергия.
- передающее тело разделяется на центральные части, которые мы будем называть ядрами, и периферийные части, которые мы будем называть вкладками и обкладками.

Ядра есть непосредственное продолжение источника и переносят тепло с него на другие части тела, на вкладки и обкладки. Первые относительно вторых ближе к ядру, а следовательно, к источнику, а вторые ближе к стоку. В этом случае тело представляет собой условно (виртуально) слоистую структуру блока элементов, каждый элемент которой по направлению от источника к стоку передает тепло от нагретых поверхностей к более холодным в кусочно-сферическом идеализированном поле. Каждый его элемент имеет свое сферическое поле. Все кусочно-сферические поля скомпонованы в общую структуру поля так, что каждое кусочно-сферическое поле обслуживает свой элемент их блока.



Рис. 3 в разрезе

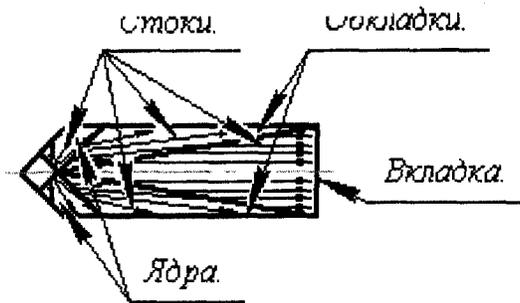


Рисунок 4 - Аппроксимация температурного поля кусочно-сферическими полями

Разработка этой структуры есть творческая разработка с эвристическими элементами, что соответствует практике решения подобных системных задач. На рисунках 3 и 4 представлены возможная структура (направления градиентов и изотермических поверхностей) температурного поля и условно-слоистая структура элементов тела для расчета температурного поля в кусочно-сферической концепции.

Расчет температур начинается с задания температуры  $\theta_0(x_0, y_0, z_0)$  поверхности источника, которая, в принципе, может быть переменной в зависимости от её координат. Кроме того, распределению подлежит тепло источника  $Q(x_0, y_0, z_0)$ , которое есть исходное данное и также может зависеть от координат поверхности источника. Поскольку грань между этой поверхностью и смежной с ней поверхностью ядра условна и представляет плоскость в сплошном материале, то температура поверхности ядра есть температура поверхности источника. Но перешагнув с «территории» источника на «территорию» ядра через эту границу, мы вступаем во «владение» кусочно-центрального поля ядра. У него есть свой центр свой телесный угол  $\varphi$  и, соответственно, градиентные направления и изотермические поверхности. Этот центр и угол соответствует распределению температур на плоскости между источником и ядром.

Радиусы от центра поля до его точек на заданной поверхности определяются в соответствии с (1). Поскольку для определения центра поля (координат  $x$ ,  $y$  и  $z$ ) необходимо иметь три уравнения, а следовательно три радиуса, то достаточно иметь три точки температур. Однако, для статистической точности количество точек может быть взято больше трех для осреднения координат центра кусочно-сферического поля. Далее, температура любой точки соответствующего ядра может быть выполнена по формуле (1).

Для следующего элемента (вкладки или обкладки) процедура определения координат центра соответствующего сферического поля повторяется как рекуррентная. Здесь необходимо зафиксировать внимание. В формуле (1) для каждого элемента кроме прочего участвует свое количество тепла. Общее количество  $Q$  тепла в источнике известно. Но далее при движении от источников к стокам, оно распределяется по соответствующим поверхностям элементов. Соотношение этого распределения представляет собой граф-дерево  $A$ , от которого будет зависеть результат решения задачи. Оно есть некоторое неизвестное. По сути, оно включает в себя систему неизвестных соотношений деления тепла при переходе от одного элемента к другому. Полная задача определения температурного поля делится на две: определение температурного поля при выходе его на стационарный уровень и после, то есть на стационарном уровне. Первой решается вторая задача. Ее постановка

$$\min_{\theta_0(x_0, y_0, z_0)} A \{ Q_{\text{зад}} [\theta_0(x_0, y_0, z_0), A] - Q_{\text{зад}} \} \text{ или}$$

$$\min_{\theta_0(x_0, y_0, z_0)} A \{ Q_{\text{зад}} [\theta_0(x_0, y_0, z_0), A] - Q_{\text{зад}} \}^2$$

Методический подход, который представлен в настоящей работе, отличается от используемых сегодня подходов большей наглядностью представления процесса передачи тепла в материале и меньшим временем вычислительной процедуры для получения необходимых конечных результатов. Последнее делает его более применимым на станках с ЧПУ для модельного сопровождения процесса непосредственной обработки с упреждением корректировки управляющей программы.

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резников, А.Н. Тепловые процессы в технологических системах [Текст] : учебник для вузов по специальностям «Технология машиностроения» и «Металлорежущие станки и инструменты» / А.Н. Резников, Л.А. Резников. – М.: Машиностроение, 1990. - 288 с.
2. Резников, А.Н. Теплофизика резания [Текст] / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1969. - 288 с.
3. Резание материалов [Текст]: учебник / А.С. Верещака, В.С. Кушнер. - М.: Высш. шк., 2009. - 535 с.
4. Корсаков, В.С Точность механической обработки [Текст] / С. Корсаков. – М.: МАШГИЗ, 961.-373 с.
5. Карслоу, Г. и Егер Д. Теплопроводность твердых тел [Текст] / Г. Карслоу, Д. Егер ; пер. с англ. под ред. проф. А.А. Померанцева. – М.: 1964. - 488 с.
6. Коздоба, Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности [Текст] / Л.А. Коздоба. – М.: Наука, 1975. – 227 с.

**Куликов Михаил Юрьевич**  
Государственный университет путей сообщения г. Москва  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»  
Моб. Тел. +7(964)578-56-89  
E-mail: muk.56@mail.ru

**Флоров Алексей Вадимович**  
Институт конструкторско-технологической информатики РАН г. Москва  
Аспирант  
Моб. тел.+7(926)135-87-82  
E-mail: florovaleksey@mail.ru

M.U. KULIKOV, A.V. FLOROV

## DEVELOPMENT OF THE METHODOICAL WAY OF CALCULATION THE TEMPERATURAL FIELD IN A TOOL DURING CUTTING

*In this article we examine the necessity of creating more simple technique for calculation of temperatural field which will help to detect temperatural deformations in a tool and blank. Here it's offered a new methodical way of the temperatural field detection in material by the example of cutting tool.*

*The key words: are temperatural deformations, temperatural field, calculation of the temperature*

### BIBLIOGRAPHY

- [1] Reznikov, A.N. Reznikov L.A. Thermodynamic process in technological systems [Text] : the textbook for universities in such fields as "The technology of mechanical engineering" and "Metal-cutting tools" / A.N. Reznikov, L.A. Reznikov. – Moscow, Mashinostroenie, 1990. - 288 p.
- [2] Reznikov, A.N. Thermal physics of cutting [Text] / A.N. Reznikov. - Moscow, Mashinostroenie, 1969.- 288 p.
- [3] Materials cutting [Text] : the textbook / A.S. Veresh'aka, V.S. Kushner –M.: High school, 2009.-535 p.
- [4] Korsakov, V.S. The precision of machining [Text] / V.S. Korsakov. – Moscow, MASHGIZ, 1961. -373 p.
- [5] Karslow, G. The thermal conductivity of solid piece of matter [Text] / G.Karslow, D. Eger ; Translation of the second English edition, edited by professor Pomiranzev A.A. - Moscow, 1964. - 488 p.
- [6] Kozdoba, L.A. Methods of the solution of linear problems of thermal conductivity [Text] / L.A. Kozdoba. – Moscow, Nauka, 1975. – 227 p.

**Michel Ur'evich Kulikov**

Moscow State University of Railway Engineering

Doctor of Technical Science, professor of the cathedra  
"Technology of mecahnicak engineering"

Phone. +7(964)578-56-89

E-mail: [muk.56@mail.ru](mailto:muk.56@mail.ru)

**Alexey Vadimovich Florov**

Post graduate student

Design-technological informatics Institute of RAS, Mos-  
cow

Phone: +7(926)135-87-82

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

# КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ И МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.914:621.833

Д.Е. БОЧКОВА, Г.М. ШЕЙНИН, М.Н. БОБКОВ

## РАСЧЕТ КООРДИНАТ ТОЧЕК МОДИФИЦИРОВАННОГО ПРОФИЛЯ ЗУБА ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КОЛЕСА

*Рассмотрены способы формообразования зубьев цилиндрических колес, повышающие эксплуатационные характеристики зубчатой передачи. Предложен метод обработки зубьев, обеспечивающий образование не только продольной, но и профильной модификации их боковых поверхностей. Выполнены расчеты профиля зуба цилиндрического колеса в среднем сечении и значений предельных фазовых углов станочного зацепления. Работа выполнена в соответствии с тематическим планом НИР № 7.1439.2011 ТулГУ «Базовые промышленные технологии формообразования зубьев цилиндрических колес для создания перспективных видов вооружения».*

**Ключевые слова:** зубчатая передача, производящее колесо, станочное зацепление, модификация, начальная окружность, профиль зуба.

Модификация боковых поверхностей зубьев позволяет снизить концентрацию нагрузки в зацеплении [1, 2] и повысить несущую способность передачи.

Модификацию обычно осуществляют с помощью червячных фрез и долбяков со специальными профилями зубьев, а также шевингованием и шлифованием. При этом используют станки, имеющие дополнительные движения рабочих органов.

При изготовлении цилиндрических колес с круговыми зубьями продольную модификацию зубьев можно получить более простым способом за счет различия радиусов зуборезных головок, профилирующих сопряженные поверхности зубьев шестерни и колеса. Однако такой способ обеспечивает только продольную модификацию, поскольку и шестерня, и колесо формируются в станочном зацеплении с производящей рейкой, имеющей трапецеидальный профиль зубьев [3].

Для получения продольной и профильной модификации зубья шестерни или колеса предлагается формировать в станочном зацеплении с производящим колесом (рисунок 1), зубья которого имеют трапецеидальный профиль [1, 4].

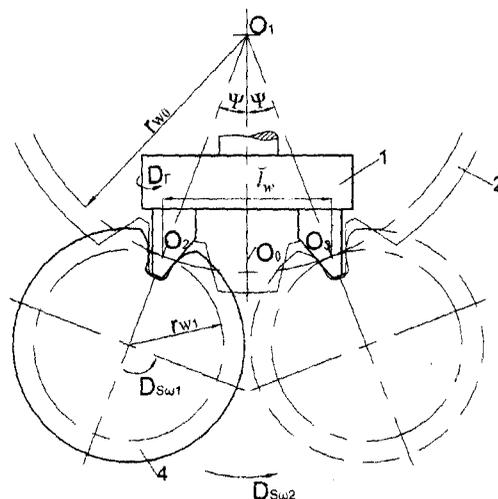


Рисунок 1 – Схема формообразования зубьев цилиндрического колеса

При такой схеме обработки режущий инструмент 1 (зуборезную головку или чашечный шлифовальный круг) устанавливают так, что его ось  $O_0$  вращения пересекает ось  $O_1$  производящего колеса 2, а оси симметрии  $O_2O_1$  и  $O_3O_1$  диаметрально противоположных профилей режущих клиньев инструмента располагают под углом  $\psi$  к оси вращения головки так, чтобы они пересекались в точке  $O_1$ . Расстояние между точками  $O_2$  и  $O_3$  пересечения осей симметрии с начальной окружностью производящего колеса определяют из условия

$$\bar{l}_w = n p_{nw},$$

где  $n$  – целое число;

$$p_{nw} = \frac{2\pi r_{w1}}{z_1} \text{ – начальный нормальный шаг зубьев;}$$

$z_1$  – число зубьев шестерни 4.

В процессе обработки инструменту 1 сообщают вращение  $D_1$ , а заготовке 4 – два вращательных движения  $D_{sw1}$  и  $D_{sw2}$ , согласованные так, что ее начальный цилиндр катится без скольжения по неподвижной центроиде – начальному цилиндру производящего колеса радиуса  $r_{w0}$ . Длину дуги обката (рабочего хода) заготовки назначают такой, чтобы обрабатывались разноименные боковые поверхности у различных зубьев, расстояние между которыми по дуге начальной окружности заготовки равно  $(\bar{l}_w - p_{nw})$ . При этом, варьируя значения радиуса  $r_{w0}$  начальной окружности производящего колеса, можно добиться требуемой величины профильной модификации зубьев.

Номинальный диаметр инструмента определяется из выражения

$$d_0 = 2r_{w0} \sin \psi ,$$

$$\text{где } \psi = \frac{\bar{l}_w}{2r_{w0}} .$$

Начальная толщина зуба шестерни без учета бокового зазора в передаче

$$S_{w1} = \left[ \frac{\pi + 4x_1 \operatorname{tg} \alpha}{z_1} + 2(\operatorname{inv} \alpha - \operatorname{inv} \alpha_w) \right] r_{w1} ,$$

где  $x_1$  – коэффициент смещения исходного контура;

$\alpha$  – угол профиля исходного контура;

$\alpha_w$  – угол зацепления.

Начальная толщина зуба производящего колеса

$$S_{w0} = p_{nw} - S_{w1} = \left[ \frac{\pi - 4x_1 \operatorname{tg} \alpha}{z_1} - 2(\operatorname{inv} \alpha - \operatorname{inv} \alpha_w) \right] r_{w1} .$$

Одной из задач при определении глубины профильной модификации является расчет профиля зуба шестерни в среднем сечении<sup>1)</sup>. На рисунке 2 показана схема для расчета профиля зуба в этой плоскости.

За нулевую фазу станочного зацепления примем момент времени, когда контакт в средней плоскости происходит в полюсе зацепления – точке Р касания начальных окружностей шестерни и производящего колеса. При этом профиль производящего контура составляет с осью  $O_0 O_1$  угол  $\alpha_w$ .

Начальная угловая толщина зуба производящего колеса

$$\alpha_p = \frac{S_{w0}}{r_{w0}} .$$

Угол профиля производящего контура

1) Под средним сечением понимается сечение зуба шестерни плоскостью, которая параллельна торцовой плоскости и в которой лежит ось вращения инструмента.

$$\alpha_0 = \alpha_w - 0,5\alpha_p$$

Угол между радиусом  $O_0S$  и межосевой линией

$$\varphi_s = \frac{\pi}{2} - \alpha_w$$

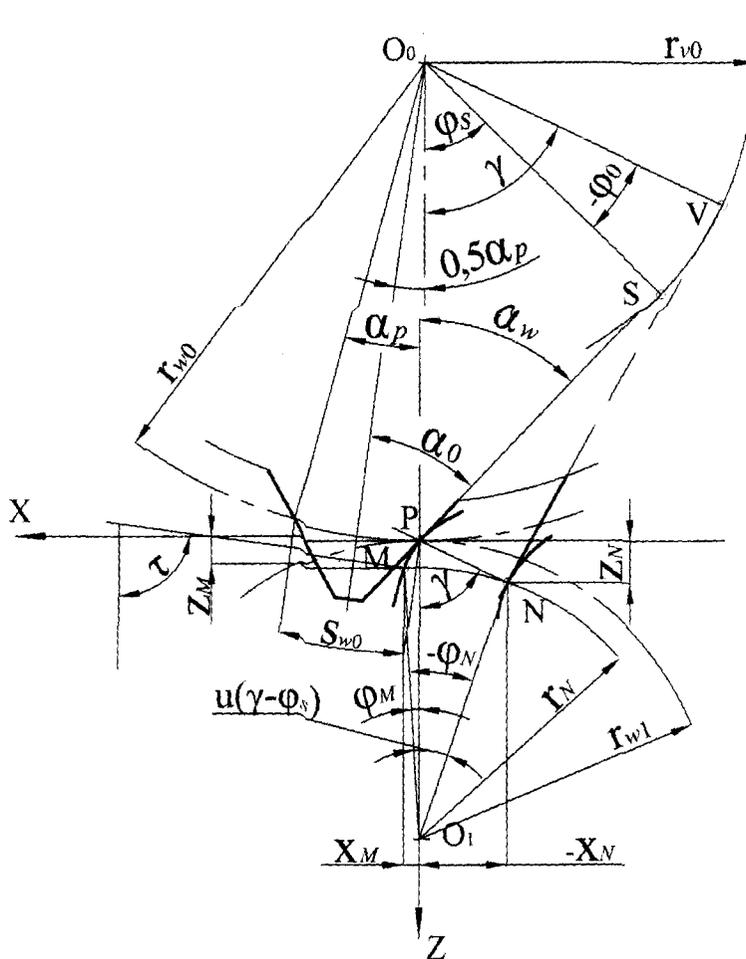


Рисунок 2 – Схема к расчету профиля зуба шестерни в средней плоскости

После поворота на угол  $(\gamma - \varphi_s)$  профильная прямая займет положение, показанное штриховой линией. Отрезок PN – общая нормаль к сопряженным профилям в момент времени, когда они касаются в точке N, т. е. точка N также принадлежит профилю зуба шестерни.

В системе координат XPZ положение точки N определяется координатами

$$\left. \begin{aligned} x_N &= -(r_{v0} - r_{w0} \cos \gamma) \sin \gamma \\ z_N &= (r_{v0} - r_{w0} \cos \gamma) \cos \gamma \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $r_{v0} = r_{w0} \sin \alpha_w$ .

Радиус-вектор точки N

$$r_N = \sqrt{x_N^2 + (r_{w1} - z_N)^2}, \quad (2)$$

полярный угол

$$\varphi_N = \arctg \frac{x_N}{r_{w1} - z_N}. \quad (3)$$

Повороту производящего колеса на угол  $(\gamma - \varphi_s)$  соответствует поворот шестерни на угол  $u(\gamma - \varphi_s)$ , где  $u$  – передаточное число. Следовательно, в момент времени, когда зацепление происходило в точке Р, точка N профиля зуба шестерни находилась на окружности радиуса  $r_N$  в точке М, причем

$$x_M = r_N \sin \varphi_M ;$$

$$z_M = r_{w1} - r_{w0} \cos \varphi_M ,$$

$$\text{где } \varphi_M = u(\gamma - \varphi_s) + \varphi_N = \varphi_N - u\varphi_0 ;$$

$$\varphi_0 = \varphi_s - \gamma .$$

Когда контакт профилей происходит в точке Р, т.е. при  $\gamma = \varphi_s$ , угол поворота производящего колеса  $\varphi_0 = 0$ . При вращении колеса по часовой стрелке угол  $\gamma$  уменьшается, а угол  $\varphi_0$  возрастает. Точке N соответствует отрицательное значение  $\varphi_0$ .

При уменьшении угла  $\gamma$  разность  $r_{v0} - r_{w0} \cos \gamma$  уменьшается, обращаясь в нуль при  $\gamma = \varphi_s$ . Если  $\gamma < \varphi_s$ , то  $(r_{v0} - r_{w0} \cos \gamma) < 0$ . В соответствии с зависимостями (1) и (3) в этом случае  $x_N > 0$ ,  $z_N < 0$ ,  $\varphi_N > 0$ , т.е. точки N будут располагаться левее и выше точки Р.

Минимальное значение угла  $\gamma$  соответствует точке профиля зуба шестерни, лежащей на окружности выступов шестерни, и должно удовлетворять уравнению

$$r_N \Big|_{\gamma=\gamma_{\min}} = r_{a1} ,$$

где  $r_{a1}$  – радиус окружности выступов зубьев шестерни.

Решая уравнения (1), (2), получим

$$\cos \gamma_{\min} = \frac{r_{w0}r_{v0} \pm \sqrt{r_{w0}^2r_{v0}^2 - (r_{w0}^2 + 2r_{w1}r_{w0} - 2r_{w1}r_{v0})(r_{v0}^2 + r_{w1}^2 - r_{a1}^2)}}{r_{w0}^2 + 2r_{w1}r_{w0} - 2r_{w1}r_{v0}} . \quad (4)$$

Радиус-вектор  $O_0N$  точки N производящего колеса (рисунок 2) определяется зависимостью

$$O_0N = \sqrt{r_{v0}^2 + r_{w0}^2 \sin^2 \gamma} .$$

С увеличением угла  $\gamma$  радиус  $O_0N$  возрастает. Максимальное значение радиуса

$$O_0N_{\max} = O_0N_{\gamma=\gamma_{\max}} = r_{a0} , \quad (5)$$

где  $r_{a0}$  – радиус окружности выступов зубьев производящего колеса.

С учетом зависимости (5) имеем

$$\sin \gamma_{\max} = \frac{\sqrt{r_{a0}^2 - r_{v0}^2}}{r_{w0}} . \quad (6)$$

Угол между осью Z и нормалью к профилю шестерни в точке N равен  $\gamma$ . После поворота шестерни на угол  $u(\gamma - \varphi_s)$  угол  $\tau$  между нормалью к профилю в точке М и осью Z будет определяться соотношением

$$\tau = \gamma + u(\gamma - \varphi_s) .$$

Приведенные зависимости позволяют рассчитать координаты точек профиля зуба шестерни в среднем сечении в функции угла  $\gamma$ , который изменяется в пределах  $\gamma_{\min}$ ,  $\gamma_{\max}$ , определяемых формулами (4) и (6).

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).*

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Сухоруков, Ю.Н. Модификация эвольвентных цилиндрических зубчатых колес [Текст] : справочник / Ю.Н. Сухоруков. – К.: Техника, 1992. – 197 с.
2. Генкин, М.Д. Повышение надежности зубчатых передач [Текст] / М.Д. Генкин, М.А. Рыжов, Н.М. Рыжов – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
3. Бобков, М.Н. Обработка цилиндрических колес с круговыми зубьями [Текст] / М.Н. Бобков, В.А. Васин, Г.М. Шейнин // СТИН. – 2005. – №4. – С. 26-29.
4. А. с. 1139583, МКИВ23F9/00. Способ обработки цилиндрических зубчатых колес [Текст] / И.А. Коганов, М.Н. Бобков (СССР). – №3531021/25-08; заявл. 06.01.83, опубл. 15.02.85, бюл. №6. – 3 с.: ил.

**Бочкова Дина Евгеньевна**  
Тульский государственный университет, г. Тула  
Инженер кафедры технологии машиностроения  
E-mail: [tsu\\_tula@inbox.ru](mailto:tsu_tula@inbox.ru)

**Шейнин Григорий Матвеевич**  
Тульский государственный университет, г. Тула  
Кандидат технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения  
Тел.: (4872) 33-23-10

**Бобков Михаил Николаевич**  
Тульский государственный университет, г. Тула  
Доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения  
Тел.: (4872) 33-23-10  
E-mail: [tms@tsu.tula.ru](mailto:tms@tsu.tula.ru)

D.E. BOCHKOVA, G.M. SCHEYNIN, M.N. BOBKOV

**CALCULATION OF COORDINATES OF POINTS  
OF THE MODIFIED STRUCTURE OF THE TOOTH  
OF THE CYLINDRICAL WHEEL**

*Examined ways of forming tooth cylindrical wheels, increase the performance of the gear. A method of processing teeth, providing education not only longitudinal and profile modification of side surfaces is offered. Calculations of the tooth profile of a cylindrical wheel in the middle section and the limit values of the phase angles of machine gearing. Work was carried out in accordance with the thematic research plan number 7.1439.2011 TSU "Basic industrial technologies shaping the teeth of cylindrical wheels to create advanced weapons."*

**Keywords:** a tooth gearing, a making wheel, machine gearing, modification, a pitch circle, a tooth profile.

**BIBLIOGRAPHY**

- [1] Sukhorukov, JU.N. Updating involute cylindrical cogwheels [Text] : справ. / JU.N. Sukhorukov. - K.: Technics, 1992. - 197 p.
- [2] Genkin, M.D. Increase of reliability of tooth gearings [Text]/ M.D.Genkin, M.A.Ryzhov, N.M.Ryzhov - M.: Mechanical engineering, 1981. - 232 p.
- [3] Bobkov, M.N. Processing of cylindrical wheels with circular tooth gear [Text] / M.N.Bobkov, V.A.Vasin, G.M.Shejnin // СТИН. - 2005. - №4. - Pp. 26-29.
- [4] А. с. 1139583, МКИВ23F9/00. A way of processing of cylindrical cogwheels [Text] / I.A.Koganov, M.N.Bobkov (USSR). - №3531021/25-08; it is declared 06.01.83, it is published 15.02.85, bull. №6. - 3 p.: ill.

**Bochkova Dina Evgenevna**  
Tula State University, Tula  
engineer of department of mechanical engineering technique  
E-mail: [tsu\\_tula@inbox.ru](mailto:tsu_tula@inbox.ru)

**Scheynin Grigory Matveevich**  
Tula State University, Tula  
Cand.Tech.Sci., the professor of department of mechanical engineering technique  
Tel.: (4872) 33-23-10

**Bobkov Mihail Nikolaevich**  
Tula State University, Tula  
Dr.Tech.Sci., the professor of department of mechanical engineering technique  
Tel.: (4872) 33-23-10  
E-mail: [tms@tsu.tula.ru](mailto:tms@tsu.tula.ru)

А. А. ФОМИН, В. Г. ГУСЕВ, А. А. МАРЫШЕВ

## ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВНЯ ВИБРАЦИИ ШПИНДЕЛЯ СТАНКА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОТХОДОВ ДРЕВЕСИНЫ

*Рассмотрено влияние дисбалансов фасонной фрезы на уровень вибрации шпиндельного узла станка для обработки отходов древесины. Разработана конструкция фрезы, обеспечивающая точное самоцентрирование на шпинделе станка.*

**Ключевые слова:** *неуравновешенность, дисбаланс, фасонная фреза, уровень вибрации.*

Объемы отходов в деревообрабатывающей промышленности Российской Федерации внушительны. Только один горбыль составляет (6...12) % от объема деловой древесины. Ежегодно на лесоперерабатывающих предприятиях страны образуется более 5 млн. кубических метров горбыля, который идет в отходы. В таких условиях наша страна несет огромные и неоправданные убытки, а создание эффективного оборудования и инструментального обеспечения для глубокой переработки леса представляет важнейшую научную и народнохозяйственную проблему.

Для обработки горбыля применяется специальное оборудование. На одних станках выполняют операции продольного пиления больших кусков горбыля на доски с последующей обрезкой на отдельной операции боковых кромок; на других станках – фрезерование неокоренной части горбыля с обрезкой боковых кромок. Однако, это оборудование неэффективно. На станках продольного пиления обработка горбыля не предусмотрена, поэтому после раскрыя образуются значительные отходы в том числе и горбыль меньших размеров. Станки для фрезерования неокоренной поверхности горбыля характеризуются низкой производительностью и качеством получаемого изделия, поскольку на экстремальные условия резания, характеризующиеся широким разбросом снимаемого припуска и твердости обрабатываемого материала, они не реагируют из-за отсутствия соответствующей системы управления.

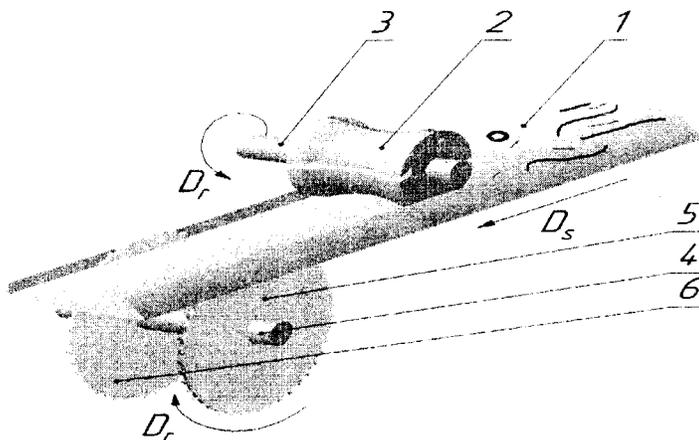


Рисунок 1 – Схема обработки горбыля:  $D_r$  – направление главного движения инструментов,  $D_s$  – направление движения подачи заготовки

Авторами на базе Владимирского инновационно-технологического центра разработан и изготовлен станок для обработки горбыля, оснащенный системой управления скоростью подачи заготовки, позволяющей стабилизировать процесс обработки в условиях экстремального резания и проводить качественную обработку горбыля [1, 2]. В основе принципа функционирования этого станка лежит схема обработки, представленная на рисунке 1.

Заготовку 1 подают в зону обработки приводным механизмом. Фасонная фреза 2, закрепленная на шпинделе 3, вращаясь в направлении стрелки  $D_r$ , обрабатывает наружную неокоренную криволинейную поверхность горбыля. На шпинделе 4 установлены дисковые пилы 5 и 6, которые выполняют обрезку кромок заготовки с соблюдением требуемой ширины изделия. Станок обеспечивает одновременную обработку неокоренной поверхности 1 и обрезку боковых кромок горбыля, что позволяет получать готовое изделие за одну технологическую операцию.

Скорость фрезерования горбыля составляет 50 м/с, при которой малейшая неуравновешенная масса инструмента вызывает повышенный уровень вибрации элементов технологической системы, ухудшающей геометрию обработанной поверхности и другие выходные параметры процесса. На уровень вибрации большое влияние оказывает не только величина дисбалансов, но и вид неуравновешенности. В этой связи была разработана методика создания статической, моментной и динамической неуравновешенностей фрезы, установленной на консольную часть шпинделя станка.

Перед внесением в инструмент неуравновешенной массы фреза подвергалась балансировке в двух плоскостях коррекции, что позволило устранить не только главный вектор  $D_{ст}$ , но и главный момент  $M_D$  дисбалансов.

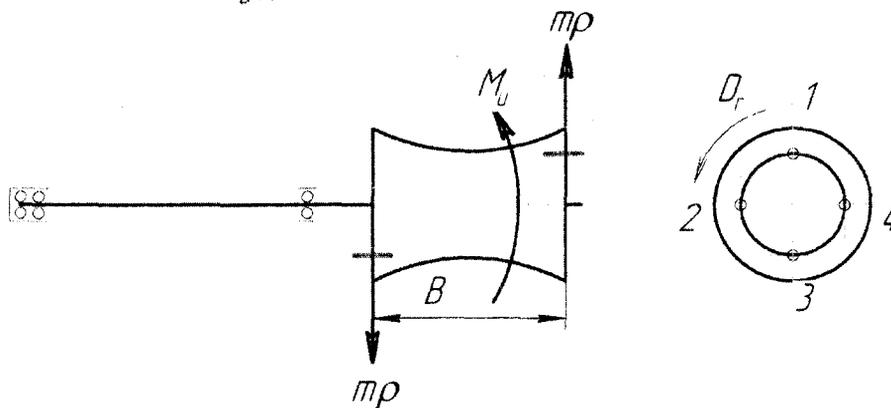


Рисунок 2 – Схема расположения грузов, создающих моментную неуравновешенность фасонной фрезы

Для внесения моментной неуравновешенности в инструмент к правому и левому торцам фасонной фрезы прикрепляли грузы 1 (рисунок 2), расположенные в противофазе друг другу, что обеспечивало появление двух противоположно направленных векторов  $m\rho$ , создающих главный момент дисбалансов

$$M_D = m\rho B, \tag{1}$$

где  $m$  – величина неуравновешенной массы прикрепленного груза 1;  $\rho$  – радиус, на котором отстоит центр груза 1 от оси вращения шпинделя;  $B$  – плечо пары векторов  $m\rho$ .

В процессе обработки горбыля вследствие вращения фрезы возникает инерционный изгибающий момент, действующий на шпиндель,

$$M_u = m\rho B \omega^2, \tag{2}$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения фасонной фрезы.

После внесения моментной неуравновешенности и проведения опыта с измерением уровня вибрации передней шпиндельной опоры грузы дискретно переставляли через каждые  $90^\circ$  по окружности в положения 2 – 4 (рисунок 2). Для создания статической неуравновешенности угол между векторами дисбалансов  $m\rho$  прикрепленных грузов принимали равным нулю (рисунок 3). Под действием статической неуравновешенности при вращении шпинделя с инструментом возникает неуравновешенная центробежная сила.

$$Q = m\rho\omega^2. \quad (3)$$

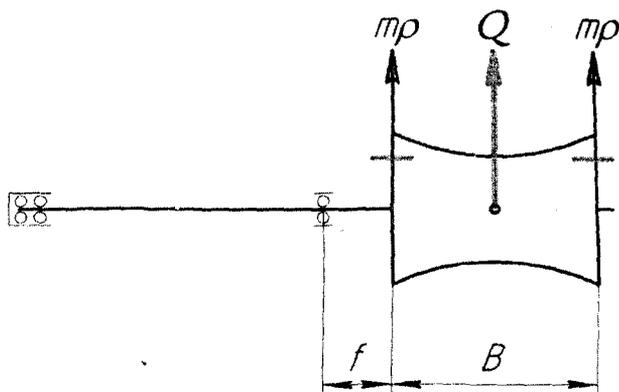


Рисунок 3 – Схема расположения грузов, создающих статическую неуравновешенность фасонной фрезы

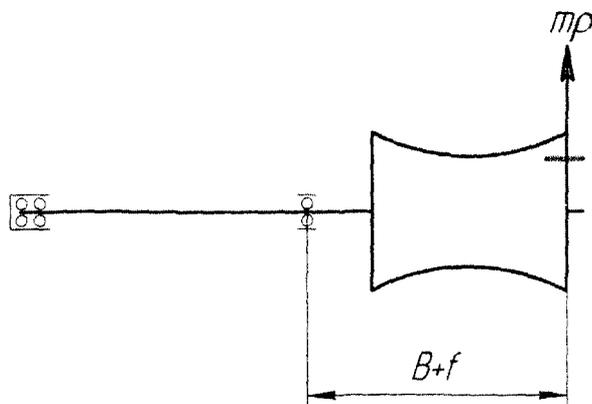


Рисунок 4 – Схема расположения грузов, создающих динамическую неуравновешенность фасонной фрезы

Динамическую неуравновешенность создавали креплением одного груза на правом горце инструмента (рисунок 4). В этом случае изгибающий момент в каждом из поперечных сечений шпинделя является переменной величиной и зависит от расстояния рассматриваемого поперечного сечения шпинделя от его передней опоры.

Максимальный изгибающий момент возникает при расположении вектора  $m\rho\omega^2$  на расстоянии, равном  $B+f$ .

Для измерения уровня вибрации шпинделя с установленной фрезой, имеющей определенный вид неуравновешенности, использовали виброизмерительный прибор модели АГАТ с диапазоном частоты вибрации 5-10000 Гц, погрешностью измерений 5 %, что удовлетворяет поставленной задаче исследований.

Для повышения точности эксперимента проводили три параллельных опыта для каждой точки графика, а при построении зависимости уровня вибрации шпиндельного узла от зида неуравновешенности фасонной фрезы по оси ординат откладывали среднее арифметическое значение уровня вибрации из трех измерений (рисунок 5).

Результаты исследования выявили доминирующее влияние статической неуравновешенности на величину вибрации шпиндельного узла станка для обработки горбыля (ломаная линия 1, рисунок 5), за ней по степени влияния на уровень вибрации следует динамическая неуравновешенность (ломаная линия 2, рисунок 5) и самое слабое воздействие оказывает

моментная неуравновешенность (ломаная линия 3, рисунок 5). Шпиндельный узел станка всегда имеет остаточный дисбаланс, который определяется точностью его балансировки перед установкой фрезы и который суммируется с дисбалансом, создаваемым грузами.

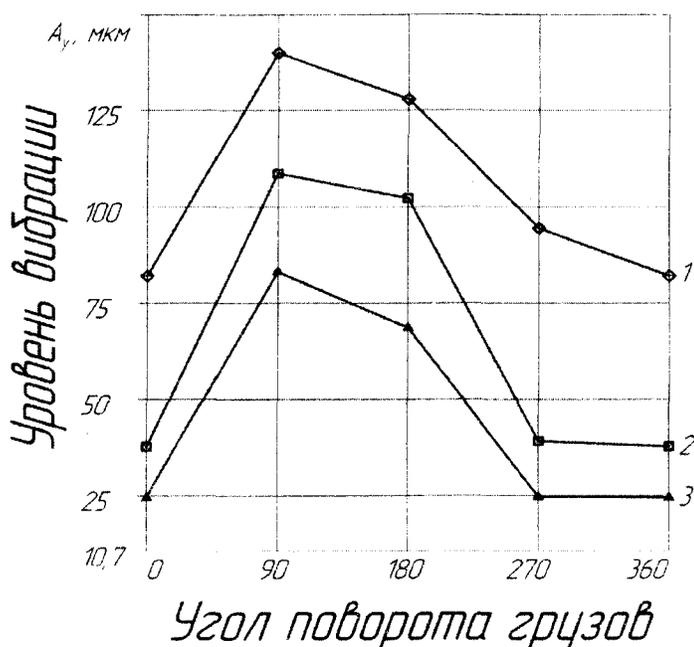


Рисунок 5 – Уровень вибрации шпиндельного узла с установленной фасонной фрезой при различных видах неуравновешенности фрезы: 1 – при статической, 2 – при динамической, 3 – при моментной неуравновешенности

При совпадении направления вектора остаточного дисбаланса шпиндельного узла и вектора дисбалансов грузов происходит их алгебраическое сложение, что сопровождается высоким уровнем вибрации. При угловой координате вектора дисбаланса груза, равной нулю и 360°, уровень вибрации для всех трех ломаных линий минимальный, что соответствует взаимной компенсации остаточного вектора дисбалансов шпинделя и вектора дисбаланса, создаваемого грузами (рисунок 5). По мере дискретного поворота грузов относительно этого положения уровень вибрации шпиндельного узла возрастает, что объясняется геометрическим сложением векторов и увеличением суммарного вектора дисбалансов шпиндельного узла.

Из рисунка 5 следует, что для уменьшения вибраций шпиндельного узла необходимо, в первую очередь, проводить статическую балансировку инструмента, а при высоких требованиях к уровню вибрации – динамическую балансировку. В практическом плане наиболее просто реализуется статическая балансировка, обеспечивающая компенсацию главного вектора дисбалансов. Поэтому, если требования к уровню вибрации шпиндельного узла сравнительно невысокие, то можно проводить балансировку фасонной фрезы в одной плоскости коррекции в статическом режиме.

Для уменьшения влияния неуравновешенных масс инструмента, вызывающих вибрацию элементов технологической системы, разработана конструкция фасонной фрезы, обеспечивающей точное центрирование ее на шпинделе станка (рисунок 6).

Фреза состоит из корпуса 1, режущих пластин 2, клиньев 3 для крепления пластин; упора 4, обеспечивающего требуемый вылет ножа фрезы; двух гаек 5 и цапговых зажимов 6. Центрирование и одновременное закрепление фрезы на шпинделе осуществляют поворотом гаек 5, которые перемещают конические цапги 6 навстречу друг другу, при этом их лепестки обжимают шейку шпинделя, осуществляя надежное закрепление инструмента.

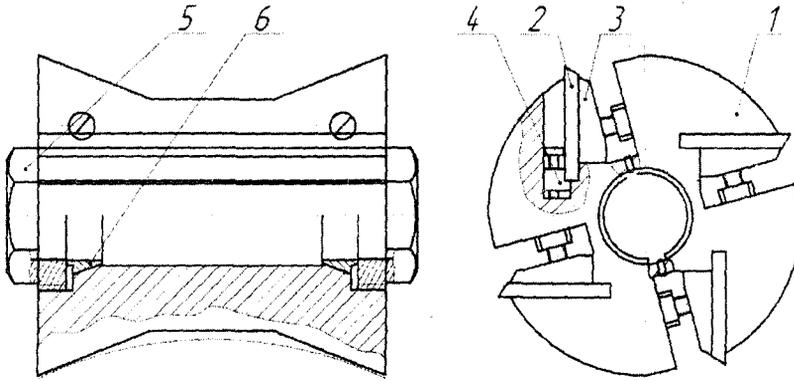


Рисунок 6 – Конструкция фасонной фрезы, обеспечивающая точное центрирование на шпинделе станка

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. № 2279973 Российская Федерация, МПК С2 В27С 1/00. Способ обработки горбыля [Текст] / Гусев В.Г., Фомин А.А.; заявл. 28.10.2004; опубл. 20.07.2006 Бюл. № 20.
2. Пат. № 44279 Российская Федерация, МПК U1 В27С 1/08. Станок для обработки горбыля [Текст] / Гусев В.Г., Фомин А.А.; заявл. 29.10.2004; опубл. 10.03.2005 Бюл. № 7.

**Фомин Анатолий Анатольевич**  
 ООО «Арсенал технологий» г.  
 Владимир, Генеральный директор  
 Кандидат технических наук  
 Тел.: 8-910-774-75-62  
 E-mail: [fomin1@mail.ru](mailto:fomin1@mail.ru)

**Гусев Владимир Григорьевич**  
 Доктор технических наук, профессор  
 Владимирский государственный  
 университет имени Александра Григорьевича  
 Столетовых  
 Тел.: (4922) 54-47-35  
 E-mail: [prof\\_gusev@mail.ru](mailto:prof_gusev@mail.ru)

**Марышев Алексей Анатольевич**  
 Владимирский государственный  
 университет имени Александра Григорьевича  
 Столетовых  
 Магистрант  
 Тел.: (4922) 35-32-51  
 E-mail: [alex\\_mrshv@mail.ru](mailto:alex_mrshv@mail.ru)

A. A. FOMIN, V.G. GUSEV, A. A. MARYSHEV

## RESEARCH OF THE MACHINE TOOL SPINDLE VIBRATION LEVEL FOR PROCESSING OF THE WOOD WASTE

*Influence of a shaped mill disbalance on a spindle vibration level of the machine tool for processing of a waste of wood is considered. The design of a mill providing an exact self-centering on a spindle of the machine tool is developed*

**Keywords:** an unbalance, a disbalance, a shaped mill, vibration level.

### BIBLIOGRAPHY

- [1] The Patent № 2279973 Russian Federation, МПК С2 В27 1/00. A Method of slab processing [Text] / Gusev V. G, Fomin A. A; it is declared 10/28/2004; it is published 7/20/2006. – Bull. № 20.
- [2] The Patent № 44279 Russian Federation, МПК U1 В27 1/08. Machine tool for slab processing [Text] / Gusev V. G, Fomin A. A; it is declared 10/29/2004; it is published 3/10/2005. – Bull. № 7.

**Fomin Anatoly Anatolievich**  
 Can.Sc. Tech.  
 Open Company «Arsenal of technologies» Vladimir,  
 The General director  
 Ph.: 8-910-774-75-62  
 E-mail: [fomin1@mail.ru](mailto:fomin1@mail.ru)

**Gusev Vladimir Grigorievich**  
 Dr. Sc. Tech., Prof.  
 The Vladimir State University  
 Vladimir  
 Ph.: (4922) 54-47-35  
 E-mail: [prof\\_gusev@mail.ru](mailto:prof_gusev@mail.ru)

**Maryshev Alexey Anatolievich**  
 The master  
 The Vladimir state university  
 Vladimir  
 Ph.: (4922) 35-32-51  
 E-mail: [alex\\_mrshv@mail.ru](mailto:alex_mrshv@mail.ru)

# **МАШИНЫ, АППАРАТЫ, ТЕХНОЛОГИИ** **ЛЕГКОЙ И ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

УДК 664.6/ 664.87

Ю.В. ГОНЧАРОВ, Е.А. КУЗНЕЦОВА, И.Н. ПАРАМОНОВ

## **ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ХЛЕБА ИЗ ПРОРОСШЕГО ЗЕРНА ПШЕНИЦЫ**

*Представлены результаты исследования возможности применения ферментного препарата целлюлолитического действия Целловиридин Г20х с целью ускорения процесса проращивания зерна и улучшения физико-химических и органолептических показателей качества хлеба из проросшего зерна пшеницы, приготовленного на «Витаминной» закваске.*

*Установлено, что использование ферментного препарата совместно с 0,05 % янтарной кислоты и 5 % измельченной цедры апельсина от массы зерна пшеницы на стадии подготовки зерна к производству зернового хлеба позволяет снизить содержание МАФМ, спорообразующих бактерий, плесеней и дрожжей в сырье, улучшить органолептические и физико-химические показатели качества зернового хлеба.*

**Ключевые слова:** зерно пшеницы, проращивание, ферментные препараты, водные экстракты, закваска.

Хлеб из проросшего зерна злаковых культур рационально сочетает в себе все питательные вещества, заложенные в зерно природой. По пищевой и биологической ценности этот хлеб превосходит все традиционные сорта хлеба, особенно выпеченные из муки высших сортов. Проросшие зерна злаков и их экстракты рекомендуются диетологами для диетического и лечебного питания, так как они обладают бактерицидными свойствами, высокой биологической активностью, способствуют улучшению пищеварения, эвакуаторной функции кишечника, оптимизируют обмен веществ, стабилизируют нервную систему, стимулируют, повышают физическую работоспособность. Большинство исследователей рекомендуют использовать в питании зерно пшеницы с проростками не более 1,5 мм [1].

Известно, что при проращивании, наряду с положительными моментами (увеличение количества аминокислот, в том числе незаменимых), происходит переход макро- и микроэлементов в легкоусвояемую форму, резко активизируются ферменты и, следовательно, из проросшего зерна сложно получить хлеб удовлетворительного качества [2].

Одно из направлений повышения качества хлеба из целого проросшего зерна – регулирование параметров отволаживания, при котором зерно переходит из состояния покоя в фазу биологической активности.

С целью ускорения процесса проращивания зерна и преобразования грубых отрубных частиц для улучшения качества зернового хлеба на стадии отволаживания могут быть использованы некоторые виды и штаммы микроорганизмов, а также ферментные препараты, используемые для деструкции экстрацеллюлярных структур. Прежде всего, это ферменты, катализирующие изменение нативной структуры и деструкцию фибрилл целлюлозы, освобождающие микрофибриллы целлюлозы от связи с матриксом клеточной стенки и разрушающие гемицеллюлозы [3].

При производстве зернового хлеба для ускорения процесса подготовки зерна к диспергированию и улучшения качественных показателей использовали ферментный препарат целлюлолитического действия Целловиридин Г20х, содержащий комплекс целлюлаз, β-глюконаз и ксиланаз, продуцируемых грибной культурой *Trichoderma reesei*. Подбор оптимальной дозы препарата осуществляли при проведении пробных выпечек зернового хлеба. При производстве хлеба из проросшего зерна пшеницы доза препарата составляет 0,08 % от массы сухих веществ зерна. Зерно пшеницы замачивали при температуре 20-25° С. Для поддержания оптимального значения рН 4-5 использовали янтарную кислоту в количестве 0,05 % от массы зерна. Продолжительность замачивания определяли по появлению ростков.

размером 1-1,5 мм. Для получения зерновой массы способной подвергаться диспергированию, влажность зерна должна составлять 40-45 %. Было установлено, что оптимальная продолжительность замачивания в присутствии ферментного препарата для зерна пшеницы составляет 12 часов.

После диспергирования проросшего зерна пшеницы тесто готовили с использованием высококислотной «Витаминной» закваски, которая была создана во ВНИИХП в результате использования в микробиологическом составе пшеничной закваски каротинообразующих дрожжей. «Витаминная» закваска характеризуется высоким синтезом  $\beta$ -каротина, витамина В<sub>12</sub>, обладает бактерицидными, радиопротекторными свойствами и высокими технологическими показателями. Использование закваски «Витаминной» при производстве хлеба из проросшего зерна пшеницы в условиях Орловской области, для которой характерно комплексное радиационно-техногенное загрязнение сельскохозяйственных угодий и, следовательно, продукции растениеводства [4], весьма актуально благодаря тому, что эта закваска обладает радиопротекторными свойствами.

В качестве основного субстрата для получения закваски использовали осахаренную заварку на основе размолотого зерна пшеницы, вносили закваску в зерновую массу в количестве 30 % к массе диспергированного зерна.

Внесение ферментного препарата Целловиридин Г20х на стадии отволаживания привело к улучшению качественных показателей хлеба. Удельный объем хлеба из проросшего зерна пшеницы с использованием ферментного препарата Целловиридин Г20х составил 1,72 см<sup>3</sup>/г, тогда как в контрольном варианте -1,25 см<sup>3</sup>/г, пористость мякиша хлеба – 48,8 и 25,5 % соответственно. Образец хлеба с внесением ферментного препарата отличался от контрольного более развитой пористостью и большей эластичностью мякиша. Улучшение качества хлеба связано с изменением некоторых показателей зерновой массы после диспергирования. Выявлено, что внесение ферментного препарата влияет на структурно-механические свойства зерновой массы. Отмечается тенденция снижения эффективной вязкости системы. С помощью информационно-измерительного комплекса «Амилотест» было установлено изменение состояния углеводно-амилазного комплекса зерновой массы после замачивания (таблица 1). Полученные результаты указывают на разжижение зерновой массы в результате процесса мацерации и деградациии структур клеточных стенок оболочек зерна пшеницы.

Таблица 1 - Состояние углеводно-амилазного комплекса зерновой массы из проросшего зерна пшеницы

Вариант опыта	Число падения,с	Максимальная вязкость крахмального геля, Н	Температура максимальной вязкости крахмального геля, °С
контроль	254	4,82	94,0
Целловиридин 0,08 %	225	3,85	92,0

Вследствие разрушения структур клеточных стенок зерна образовались продукты деградациии некрахмальных полисахаридов, некоторые из которых являются редуцирующими сахарами. Динамика изменения содержания редуцирующих сахаров в процессе отволаживания зерна пшеницы при оптимальной продолжительности процесса отволаживания представлена в таблице 2. Образовавшиеся в зерновой массе продукты гидролиза некрахмальных полисахаридов являются дополнительным источником питания для дрожжей, что способствует увеличению газообразующей способности зерновой массы и, следовательно, улучшению физико-химических показателей качества хлеба. Обеспечение заданной кислотности полуфабрикатов благодаря внесению «Витаминной» закваски способствует изменению элек-

тростатического взаимодействия белковых молекул, их набуханию, пептизации и улучшению физических свойств теста за счет ингибирования действия  $\alpha$ -амилазы.

Таблица 2 - Динамика изменения содержания редуцирующих сахаров в процессе от-  
волаживания зерна пшеницы

Продолжительность замачивания, ч	Содержание редуцирующих сахаров в зерне, %	
	контроль	Целловиридин Г20х
0	0,20	-
1	0,29	0,33
2	0,32	0,37
3	0,36	0,40
4	0,38	0,42
5	0,45	0,60
6	0,58	0,73
7	0,71	0,84
8	0,89	0,98
9	0,92	1,04
10	0,95	1,12
11	0,97	1,18
12	0,99	1,22

Проведены исследования влияния ферментного препарата Целловиридин Г20х на степень сохранения свежести зернового хлеба. Анализ структурно-механических свойств мякиша на приборе «Структурометр» через 2, 16, 24 и 48 часов после выпечки показал увеличение общей деформации сжатия мякиша для хлеба из проросшего зерна пшеницы. Скорость изменения структурно-механических свойств мякиша при внесении ферментного препарата снижается. Следовательно, применение препарата способствовало удлинению срока сохранения свежести хлеба. Это связано с образованием в результате гидролиза гемицеллюлоз ксилоолигосахаридов, которые препятствуют взаимодействию крахмала с белками клейковины, что замедляет процесс черствения хлеба. Кроме того, применение «Витаминной» закваски способствует образованию при брожении молочной, уксусной, янтарной, лимонной и других органических кислот придает хлебу специфический вкус и аромат, а повышенная водоудерживающая способность теста, обусловленная высокой кислотностью, замедляет черствение хлеба.

Замачивание зерна при температуре 20-25°C в течение 12 часов неизбежно приводит к интенсивному размножению эпифитной микрофлоры. Для поддержания оптимального значения pH среды замачивание зерна в растворе ферментного препарата осуществляли в присутствии янтарной кислоты в количестве 0,05 % к массе зерна. Для снижения микробиологической обсемененности зерна целесообразно внесение в замочную воду совместно с янтарной кислотой 5 % цедры апельсина, измельченной до размеров частиц 1,0-2,0 мм, от массы зерна. Установлено, что применение янтарной кислоты совместно с цедрой апельсина позволило снизить содержание МАФМ, спорообразующих бактерий и плесневых грибов в зерне пшеницы после замачивания (таблица 3). Янтарная кислота не только обладает анти-септическим действием при использовании в процессе замачивания зерна, она является хо-

рошим антиоксидантом. Янтарная кислота рекомендуется как средство повышения иммунитета, предотвращения заболевания атеросклерозом и другими болезнями, в основе развития которых лежит перекисное окисление липидов. Применение цедры апельсина обусловлено наличием в ее составе эфирных масел (2,4 %) и органических кислот (1,41 %), которые рассматриваются как антибиотические вещества [5].

Таблица 3 - Влияние совместного использования янтарной кислоты и цедры апельсина на снижение микробиологической обсемененности зерна пшеницы

Вариант опыта	Микробиологические показатели, КОЕ/г		
	МАФАМ	Дрожжи и плесневые грибы	Спорообразующие бактерии
Исходное зерно	$2,9 \times 10^4$	10	30
Зерно после замачивания в воде в течение 12 ч	$4,3 \times 10^4$	24	54
Зерно после замачивания в растворе янтарной кислоты в течение 12 ч	$2,5 \times 10^3$	0	1

Для подтверждения наличия в настое цедры апельсина групп органических веществ, обладающих антисептической активностью, с использованием хроматографа «Милихром-5» были получены хроматограммы настоя измельченной цедры в растворе, содержащем янтарную кислоту и выдержанном 12 часов (рисунок 1).

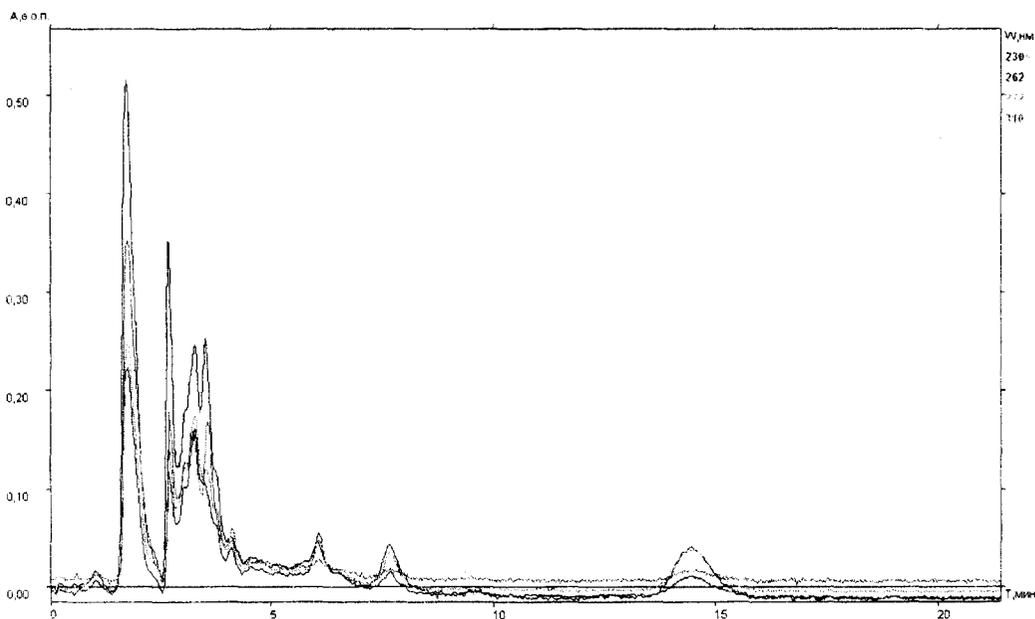


Рисунок 1 - Хроматограмма настоя цедры апельсина в растворе янтарной кислоты

Представленная хроматограмма показывает, что в настое содержится несколько видов органических кислот, фенолкарбоновых кислот и антоцианы, слабо представлены флавоноиды. Все обнаруженные соединения обладают бактерицидными свойствами, что подтвер-

ждает целесообразность совместного применения 0,05 % янтарной кислоты и 5 % от массы зерна измельченной цедры апельсина для снижения количества микроорганизмов в зерне и зерновом хлебе.

При совместном использовании ферментного препарата Целловиридин Г20х, янтарной кислоты и цедры апельсина на стадии замачивания зерна при производстве зернового хлеба отмечается улучшение его органолептических и физико-химических свойств по сравнению с вариантом опыта, в котором замачивание зерна проводилось в воде, содержащий только ферментный препарат. При этом прирост удельного объема хлеба составляет 0,22-0,30 см<sup>3</sup>/г, пористости мякиша – 17,05-21,12 %.

На основании проведенных исследований был разработан новый вид зернового хлеба из проросшего зерна пшеницы «Янтарный», на который подготовлена и утверждена техническая документация. Разработанный вид зернового хлеба характеризуется повышенным качеством, улучшенными микробиологическими показателями, более длительным сроком хранения и повышенной пищевой и биологической ценностью.

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Краснов, Е.А. Выделение и анализ природных биологически активных веществ [Текст] / Е.А. Краснов, Т.П. Березовская, И.В. Алексюк. – Томск: Изд.-во Томского университета, 1987. - 184 с.
2. Мищенко, Е.Н. Некоторые стороны механизма действия препаратов антибиотиков из растений [Текст] / Е.Н. Мищенко // Фитонциды. Бактериальные болезни растений. Сборник научных трудов. – Киев, 1985. - С. 120-121.
3. Исупов, В.П. Пищевые добавки и пряности. История, состав и применение [Текст] / В.П. Исупов. – СПб: ГИОРД, 2000. – 176 с.
4. Похлебкин, В.В. Все о пряностях. Виды, свойства, применение [Текст] / В.В. Похлебкин. – М.: Пищевая промышленность, 1973. – 208 с.
5. Богатырева, Т.Г. Способы и средства предотвращения плесневения хлеба [Текст] / Т.Г. Богатырева [и др.] // Хлебопечение России. - 1999. - №3. - С. 16-17.
6. Вербина, Н.М. Микробиология пищевых производств [Текст] / Н.М. Вербина, Ю.В. Каптерева. - М.: Агропромиздат, 1998. - 225 с.

**Гончаров Юрий Вениаминович**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Машины и аппараты пищевых производств» ФГБОУ ВПО «Государственный университет учебно-научно-производственный комплекс». Адрес: 302030, г. Орел, ул. Набережная Дубровинского, д. 94, кв. 56; (4862)421663.

**Кузнецова Елена Анатольевна**, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология хлебопекарного, кондитерского и макаронного производств» ФГБОУ ВПО «Государственный университет учебно-научно-производственный комплекс». Адрес: 302001, г. Орел, ул. Черкасская, д.36, кв. 89; телефон (4862)419887.

**Парамонов Иван Николаевич**, аспирант ФГБОУ ВПО «Государственный университет учебно-научно-производственный комплекс». Адрес: 302010, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 350, кв. 62.

Y.V. GONCHAROV, E.A. KUZNETSOVA, I.N. PARAMONOV

## INNOVATIVE TECHNOLOGY OF BREAD WHEAT SPROUTED GRAINS

*The results of the research capabilities of cellulolytic enzyme preparation Celloviridin G20h action to accelerate the germination of grain and improve the physical, chemical and organoleptic quality of bread from sprouted wheat, cooked on the "Vitamin" leaven.*

*It is established that the use of an enzyme preparation with 0,05 % succinic acid and 5 % powdered orange peel on the mass of wheat grain in preparation for the production of corn bread to reduce the content of MAFAM, spore-forming bacteria, molds and yeasts in raw materials, to improve the organoleptic and physical and chemical indicators of the quality of corn bread.*

**Key words:** wheat, germination, enzymes, water extracts, yeast.

## BIBLIOGRAPHY

- [1] Krasnov, EA, Berezovskaya TP, Alekseyuk IV Isolation and analysis of natural biologically active substances [Text] / E.A. Krasnov, T.P. Berezovskaya, I.V. Alekseyuk. – Tomsk, Ed. of Tomsk University, 1987. - 184 p.
- [2] Mishenkova, E.N. Some aspects of the mechanism of action of antibiotics drugs from plants [Text] / E.N. Mishenkova // Volatile. Bacterial diseases of plants. Collection of scientific works. - Kiev, 1985. - Pp.120-121.
- [3] Isupov, V.P. Food additives and spices. History, structure and application [Text] / V.P. Isupov. - St. Petersburg: GIORД, 2000. - 176 p.
- [4] Pokhlebkіn, V.V. All of the spices. Types, properties and application [Text] / V.V. Pochlebkіn. - Moscow: Food industry Yield, 1973. - 208 p.
- [5] Bogatyreva, T.G. Ways and means to prevent molding of bread [Text] / T.G. Bogatyreva [etc.] // Baking in Russia. - 1999. - №3. - Pp. 16-17.
- [6] Verbina, N.M. Microbiology of food production [Text] / N.M. Verbina, Y. V. Kaptereva – Moscow, Agropromizdat, 1998. - 225 p.

**Yuri Goncharov Veniaminovich**, Ph.D., senior lecturer in "Machinery and equipment for food production," FGBOU VPO "State University teaching and research and production complex."

Address: 302030, Orel, ul. Dubrovinsky Quay, on 94 square meters. 56, (4862) 421 663.

**Kuznetsova, Elena**,

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Technology of bakery and confectionery industries," FGBOU VPO "State university teaching and research and production complex."

Address: 302001, Orel, ul. Cherkassy, 36. Apt. 89, telephone (4862) 419 887.

**Paramonov, Ivan**,

a graduate student FGBOU VPO "State university teaching and research and production complex."

Address: 302010, Orel, ul. Komsomolskaya, house 350 sq. m. 62.

УДК 687.054

Г.Д. ГУЩИНА, А.А.ЧЕРЕПЕНЬКО, А.П. ЧЕРЕПЕНЬКО

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ВНУТРИПРОЦЕССНОЙ ВЛАЖНО-ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ

*В статье предложены методы оценки эффективности внутрипроцессной влажно-тепловой обработки (ВТО) деталей и узлов верхней одежды. Представленные уравнения позволяют описывать разработанные критерии эффективности.*

**Ключевые слова:** внутрипроцессная влажно-тепловая обработка деталей швейных изделий, критерий эффективности.

Существенным фактором, определяющим внешний вид и качество швейных изделий, является разработка и совершенствование методов оценки качества влажно-тепловой обработки (ВТО). В настоящее время задача определения качества ВТО решается двумя методами: качественным и количественным. Наиболее простой – качественный (метод экспертных оценок), определяющий качество влажно-тепловой обработки в результате органолептического обследования изделия специалистами и присвоения ему определенного количества баллов. Этот метод не учитывает частных показателей качества и его применение обусловлено отсутствием на данном этапе совершенного метода количественной оценки. Более перспективный второй метод – количественный, оценивающий качество ВТО по обобщенному показателю. Детально этот метод рассмотрен в работах [1-2]. Авторы работ исходят из того, что обобщенный показатель качества влажно-тепловой обработки прямо пропорционален

относительному утонению полуфабриката и обратно пропорционален степени ласообразования и продолжительности выполнения операции.

Однако промышленности нужен комплексный обобщенный показатель качества процессов ВТО для всего круга операций влажно-тепловой обработки, выполняемых при изготовлении одежды различного назначения при достаточно широком диапазоне значений частных показателей качества, которые будут зависеть от конкретных технологических требований, предъявляемых к данной операции, а также от вида, свойств и цвета обрабатываемой ткани. Так, например, по данным Центрального научно-исследовательского института швейной промышленности (ЦНИИШП) утонение тканей по краю борта после первого прессования должно составлять у мужского костюма – 20-30%, у мужского пальто – 18-25 %. После второго прессования (окончательная обработка) деформация борта должна составлять: у костюма 40-50 %, у пальто 20-30 %.

При выполнении других видов операций ВТО технологические требования будут другими. Например, при разутюживании швов деформация утонения будет только сопутствующим эффектом обработки, и чем она меньше, тем меньше возможность пролегания ткани на лицевой стороне шва изделия, ласообразования вдоль него и т.д.

На степень ласообразования значительно влияет структура поверхности ткани, ее цвет, а также волокнистый состав. С помощью прибора для определения степени ласообразования на тканях доказано [2], что на светлых тканях ласы менее заметны, чем на темных. На тканях, содержащих искусственные волокна, степень ласообразования больше, чем на тканях другого волокнистого состава и т.д.

Таким образом, вариации частных показателей качества процесса влажно-тепловой обработки будут весьма многочисленны и разнообразны в отношении требований к величине и виду необходимой деформации в зависимости от вида операции, продолжительности обработки, минимальной, но необходимой для надежной фиксации полученной деформации, а так же степени ласообразования, которое всегда желательно свести к нулю или получить минимальное.

Проанализированные методы характеризуют только технологический эффект обработки [3], а для успешного проектирования процессов влажно-тепловой обработки нужен критерий, характеризующий и сам технологический процесс. Известные количественные методы направлены на определение комплексного показателя эффективности ВТО и не учитывают эффективность различных операций внутрипроцессной влажно-тепловой обработки.

Тепловые процессы ВТО характеризуются длительностью воздействия на обрабатываемый полуфабрикат, в том числе при пропаривании, виброформовании, сушке нагретым воздухом, сушке рабочими поверхностями верхней и нижней подушек, прессовании и охлаждении холодным воздухом из окружающей среды [4].

Для оптимизации технологических процессов на стадии проектирования, включающих восстановление объемной формы, выравнивание поверхности (выравнивание помятостей), удаление лас, придание формы, восстановление криволинейной формы разработаны критерии эффективности ( $I$ ), полученные на базе теории «исследование операций», результатом которой является оптимизация.

Предложенные аналитические зависимости позволяют рассчитать эффективность операций внутрипроцессной влажно-тепловой обработки на стадии проектирования технологического процесса. Так, для технологических процессов по восстановлению объемных форм, выравниванию поверхностей и удалению лас разработан критерий эффективности  $I_1$ , представленный в виде нижеприведенного уравнения:

$$I_1 = \alpha_1 \cdot \frac{\tau_c}{\int_0^{\tau_c} \tau \cdot f_1(\tau) \cdot d\tau} + \alpha_2 \cdot \frac{T_{\tau}}{\int_0^{T_{\tau}} T_{\tau} \cdot f_2(T_{\tau}) \cdot dT_{\tau}} - \alpha_3 \cdot \frac{h_{\kappa}}{\int_0^{h_{\kappa}} h_{\kappa} \cdot f_3(h_{\kappa}) \cdot dh_{\kappa}} - \alpha_4 \cdot \frac{K}{\int_0^K K \cdot f_4(K) \cdot dK} - \alpha_5 \cdot \frac{N_s}{\sum_{i=1}^i f_5(i) \cdot i}$$

где:  $\tau_0$  - расчетное время выполнения технологической операции, ч;  
 $\tau$  - время выполнения технологической операции, ч;  
 $f_1(\tau)$  - плотность распределения случайной величины  $\tau$ ;  
 $T_0$  - термостойкость материала швейного изделия до ВТО, ч;  
 $T_{от}$  - термостойкость материала швейного изделия после ВТО, ч;  
 $f_2(T_{от})$  - плотность распределения случайной величины  $T_{от}$ ;  
 $h_{н0}$  - максимальное отклонение от объемной формы после ВТО, мм;  
 $h_{нот}$  - максимальное отклонение от объемной формы до ВТО, мм;  
 $f_3(h_{нот})$  - плотность распределения случайной величины  $h_{нот}$ ;  
 $\bar{K}$  - коэффициент помятостей после ВТО;  
 $f_4(K)$  - плотность распределения случайной величины  $K$ ;  
 $K$  - коэффициент помятостей до ВТО;  
 $N_е$  - количество лас после ВТО;  
 $f_5(N_{еот})$  - закон распределения случайной величины;  
 $N_{еот}$  - количество лас до ВТО;  
 $L$  - максимально-возможное количество лас до ВТО;  
 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$  - коэффициенты взвешенности (важности) мер.

Для оптимизации технологических процессов выравнивания помятостей и удаления лас разработан критерий эффективности  $J_2$  в виде уравнения:

$$J_2 = \alpha_1 \cdot \frac{\tau_0}{\int_0^{\tau_0} \tau \cdot f_1(\tau) \cdot d\tau} + \alpha_2 \cdot \frac{T_0}{\int_0^{T_0} T_{от} \cdot f_2(T_{от}) \cdot dT_{от}} - \\ - \alpha_3 \cdot \frac{\bar{K}}{\int_0^{\bar{K}} K \cdot f_4(K) \cdot dK} + \alpha_4 \cdot \frac{N_е}{\sum_{i=1}^i f_5(i)}$$

Для технологических процессов по выравниванию помятостей разработан критерий эффективности  $J_3$  в виде уравнения:

$$J_3 = \alpha_1 \cdot \frac{\tau_0}{\int_0^{\tau_0} \tau \cdot f_1(\tau) \cdot d\tau} + \alpha_2 \cdot \frac{T_0}{\int_0^{T_0} T_{от} \cdot f_2(T_{от}) \cdot dT_{от}} - \\ + \alpha_3 \cdot \frac{\bar{K}}{\int_0^{\bar{K}} K \cdot f_4(K) \cdot dK}$$

Эффективность технологических процессов по приданию объемных форм, выравниванию поверхностей и удалению лас определяется уравнением:

$$J_4 = \alpha_1 \cdot \frac{\tau_0}{\int_0^{\tau_0} \tau \cdot f_1(\tau) \cdot d\tau} + \alpha_2 \cdot \frac{T_0}{\int_0^{T_0} T_{от} \cdot f_2(T_{от}) \cdot dT_{от}} - \\ - \alpha_3 \cdot \frac{V_т}{\int_0^{V_т} V_{от} \cdot f_3(V_{от}) \cdot dV_{от}} + \alpha_4 \cdot \frac{X}{\int_0^X X_{от} \cdot f_4(X_{от}) \cdot dX_{от}} + \alpha_5 \cdot \frac{N_е}{\sum_{i=1}^i f_5(i)}$$

$f_2(X_{20})$  - плотность распределения случайной величины;  
 $\gamma_{20}$  - коэффициент выравнивания поверхности до ВТО;  
 $X$  - коэффициент придания объемной формы после ВТО;  
 $f_3(X_3)$  - плотность распределения случайной величины;  
 $X_3$  - коэффициент придания объемной формы до ВТО.

Для оптимизации технологических процессов восстановления криволинейной формы и выравнивания помятостей получен критерий эффективности  $J_2$  в виде уравнения:

$$J_2 = \alpha_1 \cdot \frac{\tau_c}{\int_0^{\tau_c} \tau \cdot f_1(\tau) \cdot d\tau} - \alpha_2 \cdot \frac{T_r}{\int_0^{T_r} T_{от} \cdot f_2(T_{от}) \cdot dT_{от}} -$$

$$- \alpha_3 \cdot \frac{h_{\text{н}}}{\int_0^{h_{\text{н}}} h_{\text{н0}} \cdot f_3(h_{\text{н0}}) \cdot dh_{\text{н0}}} - \alpha_4 \cdot \frac{K}{\int_0^K K \cdot f_4(K) \cdot dK}$$

Предложенные критерии учитывают термостойкость материала швейного изделия до и после обработки, отклонение от объемной формы до и после ВТО, количество лас до и после ВТО, а также расчетное время и время выполнения операции.

Такой метод оценки эффективности внутрипроцессной влажно-тепловой обработки позволяет оптимизировать параметры и длительность тепловых процессов на стадии разработки технологического процесса.

Предложенный подход дает возможность улучшить качество и товарный вид изделия.

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орловский Б.В. Исследование качества ВТО швейных изделий на паропрессах [текст] / Б.В. Орловский, Ю.Е. Левицкий, Н.П. Березненко // сообщение 1. - Известия ВУЗов. Технология легкой промышленности №4 - 1979
2. Орловский Б.В. Исследование качества ВТО швейных изделий на паропрессах [текст] / Б.В. Орловский, Ю.Е. Левицкий, Н.П. Березненко // сообщение 2. Известия ВУЗов. Технология легкой промышленности №5 - 1979
3. Черепенько А.П. Об оценке качества процессов ВТО швейных изделий [текст] / А.П. Черепенько, С.С. Эппель, Л.Д. Дяблова // Известия ВУЗов. Технология легкой промышленности № 12 - 1983
4. Болотских Д.И. Метод определения эффективности тепловых процессов влажно-тепловой обработки деталей швейных изделий [текст] Д.И. Болотских, А.П. Черепенько, А.А. Черепенько / Швейная промышленность №6 - 2009

**Гушина Галина Дмитриевна**  
 Государственный университет –  
 учебно-научно-производственный  
 комплекс  
 Старший преподаватель кафедры  
 «Технология и конструирование  
 швейных изделий»  
 Тел.: (4862) 55-11-20  
 E-mail: tikshi@ostu.ru

**Черепенько Аркадий Анатольевич**  
 Государственный университет –  
 учебно-научно-производственный  
 комплекс  
 Доктор технических наук  
 Доцент кафедры «Технология ма-  
 шиностроения и конструкторско-  
 технологическая информатика»  
 Тел.: +7 (4862)54-1503  
 E-mail: arkan@nxt.ru

**Черепенько Анатолий Павлович**  
 Орловский государственный уни-  
 верситет  
 Доктор технических наук, профес-  
 сор кафедры «Художественное  
 проектирование швейных изделий»  
 Тел.: +7 (4862)54-1503  
 E-mail: arkan-68@mail.ru

G.D. GUSCHINA, A.A. CHEREPENKO, A.P. CHEREPENKO

## BASIC PROVISIONS OF THE ASSESSMENT OF QUALITY OF INTRA PROCESS DAMP AND THERMAL PROCESSING

*In article methods of an estimation of efficiency of damp-thermal processing of details and outer clothing knots are offered. The presented equations allow to describe the developed criteria of efficiency.*

**Keywords:** *definitive damp-thermal processing of details of garments, criterion of efficiency.*

### BIBLIOGRAPHY

- [1] Orlovsky B.V. Issledovaniye of quality of the damp-thermal processing of garments on press [text] / B.V.Orlovsky, Y.E.Levitsky, N. P. Berezenko//the message 1. - News of HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS. Technology of light industry №4 - 1979
- [2] Orlovsky B.V. Issledovaniye of quality of the damp-thermal processing of garments on press [text] / B.V.Orlovsky, Y.E.Levitsky, N. P. Berezenko//the message 2. News of HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS. Technology of light industry №5 - 1979
- [3] Cherepenko A.P. About an assessment of quality of processes of the damp-thermal processing of garments [text] / A.P. Cherepenko, S. S. Eppel, L.D.Dyablova//News of HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS. Technology of light industry №12 - 1983
- [4] Bolotsky D.I. Method of definition of efficiency of thermal processes of damp-thermal processing of details of garments D.I.Bolotsky, A.P.Cherepenko, A.A.Cherepenko [text] / Clothing industry №6 - 2009

**Gushyna Galina D.,**  
Polikarpov Technological Institute  
FSEI HVT «State University –  
ESPC»,  
The lecturer of the department  
“Technology and Designing of Gar-  
ments»  
Phone: (4862)55-1120  
e-mail: : tikshi@ostu.ru

**Cherepen'ko Arkadiy A.,**  
Polikarpov Technological Institute  
FSEI HVT «State University –  
ESPC»,  
The lecturer of the department  
“Technology of Mechanical Engineer  
and  
Design-technological Computer Sci-  
ence »  
Phone: (4862)54-1503  
e-mail: arkan@nxt.ru

**Cherepen'ko Anatoliy P.,**  
State University in Orel,  
The lecturer of the department  
“Art Design of Garments”,  
Phone: +79538187048,  
e-mail: arkan-68@mail.ru

# ИСПЫТАНИЕ, КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 621.87

В.Ю. АНЦЕВ, А.Н. ШАФОРСТ

## **ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ВНУТРИЦЕХОВОГО ТРАНСПОРТА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

*В статье рассматриваются: методика оптимизации структуры транспортно-накопительных систем внутрицехового транспорта машиностроительных предприятий, методика расчета необходимого количества оборудования и количества приведенных затрат на создание и эксплуатацию транспортной системы.*

**Ключевые слова:** *приведенные затраты, морфологический анализ, морфологический синтез, метод «ветвей и границ»*

Радикальное реформирование отечественной экономики и связанных с этим возросший объем работ по реконструкции и техническому перевооружению машиностроительных предприятий делает актуальным вопрос о сокращении сроков их проектирования, в том числе и проектирования транспортных систем. Подъемно-транспортные и погрузочно-разгрузочные работы являются важными и трудоемкими элементами производственных процессов машиностроительных предприятий, от методов организации, и оснащения которых в значительной степени зависит общий уровень производительности. Основной задачей при проектировании транспортной системы является сокращение объема подъемно-транспортных операций и снижение трудозатрат при заданном объеме работ.

Конкретные формы механизации и автоматизации транспорта и виды применяемого на определенном заводе специального оборудования зависят от особенностей изготавливаемой продукции, от типа производства, характера подъемно-транспортных операций, размера грузооборота и др. В производственных системах предприятий важнейшую роль играет транспортно-накопительная система (ТНС), без которой невозможно эффективное функционирование производства, так как она является основным организующим и связующим звеном производственного процесса, осуществляя накопление, хранение, учет, распределение и транспортирование заготовок, деталей, инструмента и т. п.

При проектировании ТНС возникает задача сокращения количества анализируемых вариантов этих систем. Для ее решения предлагается использование следующей методики – отсеивание неперспективных вариантов на основании анализа производительности оборудования ТНС и приведенных затрат на создание и эксплуатацию транспортной системы.

В зависимости от объемов грузопотоков, формируемых в производственной системе предприятия, в состав транспортной системы включается определенное количество подъемно-транспортного оборудования. В общем виде требуемое количество подъемно-транспортного оборудования вычисляется по следующей формуле [1]:

$$n_p = \sum_1^{z_{zp}} (Q_{pi} / q_{zi}),$$

где  $z_{zp}$  – число грузопотоков в производственной системе предприятия, одновременно обслуживаемых ТНС;  $Q_{pi}$  – расчетная величина  $i$ -го грузопотока, т/ч;  $q_{zi}$  – эксплуатационная производительность единицы оборудования ТНС на  $i$ -м грузопотоке, т/ч.

Анализируя полученные результаты производительности и расчетного количества транспортного оборудования, уже на начальной стадии проектирования транспортной системы возможно отсеивание неперспективных вариантов.

Приведенные затраты на создание и эксплуатацию транспортной системы вычисляются по следующей формуле:

$$P = \varepsilon K + \mathcal{E} \rightarrow \min,$$

где  $\varepsilon$  - нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных затрат;  $K$  - капитальные затраты на ТНС, руб.;  $\mathcal{E}$  - ежегодные эксплуатационные затраты на ТНС, руб./год.

Рассчитав годовые приведенные затраты на создание и эксплуатацию ТНС, которые используются в качестве целевой функции при проведении поиска оптимального варианта транспортной системы, можно перейти к дальнейшему анализу технологических, технических и организационно-экономических показателей. Данные показатели необходимо свести в единую математическую модель. С наибольшим эффектом в этом смысле может быть использован морфологический метод поиска технических решений [2], состоящий в реализации следующих этапов:

- точная формулировка решаемой задачи (описание желаемых функциональных свойств исследуемой системы);
- выявление максимально полного перечня основных классификационных признаков системы;
- определение различных альтернативных значений каждого из выявленных ранее классификационных признаков и генерирование всех возможных вариантов рассматриваемой системы, каждый из которых состоит из цепочки, содержащей ровно по одному значению каждого классификационного признака;
- определение эффективности вариантов системы;
- выбор и реализация наиболее предпочтительного варианта.

Первые три этапа представляют собой морфологический анализ технических систем, а последние два – морфологический синтез оптимальных вариантов этих систем.

Морфологический анализ – это совокупность операций выделения функционально важных классификационных признаков морфологической системы и операций разбиения морфологической системы на морфологические подсистемы по набору выделенных признаков. Результатом проведения морфологического анализа является построение морфологической таблицы (МТ) (рисунок 1).

Классификационные признаки	Значения классификационных признаков	Число значений
$K_1$	$K_1^1$ $K_1^2$	2
$K_2$	$K_2^1$ $K_2^2$	2
$K_3$	$K_3^1$ $K_3^2$	2
$K_4$	$K_4^1$ $K_4^2$ $K_4^3$	3
$K_5$	$K_5^1$ $K_5^2$ $K_5^3$	3
$K_6$	$K_6^1$ $K_6^2$	2
$K_7$	$K_7^1$ $K_7^2$ ... $K_7^{16}$	16
$K_8$	$K_8^1$ $K_8^2$ $K_8^3$	3
$K_9$	$K_9^1$ $K_9^2$ $K_9^3$ $K_9^4$	4
$K_{10}$	$K_{10}^1$ $K_{10}^2$ $K_{10}^3$	3
$K_{11}$	$K_{11}^1$ $K_{11}^2$ ... $K_{11}^6$	6
$K_{12}$	$K_{12}^1$ $K_{12}^2$ $K_{12}^3$ $K_{12}^4$	4

Рисунок 1 – Морфологическая таблица ТНС

Общее число всех возможных вариантов  $N$  определится так:

$$N = \prod_{i=1}^m \mathcal{G}_i,$$

где  $\mathcal{G}_i$  – число возможных значений  $i$ -го классификационного признака;  $m$  – общее число классификационных признаков рассматриваемой системы.

Анализируя реализованные компоновочные структуры ТНС и входящие в них компоненты, можно выделить 13 основных классификационных признаков, используемых в морфологической таблице, которые наполняются следующим содержанием:

$K_1$  – по назначению транспортной системы ( $K_1^1$  – внутрицеховые,  $K_1^2$  – межоперационные);

$K_2$  – по принципу движения ( $K_2^1$  – периодические,  $K_2^2$  – непрерывные);

$K_3$  – по направлению движения ( $K_3^1$  – однонаправленные,  $K_3^2$  – разнонаправленные);

$K_4$  – по уровню расположения рабочей ветви ( $K_4^1$  – напольные,  $K_4^2$  – эстакадные,  $K_4^3$  – подвесные);

$K_5$  – по принципу работы ( $K_5^1$  – несущие,  $K_5^2$  – толкающие,  $K_5^3$  – тянущие);

$K_6$  – по конструктивному исполнению ( $K_6^1$  – рельсовые,  $K_6^2$  – безрельсовые);

$K_7$  – средства транспортирования ( $K_7^{q_i}$ , где  $q_i = 1, 2, \dots, 16$  соответствует: краны-штабелеры, краны мостовые, рельсовые тележки, шаговые конвейеры, пластинчатые конвейеры, ленточные конвейеры, роликовые конвейеры, цепные конвейеры, подвесные грузонесущие конвейеры, подвесные толкающие конвейеры, монорельсовый транспорт, транспортно-перегрузочные роботы, индуктивные тележки, самоходные тележки с инерционным управлением, подвесные роботы, подъемники);

$K_8$  – способ загрузки технологического оборудования ( $K_8^1$  – ручной,  $K_8^2$  – механизированный,  $K_8^3$  – автоматический);

$K_9$  – оборудование для загрузки рабочих позиций ( $K_9^1$  – манипуляторы,  $K_9^2$  – роботы,  $K_9^3$  – устройства смены спутников,  $K_9^4$  – загрузка осуществляется транспортным средством);

$K_{10}$  – устройства для обслуживания склада ( $K_{10}^1$  – краны-штабелеры,  $K_{10}^2$  – мостовые краны,  $K_{10}^3$  – напольные роботы);

$K_{11}$  – способ хранения грузов ( $K_{11}^1$  – в стеллажном складе с напольным штабелером,  $K_{11}^2$  – в стеллажном складе с подвесным штабелером,  $K_{11}^3$  – в складе элеваторного типа,  $K_{11}^4$  – в пристаночном накопителе,  $K_{11}^5$  – на конвейере,  $K_{11}^6$  – в подвесном складе кассетного типа);

$K_{12}$  – способ транспортирования заготовок ( $K_{12}^1$  – в поддоне,  $K_{12}^2$  – на спутнике,  $K_{12}^3$  – в кассете,  $K_{12}^4$  – на палетах).

Таким образом, разработанная морфологическая таблица содержит описание 1 990 656 альтернативных вариантов проектируемой транспортно-накопительной системы.

Под морфологическим синтезом понимается совокупность операций поиска на морфологическом множестве вариантов описаний ТНС, соответствующих исходной цели поиска – условиям задачи.

Под поиском понимается последовательность: 1) операций выбора («извлечения» из морфологической таблицы) варианта описания функциональной системы; 2) операций оценивания совместимости подсистем, образующих выбранный вариант, и соответствия варианта требованиям к искомой функциональной системе, которые должны содержаться в корректной формулировке условий задачи.

Морфологический синтез предполагает формирование вариантов ТНС как выборку значений признаков по одному из каждой строки морфологической таблиц, т. е.

$$W = \{K_1^{q_1}, K_2^{q_2}, \dots, K_m^{q_m}\},$$

где  $K_j^{q_j}$  –  $q_j$ -е значение  $j$ -го признака, где ( $q_j = 1, 2, \dots, \vartheta_j$ ;  $\vartheta_j$  – число значений  $j$ -го признака).

Морфологическая таблица при этом описывает конечное множество вариантов:

$$W = \{W_i\}, W = W_1, W_2, \dots, W_N.$$

Для решения задачи морфологического синтеза оптимального варианта ТНС из большого количества методов дискретной оптимизации предлагается использовать метод «ветвей и границ» [3].

Для всей группы алгоритмов, входящих в общую схему метода ветвей и границ, характерным является применение следующей основной идеи: последовательное использование конечности множества вариантов решения задачи и замена полного их перебора направленным. Полного перебора удастся избежать за счет отбрасывания неперспективных множеств вариантов, т. е. таких, которые заведомо не могут содержать искомого оптимального решения задачи.

При морфологическом синтезе вариантов ТНС процедуру последовательного разбиения множества допустимых решений целесообразно осуществлять с использованием алгоритма последовательного анализа вариантов, что позволяет улучшить сходимость метода.

Методика генерации, анализа и отбора вариантов предполагает отсеивание невыгодных (бесперспективных) вариантов на начальных стадиях их построения. Поскольку при отсеивании бесперспективных вариантов отсеивается и множество их продолжений, то происходит значительная экономия времени в вычислительной процедуре.

Отсеивание бесперспективных вариантов осуществляется с использованием матрицы бинарных отношений совместимости элементов. Вариант считается бесперспективным при появлении первого нулевого значения индикатора совместимости элементов. Один из возможных графов решения задачи морфологического синтеза с применением метода последовательного анализа вариантов представлен на рисунке 2.

В результате выполнения этого алгоритма мы получаем несколько возможных вариантов ТНС, обеспечивающих требуемую производительность транспортной системы и минимальные приведенные затраты на ее создание и эксплуатацию. Окончательное решение о выборе оптимально варианта из них целесообразно принимать на основании результатов имитационного моделирования транспортных систем, осуществляемого с использованием общецелевой системы имитационного моделирования GPSS [3].

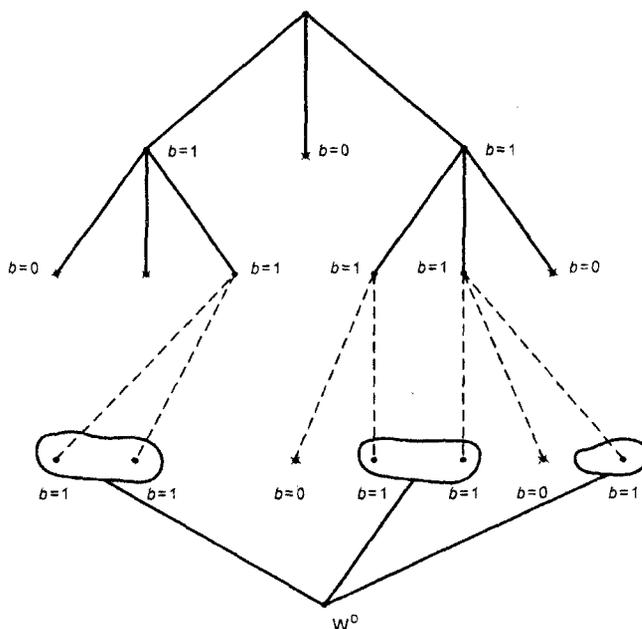


Рисунок 2 – Граф решения

Представленный подход к автоматизации проектирования транспортных систем позволяет осуществить анализ максимального числа их возможных альтернативных вариантов и выбрать среди них оптимальный по критерию минимума приведенных затрат на создание и эксплуатацию транспортной системы и максимальной ее производительности при сокращении сроков проектирования и повышении качества получаемых проектных решений.

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зуев, Ф.Г. Курсовое проектирование по механизации погрузо-разгрузочных, транспортных складских работ [Текст] / Ф.Г. Зуев. – М.: Колос, 1995. – 416 с.
2. Сергиенко, И.В. Математические модели и методы решения задач дискретной оптимизации [Текст] / И.В. Сергиенко. - 2-е изд. доп. и перераб. – Киев: Наук. думка, 1988. – 472 с.
3. Томашевский, В. Имитационное моделирование в среде GPSS / [Текст] / В. Томашевский, Е. Жданова. – М.: Бестселлер, 2003. – 416 с.

**Виталий Юрьевич Анцев**  
 Доктор технических наук, профессор  
 ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет»  
 Тел: (4872)33-22-88  
 E-mail: [anzev@tsu.tula.ru](mailto:anzev@tsu.tula.ru)

**Александр Николаевич Шафорост**  
 Магистрант  
 ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет»  
 Тел: 8-905-626-82-17  
 E-mail: [akar06@rambler.ru](mailto:akar06@rambler.ru)

V. Y. ANTSEV, A. N. SHAFOROST

## OPTIMIZATION OF STRUCTURE OF INTRADEPARTMENTAL TRANSPORT OF MACHINE-BUILDING ENTERPRISES

*The method of optimization of structure of transport and accumulative systems of intradepartmental transport of machine-building enterprises and the design procedure of necessary quantity of the equipment and quantity of the given expenses for creation and operation of transport system are considered in this article.*

**Key words:** *the given expenses, the morphological analysis, morphological synthesis, branches and borders method.*

## BIBLIOGRAPHY

- [1] Zuyev, F.G. Course design on mechanization of materials handling, transport warehouse works [Text] / F.G. Zuyev. – M: Colos, 1995. – 416 p.  
[2] Sergiyenko, I.V. Mathematical models and methods of the solution of problems of discrete optimization [Text] / I.V. Sergienko. – 2nd prod. additional and reslave. – Kiev: Nauk. doomka, 1988. – 472 p.  
[3] Tomashevsky, V. Imitating modeling in the environment of GPSS / V. Tomashevsky, E. Zhdanova. – M: Best-seller, 2003. – 416 p.

### Vitaly Yuryevich Antsev

Doctor of Engineering, professor  
Tula State University,  
Tula  
Phone: (4872)33-22-88  
E-mail: [anzev@tsu.tula.ru](mailto:anzev@tsu.tula.ru)

### Aleksandr Nikolaevich Shaforost

Student  
Tula State University,  
Tula  
Phone: 8-905-626-82-17  
[ar06@rambler.ru](mailto:ar06@rambler.ru)

УДК 629.1:531

Б.М. БРЖОЗОВСКИЙ, Д.А. ХАЙРОВ, И.Н. ЯНКИН

## ДИАГНОСТИКА РЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА НЕСЛУЧАЙНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

*В статье рассматривается способ оценки состояния резания на металлообрабатывающих станках на основе исследования колебательного процесса, сопровождающего обработку путем выделения в сигнале колебательного процесса неслучайных составляющих.*

**Ключевые слова:** *колебательный процесс, динамика резания, фазовая диаграмма*

### ВВЕДЕНИЕ

Резание материалов протекает через стадии его упругопластического деформирования и разрушения и сопровождается высоким уровнем динамического возмущения формируемых подсистем станка. Формируемый резанием колебательный процесс, как реакция динамической системы станка на такое возмущение, несет в себе значительную информацию как о состоянии процесса резания, так и о динамическом состоянии технологического оборудования.

Неустойчивость динамической системы станка обычно проявляется в образовании неслучайной вибрации, которая при определенных условиях может переходить в детерминированную. Поэтому в диагностике процесса резания важное значение приобретает информация о соотношении в колебательном процессе стохастических и детерминированных составляющих. Корректное определение указанного соотношения или оценка его тренда при обработке служит критерием выявления нежелательных тенденций в резании материалов и является основой прогноза качества обработанной поверхности. В статье рассматривается способ извлечения полезной информации из сигнала колебательного процесса, сопровождающего процесс резания материалов на металлообрабатывающих станках.

Выделение детерминированной составляющей колебательного процесса целесообразно осуществить на основе исследования фазовых диаграмм, которые можно построить по сигналу колебательного процесса. Фазовая диаграмма позволяет в координатах «смещение-скорость» получить информацию о возмущенных движениях системы и по форме фазовых траекторий выявить ее склонность к проявлению неустойчивого состояния. Положение ди-

намической системы в любой момент времени может быть однозначно определено двумя параметрами – текущим смещением и мгновенной скоростью. В этом случае движение динамической системы вдоль исследуемой координаты приобретает двумерный характер и описывается изображающей точкой на фазовой плоскости.

По форме фазовых траекторий представляется возможным судить о бифуркациях динамической системы – о переходах от одного движения к другому и увязывать их с изменяющимися условиями резания. Фазовый портрет оказывается наиболее эффективным при исследовании нелинейных систем, к которым относятся системы резания.

Рассмотрим методику построения фазовых диаграмм по сигналу колебательного процесса. Каждая реализация регистрируемого вибросигнала на конечном интервале времени после преобразования в аналого-цифровом преобразователе описывается массивом ординат  $[y_0 \dots y_n]$  на временном интервале  $T=n \cdot \Delta t$ , где  $\Delta t$  – период дискретизации;  $n$  – число точек в реализации сигнала.

Первичная информация о составе колебательного процесса может быть получена путем применения классического спектрального преобразования с расчетом коэффициентов Фурье:

$$A_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \cdot \cos(2 \cdot i \cdot j \cdot \pi / n); \quad \Phi_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \cdot \sin(2 \cdot i \cdot j \cdot \pi / n), \quad j = 1..n/2, \quad (1)$$

где обозначено:  $i$  – порядковый номер точки в реализации сигнала колебательного процесса;  $j$  – номер гармоники.

Дальнейшие действия зависят от вида сигнала, получаемого с измерительного преобразователя. При использовании пьезоэлектрических преобразователей сигнал колебательно-го процесса представляет собой изменение ускорения колебательной массы акселерометра. Поэтому для получения сигналов скорости  $v_i$  и смещения  $x_i$  исходный сигнал подлежит обработке. Для этого используем коэффициенты Фурье, рассчитанные по исследуемой реализации колебательного процесса:

$$v_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n/2} \frac{1}{j} \cdot [-A_j \cdot \cos(2 \cdot i \cdot j \cdot \pi / n) + \Phi_j \cdot \sin(2 \cdot i \cdot j \cdot \pi / n)] \quad (2)$$

$$x_i = -\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n/2} \frac{1}{j^2} \cdot [A_j \cdot \sin(2 \cdot i \cdot j \cdot \pi / n) + \Phi_j \cdot \cos(2 \cdot i \cdot j \cdot \pi / n)]$$

Полученные два массива после масштабирования дают возможность построить фазовую диаграмму движений динамической системы. Текущее положение изображающей точки на фазовой диаграмме определяется парой координат с одинаковыми индексами в массивах  $X$  и  $V$ . Аппроксимировав все точки массива дугами окружностей, получаем фазовую диаграмму. По форме кривых можно судить об устойчивости динамической системы. Высокая степень повторяемости траекторий, которая характерна для неустойчивой системы, показывает на наличие в колебаниях неслучайной составляющей.

Поскольку сигнал колебаний при резании носит сложный многочастотный характер, то для выявления неслучайной составляющей используем метод фильтрации малозначимых гармоник, приняв  $A_j = 0$ ,  $\Phi_j = 0$  для гармоник спектра (1) с амплитудой

$$A_m < \frac{2K_\phi}{n} \sum_{j=1}^{n/2} \sqrt{A_j^2 + \Phi_j^2}, \quad (3)$$

где  $K_\phi < 1$  – коэффициент фильтра;  $A_j$  и  $\Phi_j$  – соответственно синусные и косинусные коэффициенты Фурье. При этом фильтрации подвергаем исходный сигнал, полученный с акселерометра, а сигналы скорости и смещения собираем уже по преобразованному сигналу с использованием гармонических коэффициентов амплитуд и фаз.

На рисунке 1 показан пример использования принципа фильтрации сигнала акселерометра на примере токарной обработки. Как видно, с увеличением коэффициента фильтра  $K_\phi$  фазовая диаграмма претерпевает существенное изменение. Это позволяет выделить в спектре колебаний наиболее значимые составляющие. Вместе с тем возникает вопрос, чем ограничить верхний порог фильтрации для выявления детерминированной составляющей.

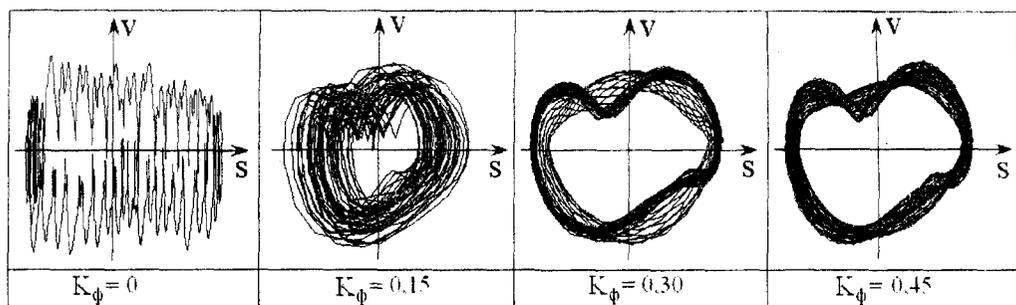


Рисунок 1 – Влияние коэффициента фильтра  $K_\phi$  сигнала акселерометра на вид фазовой диаграммы

Для обоснования порога фильтрации выполнен статистический эксперимент на достаточно большом количестве реализаций колебаний, полученных при различных видах обработки (шлифование плоское и внутренне, растачивание отверстий, обтачивание цилиндрических деталей) с широким варьированием режимов резания. Результаты эксперимента позволили выявить определенную закономерность. В частности, увеличение уровня фильтрации сигнала ускорения влечет за собой рост коэффициента корреляции между кривыми, описывающими спектры скорости и смещения. На рисунке 2 показано поле распределения, полученное по 136 реализациям колебательного процесса и устанавливающее соответствие между коэффициентом фильтра и коэффициентом корреляции кривых спектра скорости и смещения. На основе анализа полученной статистической кривой верхнюю границу фильтрации целесообразно ограничить по моменту достижения коэффициента корреляции между указанными параметрами на уровне 0,97, поскольку с дальнейшим ростом коэффициента фильтра его влияние на коэффициент корреляции существенно ослабевает. Таким образом, алгоритм выявления неслучайных составляющих в сигнале колебательного процесса сводится к нахождению минимального значения коэффициента фильтра  $K_{\phi min}$  сигнала акселерометра, при котором коэффициент корреляции достигает значения 0,97. Тогда долевое участие стохастических и неслучайных составляющих в сигнале определится соответственно как  $K_{\phi min}$  и  $(1 - K_{\phi min})$ .

На рисунках 3-6 показано в качестве примера выделение неслучайной составляющей в сигналах колебательных процессов, записанных соответственно на операциях точения и растачивания на одном и том же токарном полуавтомате. В левой части помещены макет сигнала акселерометра, спектры сигналов скорости  $V$  и смещения  $S$  в диапазоне частот 0,1-5 кГц. В правой части рисунков расположены фазовые диаграммы в системе «смещение  $S$  – скорость  $V$ ». На рисунках 3 и 5 построения сделаны по исходному сигналу акселерометра, а на рисунках 4 и 6 применена фильтрация указанного сигнала. Как видно, коэффициент корреляции  $K=0,97$  между кривыми спектров скорости и смещения наступает при достижении уровня фильтрации  $K_\phi=0,36$  на операции точения и  $K_\phi=0,03$  на операции растачивания. Отсюда следует, что в сигналах колебательных процессов соотношение между неслучайными и стохастическими составляющими можно определить как 36 % и 74 % для операции точения и 97 % и 3 % для операции растачивания.

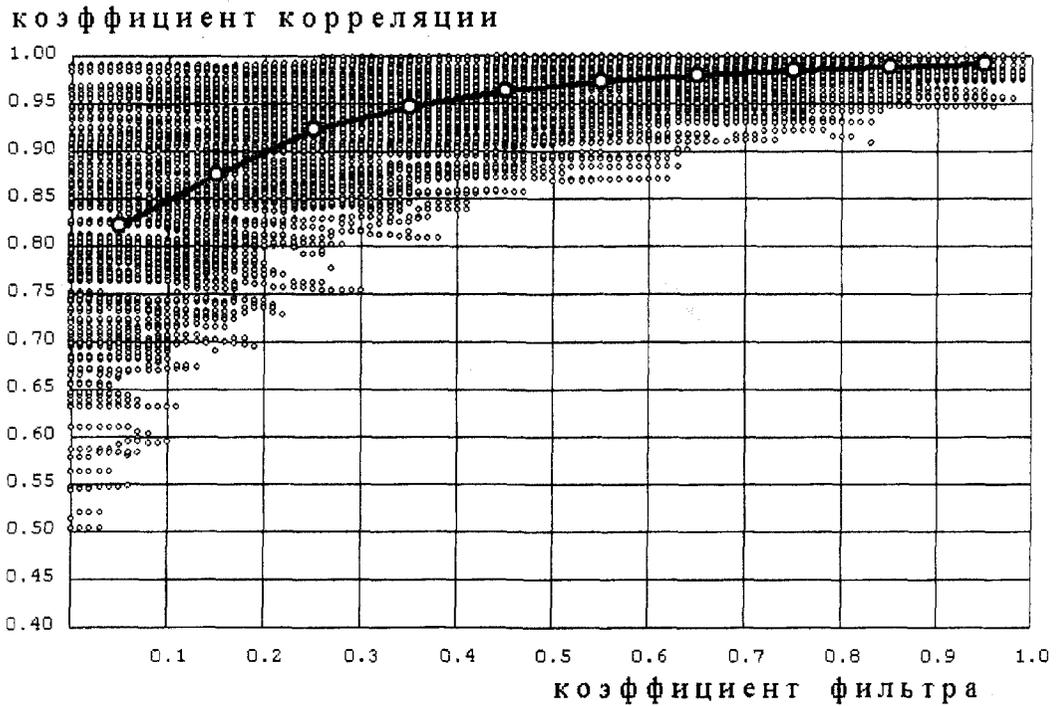


Рисунок 2 – Поле рассеяния системы « $K_f$ - $K$ »:  
 $K_f$  – коэффициент фильтра;  
 $K$  – коэффициент корреляции между кривыми спектров скорости и смещения

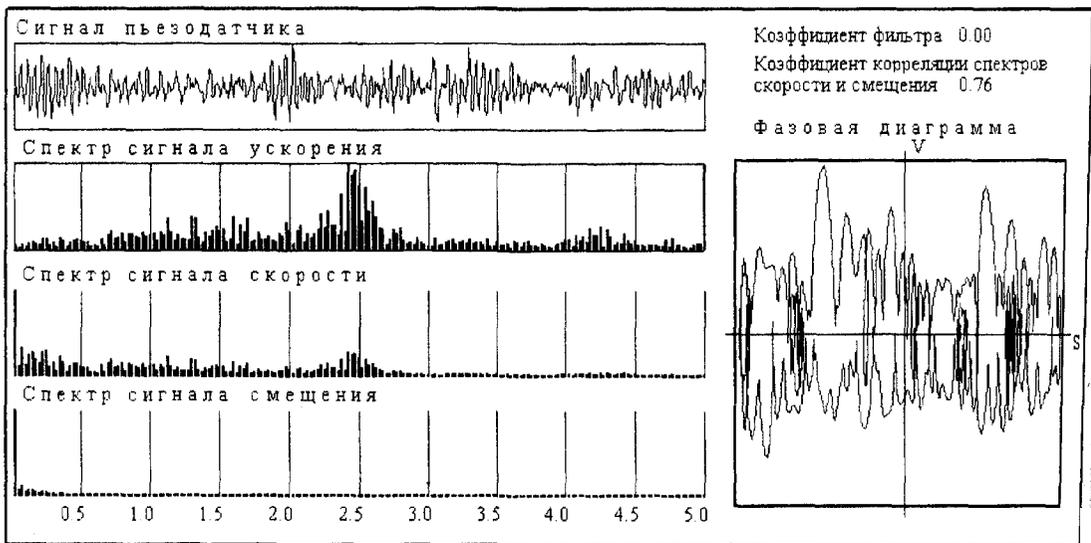


Рисунок 3 – Фазовая диаграмма на примере течения без фильтрации

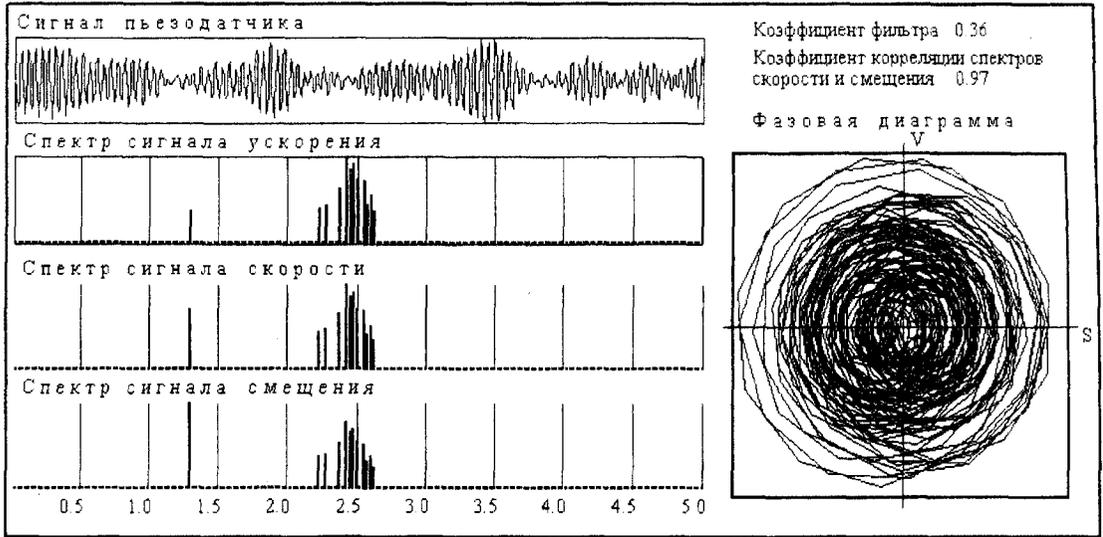


Рисунок 4 – Фазовая диаграмма на примере точения при коэффициенте фильтра 0,36

Такое различие в структурах колебательных процессов при точении и растачивании на одном и том же станке объясняется существенным изменением динамических свойств системы резания, связанных со сменой инструмента. Устойчивость динамической системы станка при переходе от точения к растачиванию существенно снижается. При точении проявляются неслучайные формы колебаний в диапазоне частот 2,25-2,6 кГц, а при растачивании система резания имеет высокую склонность к образованию детерминированной вибрации на частоте 1,1 кГц, о чем свидетельствует высокая плотность и степень повторяемости траекторий фазовой диаграммы, изображенной на рисунке 6.

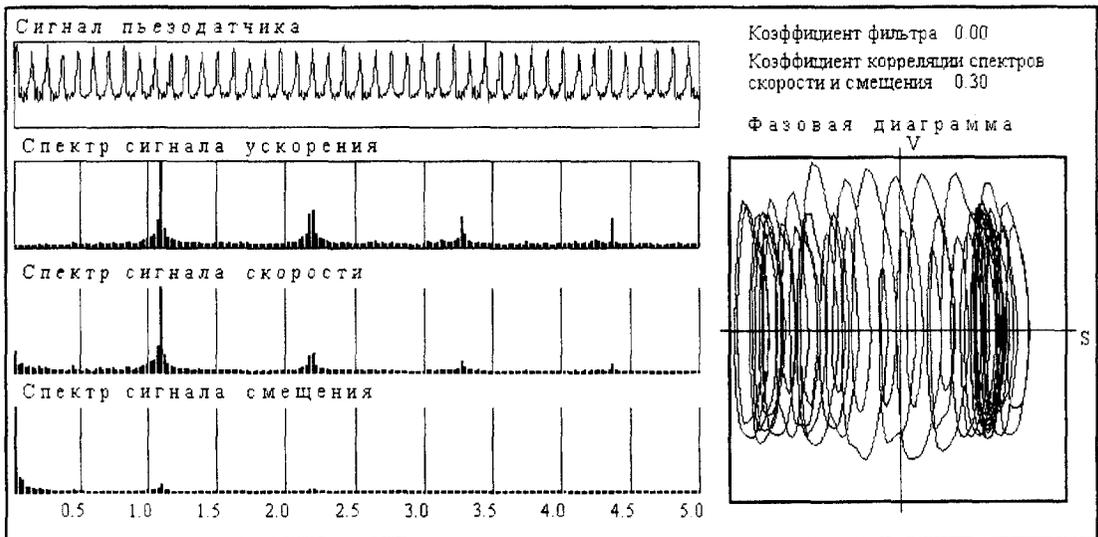


Рисунок 5 – Фазовая диаграмма на примере растачивания без фильтрации

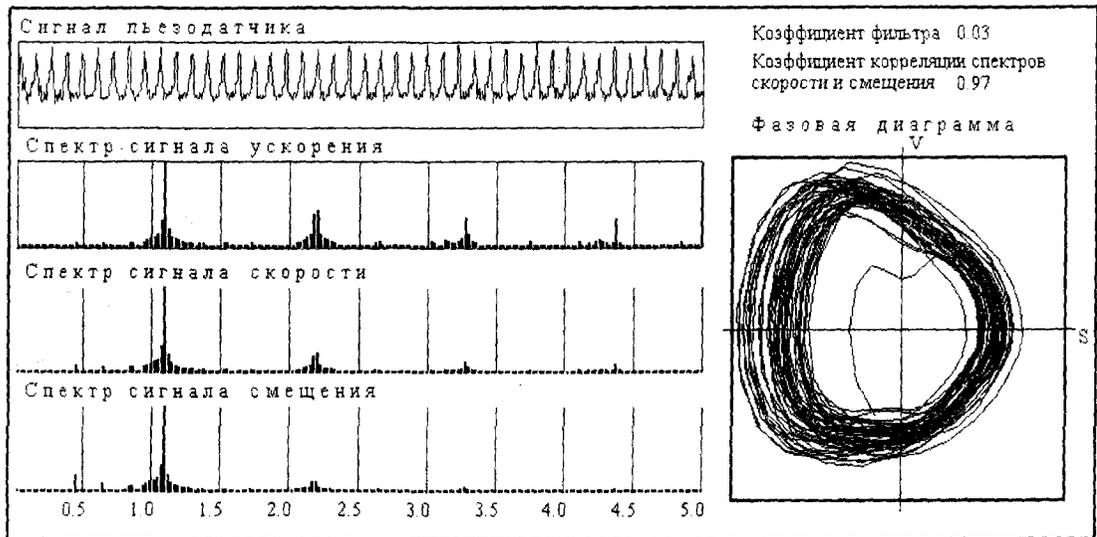


Рисунок 6 – Фазовая диаграмма на примере растачивания при коэффициенте фильтра 0,03

## ВЫВОД

Колебательный процесс, сопровождающий обработку материалов, содержит высокую информативность о состоянии динамической системы станка и процесса резания. Извлечение полезной информации целесообразно выполнять на основе анализа структуры колебательного процесса по критерию соотношения стохастических и неслучайных составляющих. Для оценки соотношения между указанными составляющими целесообразно использовать принцип фильтрации исходного сигнала. Верхнюю границу фильтрации допустимо ограничить моментом достижения коэффициента корреляции между спектрами смещения и скорости на уровне 0,97. Описанный способ обработки сигнала колебательного процесса может быть использован в системах диагностирования технологического оборудования в качестве источника информации о состоянии рабочих процессов и в других технических системах, где требуется высокая информативность о протекающих динамических явлениях.

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Государственный университет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).*

**Борис Максимович Бржозовский**  
 Доктор технических наук, профессор,  
 заведующий кафедрой «Конструирование  
 и компьютерное моделирование  
 технологического  
 оборудования в машино- и приборостроении»  
 Саратовского государственного  
 технического  
 университета им. Гагарина Ю.А.  
 E-mail: [bmbasar85@mail.ru](mailto:bmbasar85@mail.ru)

**Джавдат Анварович Хайров**  
 Аспирант Саратовского государственного  
 технического  
 университета им. Гагарина Ю.А.  
 E-mail: [kimo@sstu.ru](mailto:kimo@sstu.ru)

**Игорь Николаевич Янкин**  
 Доктор технических наук, профессор  
 кафедры «Конструирование и компьютерное  
 моделирование технологического  
 оборудования  
 в машино- и приборостроении»  
 Саратовского государственного  
 технического  
 университета им. Гагарина Ю.А.  
 E-mail: [yankin10@rambler.ru](mailto:yankin10@rambler.ru)

B. M. BRZHOZOVSKIY, D.A. KHAYROV, I. N. JANKIN

## DIAGNOSTICS OF CUTTING OF MATERIALS ON BASIS OF ANALYSIS OF NON-RANDOM CONSTITUENTS OF SWAYING PROCESS

*In the article the method of estimation of the state of cutting is examined on metal-working machine-tools on the basis of research of swaying process, accompanying treatment by a selection in the signal of swaying process of non-random constituents*

**Key words:** *swaying process, cutting dynamics, phase diagram.*

**Boris Maksovich Brzhozovskiy**

Is a doctor of engineering sciences, professor, manager by a department «Constructing and computer design of technological equipment in mashino- and instrument-making» of the Saratov state technical university the name of Gagarina Yu.A.  
E-mail: [bmbasar85@mail.ru](mailto:bmbasar85@mail.ru)

**Dgavdat Anvyarovich Khayrov**

Graduate student of the Saratov state technical university the name of Gagarina Yu.A.  
E-mail: [kimo@sstu.ru](mailto:kimo@sstu.ru)

**Igor Nikolaevich Jankin**

Is a doctor of engineering sciences, the professor of faculty «Designing and computer modelling of the process equipment of mechanical engineering and instrument making» the Saratov state technical university of the name of Gagarina Yu.A.  
E-mail: [yankin10@rambler.ru](mailto:yankin10@rambler.ru)

УДК 621.8

М.К. ВЕРЕТЕННИКОВА, Н.В. УГЛОВА

## КАЧЕСТВО КРЕПЕЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ МАССОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

*В статье рассматриваются факторы, влияющие на качество крепежных изделий. Представлены возможные виды дефектов, возникающих при производстве крепежных изделий. Предложены мероприятия по повышению качества крепежных изделий при массовом производстве.*

**Ключевые слова:** *крепежные изделия, производство, качество, факторы, дефекты.*

### ВВЕДЕНИЕ

В мировой практике машиностроения с каждым годом возрастают требования к качеству крепёжных деталей. Такова общая тенденция развития техники. Это происходит вследствие применения автоматизированных устройств и систем сборки, например, автомобилей, приборов и т.д. Производители увеличивают гарантийные сроки эксплуатации товара как средства конкурентной борьбы за покупателя. Контроль качества крепёжных деталей должен сопровождать все операции их изготовления.

Одним из важных факторов роста эффективности производства в итоге является улучшение качества выпускаемой продукции, это как раз и является решающим условием её конкурентоспособности как на внутреннем, так и внешних рынках.

При изготовлении крепежных изделий ряд производственных процессов выполняют с применением холодной объемной штамповки. Известно, что металл и металлопрокат, предназначенные для пластического формообразования крепежных изделий, должны соответствовать техническим условиям, приведенным в нормативно-технических документах.

Однако даже соблюдение всех технических условий и рекомендаций по механическим свойствам, проведению испытаний на осадку и по макро-, микроструктуре еще не гарантирует отсутствие брака металлоизделий при обработке давлением.

Основной технический дефект при производстве крепежа связан с высокой степенью деформации (до 87 %) в процессе штамповки, так как трещины исходного проката, не лежа-

шие на поверхности, распространяются в штампуемом изделии в результате максимальных полных касательных напряжений.

Трещины – чистый разрыв, проходящий вдоль или поперек границ зерен, и может быть следствием включения инородных элементов.

По характеру трещин, образующихся на изделиях в результате пластической деформации можно оценить качество и пригодность используемого подката. Наиболее распространенным видом дефектов металлургического происхождения являются неметаллические включения – частицы шлака и огнеупоров. При выпуске металла из печи в ковш и из ковша в изложницу, шлак механически извлекается струей металла. Частицы огнеупорного материала попадают в сталь из футеровки ковша и сифонного кирпича. При дальнейшей обработке металла холодным пластическим деформированием, образуются трещины в местах наибольших скоплений неметаллических включений даже при самых благоприятных для холодной штамповки механических свойствах и структуре.

Причиной образования трещин при штамповке со степенью деформации 40-80 % могут также являться дефекты сталеплавильного (при разливке и охлаждении слитков) и прокатного (при деформации и охлаждении проката) происхождения. Большое влияние на деформируемость сталей оказывает вид раскислителя. Раскисление кремнием гораздо хуже, чем раскисление алюминием, так как раскисление алюминием резко сокращает брак по трещинам.

Марки, химический состав и другие свойства сталей, предназначенных для холодной штамповки, регламентирует в основном ГОСТ 10702-2006. Оптимальный химический состав сталей в этом стандарте установлен на основе обобщения имеющегося передового опыта по их выплавке, применению в производстве крепежных изделий и тщательного изучения влияния отдельных элементов в них (углерода, кремния, серы, фосфора, марганца, хрома, никеля, алюминия, меди, бора и др.) на способность металла к холодной и горячей штамповке. При этом учтено также влияние газов: кислорода, азота, водорода.

Для изготовления мелкого крепежа (до диаметра 4 мм) широко используют также низкоуглеродистые стали группы В ГОСТ 380-2005. Конкретные марки сталей для изготовления крепежных изделий определяются соответствующими ГОСТами на них, в частности, для болтов гаек, винтов с диаметром резьбы от 1 до 48 мм – ГОСТ 1759.0-2006.

В последние годы для изготовления крепежных изделий холодной штамповкой начали применять низкоуглеродистые стали, раскисленные только алюминием (вместо кремния). Как уже было отмечено выше, такие стали практически не склонны к трещинообразованию, обладают большой пластичностью, высоким сопротивлением напряжению изгиба, малой склонностью к растрескиванию при нагреве и резком охлаждении, низкой способностью к обезуглероживанию, повышенной деформируемостью в холодном состоянии, а также высоким сопротивлением релаксации.

Раскисление алюминием является одним из самых прогрессивных способов при выплавке стали, так как алюминий полностью выгорает при  $t=2500^{\circ}\text{C}$ , создает бурное кипение (бурление) во всем объеме расплавленного металла, выравнивая микроструктуру. При этом вместе с пузырьками воздуха и газовыми пузырями выходят наружу все неметаллические включения, которые при последующей переработке металла удаляются зачисткой с поверхности слитков, блюмов (слябов) и горячекатаного проката. Металл, раскисленный алюминием, практически не содержит неметаллических включений, кремния и газовых пузырей и является самым подходящим для штамповки крепежных изделий. К поверхностным дефектам слитков, кроме неметаллических включений, также относятся: плены, пояса, трещины, газовые пузыри, флокены. Для удаления неметаллических включений производят продувку кислородом. К дефектам, возникающим при прокатке относятся раскатанные газовые пузыри, волосовые трещины, рванины, закаты. К дефектам, возникающим при волочении – трещины, поры, рванины. Эти дефекты образуются в результате обжатия металла при прохождении через волокнистые структуры и регулируются правильным подбором степеней обжатия, скоростей и режимов волочения.

Все перечисленные виды дефектов могут раскрываться при штамповке в виде трещин, приводя к браку готовых изделий. Особое внимание следует уделить производству холоднокатаного проката в виде прутков и бунтов, которые являются исходными заготовками для производства крепежных изделий. Для производства крепежных изделий холодной и горячей штамповкой сталь поставляется потребителю в различных видах:

1) по способу изготовления – горячекатаной, калиброванной в виде сортовой тянутой со специальной отделкой поверхности или без специальной отделки поверхности, проволоки или подката;

2) по состоянию материала – без термической обработки (нагартованный) и с термической обработкой (с обычным или сфероидизирующим отжигом, отпуском и др.).

Важными признаками металла, оказывающими влияние на поставки, являются также его механические и технологические свойства.

Неизменным дефектом поверхности металла и металлоизделий, сопутствующим термической обработке, является образование обезуглероженного слоя вследствие выгорания части углерода при нагреве металла под следующую закалку. Обезуглероживание поверхности металла может иметь место как на стадиях прокатки, подготовки металла под высадку, так и при термической обработке на соответствующий класс прочности готовых деталей. Обезуглероживание и окисление существенно снижает механические свойства в поверхностных слоях металла. Поверхность становится восприимчивой к образованию рисок, задиров, царапин при прокатке, калибровке, высадке. Возможен срыв резьбы при испытаниях. Применение защитных атмосфер при нагреве существенно снижает вероятность образования обезуглероженного слоя.

Закалочные трещины в деформируемом металле могут появиться в процессе закалки в результате возникновения высоких напряжений, структурных превращений и температурных напряжений. Закалочные трещины обычно имеют неровную блуждающую траекторию на поверхности крепежной детали. Основными причинами появления температурных напряжений являются: быстрый нагрев под закалку, быстрое охлаждение в области мартенситного превращения, сложная конфигурация изделий с резкими переходами, значительный временной разрыв между операциями закалки и отпуска [1].

Наряду с дефектами, связанными с некачественным металлопрокатом, технологическим инструментом и режимами деформационной и термической обработки, возникают дефекты на металле и заготовках металлоизделий, причиной которых являются ошибки, допущенные при проектировании инструментальной оснастки, установке, износе и неправильной наладки оборудования.

Таким образом, возникновение дефектов при массовом производстве крепежных изделий зависит от следующих факторов:

- 1) качества применяемого материала;
- 2) величины и характера нагрузки степени деформирования при штамповке;
- 3) принципа действия и состояния применяемого инструмента и оборудования.

Подготовка металла к производству крепежных изделий заключается, главным образом, в получении пригодного для этой цели калиброванного профиля из исходного горячекатаного проката. Калиброванный металл должен иметь заданные механические и технологические свойства и поверхность, обеспечивающую успешное проведение высадки и других последующих операций деформирования. После таких операций полученное изделие должно обладать всеми требуемыми свойствами. В соответствии с этим подготовка металла состоит из трех основных стадий: подготовки поверхности исходного горячекатаного проката к волочению (калибровке), волочения и подготовки поверхности протянутого металла к штамповке (часто последняя операция является одновременно и подготовкой к высадке и другим последующим операциям).

Как было отмечено выше, причины дефектов могут быть различны: при выплавке стали, разливке, прокатке. Установлено практикой, что риски глубиной даже 0,05 мм вскрываются при холодной штамповке в виде трещин на готовых изделиях. Трещины и разрывы на

готовых крепежных изделиях образуются при штамповке, гибке и накатке резьбы в местах скопления неметаллических включений, газовых пузырей, флокенов. Для сокращения дефектов разливки и прокатки необходима защита поверхности слитка и заготовки. На металлургических заводах традиционно применяют огневую зачистку, что не обеспечивает качества поверхности, поэтому необходима только механическая зачистка.

Если металл имеет пониженную пластичность и повышенную прочность, то для обеспечения возможности его холодного пластичного деформирования прокат перед подготовкой поверхности к волочению подвергают смягчающей термической обработке: отжигу, нормализации, отпуску или закалке (для высоколегированных сталей) [2].

При изготовлении горячекатаного проката в случае перегрева при повышенной температуре аустенизации образуется так называемая видманштеттовая структура, характеризующаяся тем, что избыточный феррит (цементит) выделяется в виде длинных пластин (игл), прорезывающих зерна перлита, в результате формируется крупное действительное зерно аустенита. Видманштеттовая структура в исходном прокате для изготовления крепежа недопустима, так как при деформации в процессе гибки или штамповки происходит крупнокристаллический излом по границам зерен, и появляются браковочные трещины и рванины.

Для устранения указанной структуры в исходном горячекатаном прокате необходимо проведение дополнительно отжига или нормализации с температурой нагрева 860-900°C и равномерным охлаждением до 400-500°C. Предварительная термическая обработка подката необходима также для получения протянутого металла с заданными механическими, технологическими и другими свойствами, что должно обеспечить соответствующие свойства высаженным из него изделиям. Нередко такая термическая обработка необходима и перед холодной штамповкой.

Большое влияние на деформируемость оказывает структура металла. Микроструктура должна быть однородной, ликвационная зона не должна превышать 25 % сечения металла и не должна выходить на поверхностный слой. Для холодной штамповки необходимо иметь микроструктуру исходного металла после отжига 80-100 % зернистого перлита.

К технологическим свойствам металла, подвергаемого высадке, относятся, в частности, его способность выдерживать без разрушения (без появления трещин и надрывов поверхности) испытание на осадку под действием деформируемого инструмента, имеющего плоскую рабочую поверхность. При этом усилие осадки и скорость деформирования должны быть постоянными. Такими испытаниями определяют как деформируемость металла, так и наличие поверхностных и внутренних дефектов.

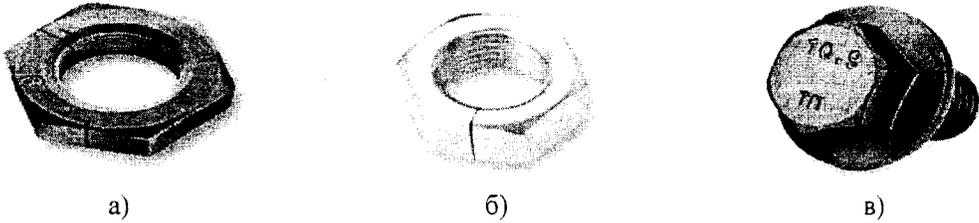
Испытание на осадку можно проводить как в холодном, так и в горячем состоянии металла. Обычно углеродистые стали для холодной высадки, содержащие примерно до 0,3 % углерода, подвергают осадке только в холодном состоянии. Испытание металла на осадку производят в соответствии с ГОСТ 8817-86.

При испытании на холодную осадку требующая деформация определяется видом, свойствами и назначением изготавливаемого изделия и зависит от марки, способа изготовления, состояния (горячекатаное, нагартованное, термически обработанное) и микроструктуры (наилучшей является зернистый перлит) испытываемого материала. Согласно ГОСТ 10702-2006, стали для холодной высадки по величине деформации при холодной осадке подразделяются на группы, которые обозначают следующим образом: до  $1/2h-50$  (где  $h$  – высота образца до осадки), до  $1/3h-66$  и до  $1/4h-75$ , а при контроле на образцах, подвергнутых сфероидизирующему отжигу и оболочке поверхности: до  $1/3h-66$  и до  $1/4h-75И$ . Наилучшая способность сталей к холодной высадке обеспечивается практически в том случае, если образец выдерживает испытание на осадку до  $1/3h$  или менее. Однако практически даже этого недостаточно, так как фактически, например, нормальная головка болта может быть получена только при высадке со степенью деформации до 80 %, что соответствует  $h_1=1,5h$  [3].

Кроме того, недостатком испытания на осадку является то, что полученные результаты будут не полностью характеризовать всю партию. Это объясняется невозможностью

контроля всего объема металла и неравномерным распределением дефектов по длине бунта (или прутка) при установленных стандартами нормах отбора образцов.

Наиболее часто встречающиеся дефекты на получаемых методами объемной штамповки крепежных изделиях, причинами которых являются дефекты исходного металлопроката, представлены на рисунке 1. К таким дефектам относятся: трещины, рванины, разрывы по граням шестигранных головок болтов и гаек, повреждения резьбы. Как было отмечено выше, основными причинами возникновения трещин (рисунок 1, а) и рванин (рисунок 1, б) при штамповке являются дефекты металлургического и прокатного производства.

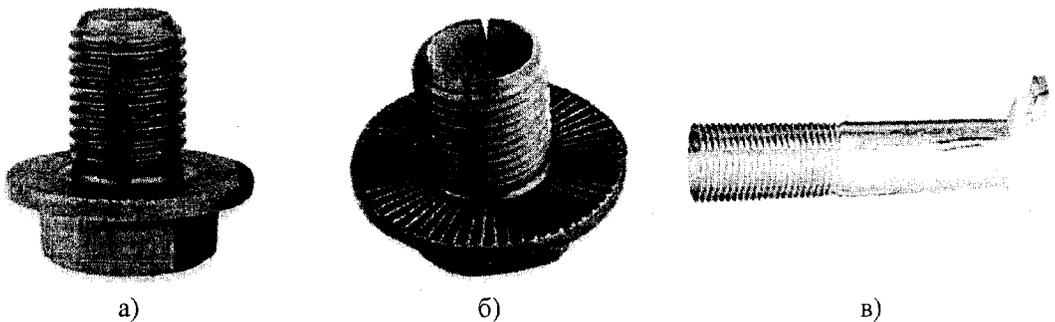


*Рисунок 1 – Дефекты крепежных изделий: а) трещины; б) рванины; в) разрывы*

При изготовлении болтов с шестигранной или другими формами головок (клеммные, закладные, стыковые болты) на гранях и углах головок могут появляться разрывы (рисунок 1, в), причиной которых также являются дефекты металлургического происхождения в исходном металлопрокате (газовые пузыри, неметаллические включения, видманштеттова структура).

При накатке резьбы образуются поверхностные дефекты, связанные как с механикой этого процесса, так и с дефектами исходного металлопроката. Профиль резьбы образуется, как правило, путем многократного и последовательного копирования профиля двух инструментов (подвижной и неподвижной плашек, ролика и сегмента), а также метчиков при образовании внутренних резьб. Формирование профиля резьбы происходит за счет перераспределения элементарных объемов металла заготовки, вытесняемого рабочими витками резьбообразующего инструмента. Задиры резьбы, вмятины, царапины могут образоваться в процессе накатки резьбы из-за повреждения накатного инструмента или во время различных манипуляций при транспортировании.

Наличие зон ликвации, выходящих на поверхность, волосовин, рисок, неметаллических включений или других внутренних дефектов металлургического происхождения приводит к разрушению детали при накатывании резьбы или при эксплуатации (рисунок 2, а, б).



*Рисунок 2 – Повреждения резьбы из-за дефектов в исходном металлопрокате: а) рванины или выкрашивания по профилю; б) разрушения при накатке и эксплуатации; в) трещины на головке и на стержне болта*

На одном предприятии при изготовления клеммных болтов из металлопроката группы осадки 50 холодной штамповкой наблюдалось повышенное количество бракованных изделий с трещинами на головках и стержнях болтов (рисунок 2, в).

Таким образом, в результате проведенного анализа было выявлено, что причиной появления брака крепежных изделий являются дефекты металлургического производства (раскатанные газовые пузыри, неметаллические включения, мелкие трещины горячей прокатки).

### **ВЫВОДЫ:**

1. В связи со значительными степенями деформации (до 87 %), возникающими при штамповке крепежных изделий, в исходном металлопрокате не должно быть дефектов металлургического и прокатного производства - неметаллических включений, рисков, газовых пузырей, флокенов, плен, закатов, видманштеттовой структуры и т.д., которые раскрываются при пластической деформации в виде трещин, рванин, разрывов и выкрашивания резьбы.

2. Горячекатаный прокат для производства крепежных изделий должен изготавливаться только с механической зачисткой. Огневая зачистка, приводящая к повышенному браку изделий по трещинам, не допускается.

3. Переработка металлопроката с металлургическими дефектами приводит к увеличению брака изделий и повышенному расходу коэффициента.

4. При поступлении металлопроката необходим качественный входной контроль макро- и микроструктуры, технических характеристик с целью выявления браковочных признаков и соответствия требованиям нормативно-технологической документации.

5. Устранение при изготовлении исходного металлопроката всех приведенных выше дефектов будет способствовать повышению качества и рентабельности крепежных изделий, а также сокращению расхода металла.

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).*

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Петриков, В.Г. Прогрессивные крепежные изделия [Текст] / В.Г. Петриков. – М.: Машиностроение. 1991 – 256 с.
2. ГОСТ Р ИСО 6157.1-2009 «Изделия крепежные. Дефекты поверхности. Часть 1. Болты, винты, шпильки общего назначения».
3. ГОСТ Р ИСО 16426-2009 «Изделия крепежные. Система обеспечения качества».
4. Лукша, О.Г. О причинах дефектов при производстве крепежа [Текст] / О.Г. Лукша // ШИГ. – 2001. - №5. – С. 12-14.

**Мария Константиновна Веретенникова**  
Студентка 5-го курса специальности «Управление качеством»  
ФГБОУ ВПО «Государственный университет-учебно-научно-производственный комплекс»

**Нина Владимировна Углова**  
Кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВПО «Государственный университет-учебно-научно-производственный комплекс»

M.K. VERETENNIKOVA, N.V. UGLOVA

## **QUALITY OF FIXING PRODUCTS AT MASS PRODUCTION**

*In article the factors influencing quality of fixing products are considered. Possible types of the defects arising by production of fixing products are presented. Actions on improvement of quality of fixing products at mass production are offered.*

**Keywords:** fixing products, production, quality, factors, defects.

BIBLIOGRAPHY

- [1] Petrikov, V.G. Century of. Progressive fixing products [Text] / V.G. Petrikov. – M: Mechanical engineering, 1991 - 256 p.
- [2] GOST R ISO 6157.1 – 2009 «Fasteners. Surface discontinuities. Part 1. Bolts, screws and studs for general requirements»
- [3] GOST R ISO 16426-2009 «Fasteners. Quality assurance system»
- [4] Luksha, O.G. About the reasons of defects by production of fixture [Text] / O.G. Luksha // ShIG. – 2001. - №5. – Pp. 12-14.

**Maria Konstantinovna Veretennikova**  
 Student of the 5th course of the specialty "Quality management"  
 FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel

**Nina Vladimirovna Uglova**  
 Candidate of Technical Sciences, assistant professor  
 FSBEI HVT «State University – ESPC», Orel

УДК 625.7.002.5:612.117.4

В.А. ДАНИЛОВ

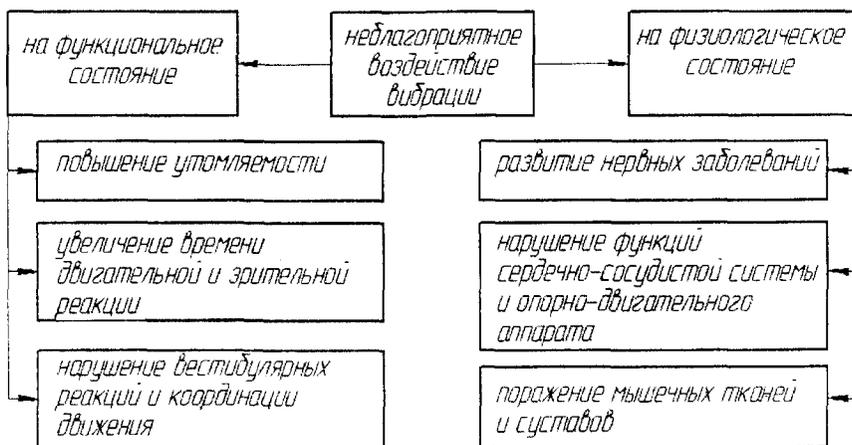
## НЕОБХОДИМОСТЬ СТАНДАРТИЗАЦИИ МИКРОПРОФИЛЯ ДОРОГИ ПРИ ОЦЕНКЕ ВИБРАЦИИ НА РАБОЧЕМ МЕСТЕ ОПЕРАТОРОВ СТРОИТЕЛЬНОЙ И ДОРОЖНОЙ ТЕХНИКИ

*В данной работе решается значимость вопроса необходимости проведения измерений низкочастотной вибрации на рабочем месте оператора с последующим приведением этих значений к параметрам типового микропрофиля.*

**Ключевые слова:** *вибрация, оператор, виброзащита, микропрофиль.*

Современное развитие строительной и дорожной техники, рост мощностных и динамических показателей, непрерывное повышение скоростей движения машин сопровождается повышением вредного воздействия вибраций на организм человека.

Вибрация оказывает на человека-оператора вредное воздействие, которое негативно сказывается на его здоровье, производительности труда и других условиях трудовой и социальной жизни человека. Из-за воздействия вибрации могут проявляться физические и нервно-эмоциональные нагрузки, опасность проявления профессиональных болезней и даже риска травматизма рисунке 1 [1].



**Рисунок 1 – Схема классификации вредного воздействия вибрации на организм человека и симптомы его функциональных и физических нарушений**

Наиболее серьезное воздействие оказывает низкочастотная вибрация. Это обусловлено тем, что тело человека и его внутренние органы обладают собственными частотами, определяемыми диапазоном 0,7...30 Гц [3,6]. При совпадении частоты возбуждения системы с ее собственной частотой возникает явление резонанса, при котором амплитуда колебаний резко возрастает. Входящие в резонанс органы нередко вызывают болезненные ощущения, связанные, в частности, с растягиванием соединительных образований, поддерживающих вибрирующий орган. Сила резонансных колебаний способна вызвать смещение внутренних органов по отношению к обычному положению [4].

Воздействие вибрации на человека столь широко и имеет такие негативные последствия, что это послужило основанием для выделения вибрационной болезни в качестве самостоятельного заболевания. Симптомы вибрационной болезни многообразны и проявляются в нарушении работы сердечно-сосудистой и нервной систем, поражении мышечных тканей и суставов, нарушении функций опорно-двигательного аппарата.

Профилактика вибрационной болезни включает ряд мероприятий технического, санитарно-гигиенического и лечебно-профилактического характера. В профилактике вредного действия вибрации ведущая роль принадлежит техническим мероприятиям.

При эксплуатации строительных и дорожных машин (СДМ) водители подвергаются комплексу вредных факторов, из которых вибрация рабочего места является лимитирующим фактором, определяющим производительность и безопасность оператора.

Поэтому в настоящее время проблема надежной защиты рабочих мест от воздействия вибраций является весьма актуальной, которая может быть решена путем создания новых, более эффективных систем виброзащиты человека-оператора.

При разработке виброзащитных устройств исследователи сталкиваются с проблемой оценки их эффективности. Возникает необходимость производить измерения уровней вибрации в процессе движения машины по дороге [2].

В этом случае решающим показателем, сказывающимся на уровне вибрации, являются микро и макронеровности дорожного покрытия по базе и колее машины. Вследствие произвольного выбора участка дороги, очевидно, что результаты измерений, полученные при проезде машины, не обладают объективностью, сходимостью и воспроизводимостью данных. Следовательно, необходимо проводить измерения в хорошо воспроизводимых условиях, а это в свою очередь возможно в случае «жесткой» стандартизации микропрофиля, либо в случае приведения величины неровностей фактического покрытия к типовому.

Для сельскохозяйственных тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин институтом НАТИ разработана методика определения среднеквадратических значений ускорений в вертикальном направлении с учетом параметров типового микропрофиля при движении МТА по грунтовой дороге и агрофону [5].

Согласно этой методике для колесных тракторов общего назначения среднеквадратические значения ускорений ( $\text{м/с}^2$ ) в диапазоне частот 0,88 – 11,2 Гц, приводят к типовым условиям по формуле:

$$\sigma = \sigma' \frac{\sigma_m}{\sigma_\phi},$$

где  $\sigma'$  – среднеквадратическое значение ускорения при проезде машины по дорожному участку,  $\text{м/с}^2$ ;

$\sigma_m$  – среднеквадратическое значение функции высоты неровностей типового микропрофиля агрофона или дороги, см;

$\sigma_\phi$  – среднеквадратическое значение функции высоты неровностей микропрофиля агрофона или дороги при испытаниях, см.

В методах определения вибрации по ГОСТ 12.1.049 – 86 и 12.1.012 –2004 операция приведения к типовому микропрофилю отсутствует и это связано, в первую очередь с

трудоемкостью и длительностью процесса проведения и обработки измерений. Как результат, эти методы не дают объективных оценок качества машины и требуют уточнения.

При детальном изучении технологических карт СДМ установлено, что 40-60 % рабочего времени техника задействована в транспортном режиме передвигаясь по дорогам от одного объекта до другого, а это значит, что аналогично оператору сельскохозяйственной техники, оператор СДМ подвержен значительному влиянию именно транспортной вибрации и нуждается в обеспечении виброзащиты на рабочем месте.

Схожесть поставленной задачи позволяет рекомендовать методику по стандартизации микропрофиля дорог для строительной и дорожной техники. Предполагается определить величину типового микропрофиля асфальтовой и бетонной дороги и в дальнейшем использовать операцию приведения для любого дорожного полотна.

Апробация методики по определению типового микропрофиля проведена для дорог Орловской области. С этой целью были выбраны зачетные участки дорог разных направлений: «Орел – Кромы», «Орел – Лаврово», «Орел – Нарышкино» для которых была проведена оценка среднеквадратических значений высот неровностей в 4 диапазонах частот, с последующим усреднением. Данные, характеризующие показатели неровностей дорожного покрытия в Орловской области представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры типового микропрофиля дорог Орловской области

Наименование типového микропрофиля	Среднеквадратическое значение функции высоты неровностей типového микропрофиля, см; для диапазона частот – Гц			
	0,88 – 1,4	1,4 – 2,8	2,8 – 5,6	5,6 – 11,2
Асфальтированная дорога	<b>0,48</b>	<b>0,44</b>	<b>0,23</b>	<b>0,29</b>
Бетонная дорога	<b>1,14</b>	<b>1,29</b>	<b>1,76</b>	<b>7,49</b>

Очевидно, используя значения функции высоты неровностей типового микропрофиля, полученные экспериментальным путем, возможно учитывать особенности неровностей дорожного покрытия и определять уровни возмущений на сидении оператора при проезде машины по любому дорожному полотну с последующим перерасчетом величин неровностей фактической дороги к типовым. Результаты измерений в этом случае будут весьма объективны и обладают высокой степенью сходимости.

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артамонова, В.Г. Вибрация, шум и здоровье человека [Текст] / В.Г. Артамонова. – Л.: Медицина, 1988. – 156 с.
2. Ванин, В.С. Виброзащитная система рабочего места оператора [Текст] / В.С. Ванин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 1983. - №11.
3. Глушко, О.В. Труд и здоровье водителя [Текст] / О.В. Глушко. - М.: Транспорт, 1976. – 176 с.
4. Комкин, А.И. Вибрация. Воздействие, нормирование, защита [Текст] / А.И. Комкин // Безопасность жизнедеятельности. – 2004. - №5. – С. 3-4.
5. Межотраслевая методика испытаний тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин по оценке уровня низкочастотной вибрации на рабочем месте механизатора [Текст] // ГОНТИ НАТИ. – М., 1980. – 27 с.
6. Нурбаев, С.К. Гигиеническая характеристика и меры борьбы с низкочастотной вибрацией рабочих мест водителей машин [Текст] / С.К. Нурбаев // Кн. Гигиена труда, патология и токсикология. - НИИ краевой патологии, Алма-Атинский государственный медицинский институт. Алма-Ата, т.XLVI, 1982. – С.22-29.

**Виталий Александрович Данилов**

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет–УНПК»

Аспирант кафедры «Машины и аппараты пищевых производств»

Тел. +79192687390

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

---

V.A. DANILOV

## **THE NEED TO STANDARDIZE MICROPROFILE ROADS FOR EVALUATION OF VIBRATION ON OPERATOR CONSTRUCTION AND ROAD MACHINERY**

*In this given job the question of need of carrying out measurements of low-frequency vibration on a workplace of the operator is solved with the subsequent reduction of these values to parameters of a standard microprofile.*

**Key words:** vibration, operator, vibroprotection, microprofile.

### **BIBLIOGRAPHY**

- [1] Artamonova, V.G. Vibration, noise and human health [Text] / V.G. Artamonova. – Leningrad: Medicine, 1988. – 156 p.
- [2] Vanin, V.S. Protecting from the vibrations the system operator's workplace [Text] / V.S. Vanin // Mechanization and electrification of agriculture. – 1983. – №11.
- [3] Glushko, O.V. Labor and health operator [Text] / O.V. Glushko / M.: Transport. – 1976. – 176 p.
- [4] Komkin, A.I. Vibration. Impact, regulation and protection [Text] / A.I. Komkin // Safety of life. – 2004. - №5. – Pp. 3-4.
- [5] Intersectoral test procedure tractors and self-propelled agricultural machines to assess the level of low-frequency vibration in the workplace of machine [Text] // National Automotive Institute – Moscow, 1980. – 27 p.
- [6] Nurbaev, C.K. Hygienic characteristic and measures of fight against low-frequency vibration of workplaces of operators of machines [Text] / C.K. Nurbaev // Occupational health, pathology and toxicology. / Institute regional pathology, Alma-Ata State Medical Institute. Vol. XLVI, 1982. – Pp. 22-29.

**Vitaly Aleksandrovich Danilov**

FBSEI HVT «State University–ESPC»

Post-graduate student of the department of «Machinery and equipment for food industries»

Phone: +79192687390

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

---

УДК 669.01:530.1:539.4

**С.В. КУРЫНЦЕВ, А.В. БЕЛЯЕВ, Э.Р. ГАЛИМОВ**

## **ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОЙ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ**

*В статье рассматривается возможность применения методики мультифрактальной параметризации с использованием характеристик однородности и упорядоченности микроструктуры для оценки механических свойств металлических материалов.*

**Ключевые слова:** стали, алюминиевые сплавы, механические свойства, микроструктура, мультифрактальная параметризация.

Для оценки надежности и долговечности изделий и конструкций в процессе эксплуатации возникает необходимость определения структурного состояния и механических

свойств материалов. Комплексную оценку структуры и прочностных свойств металлов и сплавов осуществляют традиционными методами металлографии и физико-механических испытаний с использованием разрушающих и неразрушающих методов исследований. Однако металлографические исследования и механические испытания требуют проведения длительных и трудоемких операций, связанных с подготовкой и испытаний образцов. Эта задача усложняется при оценке механических свойств материалов с использованием разрушающих методов испытаний, что не всегда возможно и целесообразно в условиях непрерывного функционирования промышленного оборудования.

Одним из перспективных направлений, позволяющим реализовать оценку микро-структуры и механических свойств материалов является применение методологии мультифрактальной параметризации (МФП), разработанной Г.В. Встовским [1]. Сущность метода МФП заключается в математической обработке программой MFRDrom оцифрованных металлографических изображений макро- или микроструктуры материалов.

В данной работе в качестве объектов исследования были выбраны следующие типы материалов: порошковые стали с различной плотностью ПК10, ПК40, жаропрочная сталь аустенитного класса 10X11H20T2P и алюминиевый сплав Д16. Выбор объектов исследования обусловлен их высокими технологическими и эксплуатационными свойствами, широким применением в современной технике и стремлением установить особенности и общие закономерности при оценке структурного состояния и механических свойств различных классов материалов с использованием метода МФП.

Металлографические изображения структуры образцов получали с использованием автоматической установки для шлифования и полирования. Для выявления границ зерен порошковых сталей использовали пикриновую кислоту и раствор хлорного железа в соляной кислоте; для стали 10X11H20T2P - реактив Крупа, а для сплава Д16 - раствор едкой щелочи. Для фиксации изображения применяли: стационарный микроскоп с увеличением до 500 крат со встроенной цифровой камерой AxioCamHR для захвата фото и видео, персональный компьютер с программным обеспечением. Предварительная подготовка изучаемых изображений структур заключалась в обработке цифровых изображений с использованием компьютерной графики – программы Adobe Photoshop версии 7.0. Для этого из полученных с цифровой камеры фотографий в формате «Jpeg» вырезались 6 областей симметрично относительно исходного изображения, преобразовывались в битовый формат «BMP» с максимальной контрастностью 100 % и разрешением изображения 300 пикселей на дюйм методом диффузии. Обработка серии структур заключалась в их загрузке в программу MFRDrom, выборе типа спектра (Canon или Pseudo), количества знаков после запятой, основного цвета структуры, площади покрытия (100 %). Точность прогноза составляла порядка 97 %.

Для оценки механических свойств порошковых сталей использовали величину предела прочности при растяжении; для стали аустенитного класса - метод определения твердости по Виккерсу, а для алюминиевого сплава - твердости по Бринеллю.

В качестве основных мультифрактальных параметров были выбраны характеристики упорядоченности  $\Delta_q = D_1 - D_q$  и однородности  $F_q$ , которые вычислялись с помощью программы MFRDrom путём перебора расчетного математического параметра  $q$ , характеризующего упорядоченность насыщения [2].

Для выявления зависимостей: мультифрактальные характеристики – механические свойства были проведены комплексные экспериментальные исследования.

Для порошковых сталей одной из важнейшей задач является оценка прочностных характеристик по мультифрактальным параметрам микроструктуры с учетом их пористости. В связи с этим поиск закономерностей, связывающих мультифрактальные и прочностные характеристики, проводился для сплавов различной плотности –  $6,0 - 7,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . Для исследований было подготовлено 112 образцов, из которых 84 использовались для испытаний на предел прочности при растяжении ( $\sigma_b$ ), а 28 для металлографических исследований и мультифрактального анализа. При сопоставлении данных мультифрактальной параметризации и механических испытаний получены зависимости, связывающие упорядоченность  $\Delta_q$  и предел

прочности (рисунок 1) Наилучшие результаты полиномиальной аппроксимации кривыми второго порядка удалось получить для  $\rho = 7,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

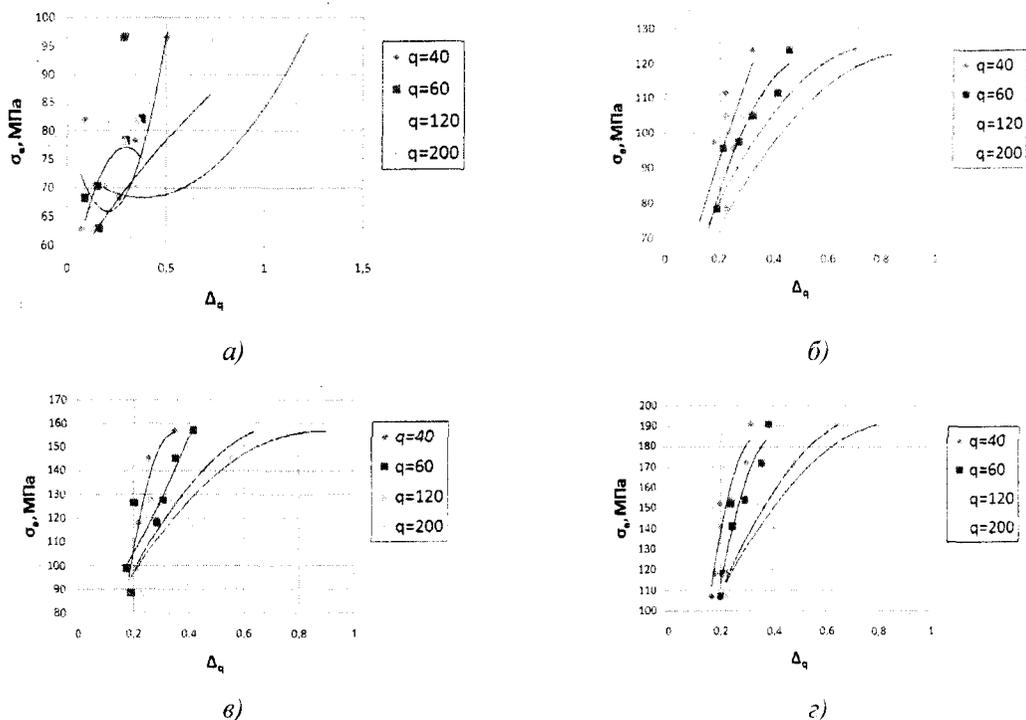


Рисунок 1 - Взаимосвязь предела прочности  $\sigma_v$  и упорядоченности  $\Delta_q$  микроструктуры углеродистых порошковых сплавов на основе железа различной плотности (а –  $\rho = 6,0 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ , б –  $\rho = 6,4 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ , в –  $\rho = 6,8 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ , з –  $\rho = 7,2 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ )

В результате установлены взаимосвязи между пределом прочности  $\sigma_v$  сплавов ПК10 – ПК40 и параметром упорядоченности  $\Delta_q$  их микроструктуры. Каждой взаимосвязи между мультифрактальными параметрами и механическими свойствами порошковых сталей соответствуют определенные условия получения изображений микроструктуры, при которых данная взаимосвязь проявляется более конкретно.

Производились исследования связи мультифрактальных характеристик жаропрочной аустенитной стали 10X11H20T2P с такими параметрами структуры, как балл зерна, наличие шлаковых включений, пористости, трещин в основном металле и в сварных швах.

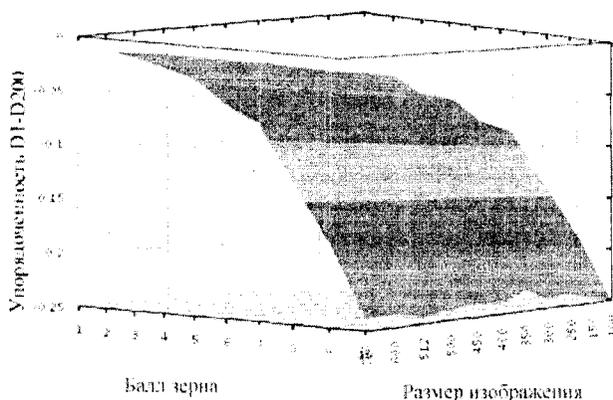


Рисунок 2 - Зависимость упорядоченности от размера изображения

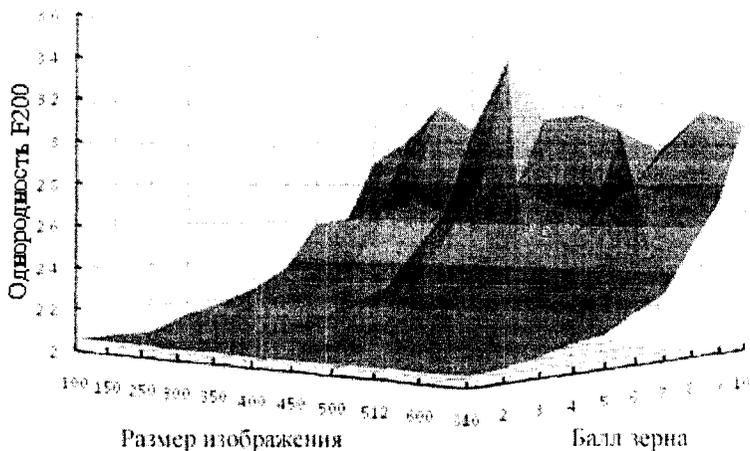


Рисунок 3 - Зависимость однородности от размера изображения

Экспериментальные данные, приведенные в качестве примера на рисунках 2 и 3, позволяют установить зависимость однородности и упорядоченности структуры при малых (100 - 150 пикселей/дюйм) и при больших разрешениях изображений (600 - 800 пикселей/дюйм). Указанные зависимости установлены на основной шкале 1 для определения балла зерна (1-10) при увеличении  $\times 100$ . Однородность и упорядоченность структур балла «0» при увеличении  $\times 50$  соответствуют параметрам балла «-1» при увеличении  $\times 25$  и т.д. в соответствии с ГОСТ.

Из представленных данных видно, что существует достаточно четкая корреляция между баллом зерна и параметрами однородности и упорядоченности, что позволяет в автоматизированном режиме определять его методом параметризации структур взамен визуальной оценки. Однако на точность анализа будет влиять наличие пор, шлаковых включений, трещин в основном металле и сварных швах. Установлено, что размер изображения оказывает влияние лишь при высоких баллах зерна анализируемой стали.

Изменение параметров однородности  $F_{200}$  и упорядоченности  $D_1 - D_{200}$  в зависимости от количества пор при их равном размере, влияние размера пор и длины трещин в пикселях при постоянной ширине. Данные зависимости построены с использованием цифровых снимков (512 $\times$ 512 пикселей) микроструктур аустенитной стали путем имитации дефектов. В программе MFRDrom для анализа изображений за цвет основы (Picture to Relief) аустенитного зерна принят белый (WhiteMaxColor), qMax = 200, SquarePart = 1.000, однородность и упорядоченность выбраны по значениям Pseudo.

Установлено, что на однородность и упорядоченность влияют балл зерна, размер и количество пор, шлаковых включений и трещин, следы от механической обработки. Определено влияние характера подготовки металлографической поверхности и дефектов структуры на результаты параметризации. Показано, что на результаты автоматизированного анализа металлографических структур решающее значение оказывают степень протравленности границ зерен, размер изображения и разрешение структуры, а также увеличение микроскопа.

Исследования связи параметров однородности и упорядоченности с механическими свойствами алюминиевого сплава Д16 проводились на образцах, подвергнутых искусственному старению при фиксированных температурах: 50 $^{\circ}$ C в воде, 100 $^{\circ}$ C в воде и 250 $^{\circ}$ C в селитре. Для проведения экспериментальных исследований было подготовлено и обработано 18 образцов, по 6 образцов на каждый режим старения. Из них было выбрано по 3 образца разных режимов старения с последующим определением твердости. После травления 10 % раствором едкой щелочи фотографировались. Фотосъемка каждого образца выполнялась при увеличениях  $\times 50$ ,  $\times 100$ ,  $\times 200$  и  $\times 500$ . Механической характеристикой была выбрана твердость по Бринеллю. В качестве примера на рисунке 4 представлены зависимости твердости от времени и

среды старения. Замеры твердости проводились в течение двадцати пяти минут через различные промежутки времени. По результатам измерений были построены зависимости значений твердости от времени и режимов старения. При исследовании значений упорядоченности  $D_1 - D_{200}$  и однородности  $F_{200}$  использовалось увеличение  $\times 100$  и расчетный параметр  $q = \{200\}$ .

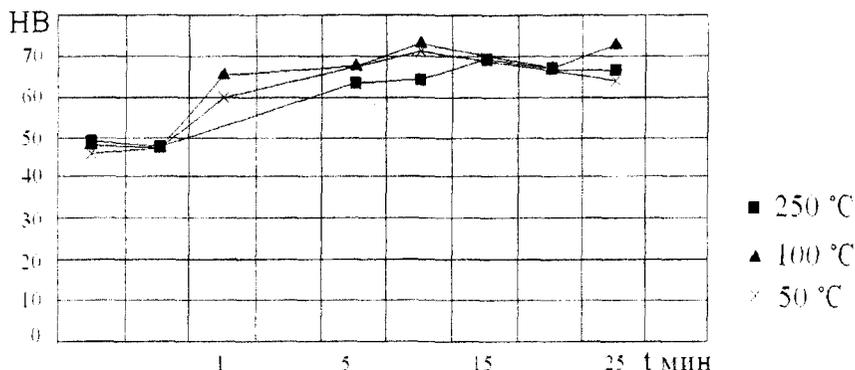


Рисунок 4 - Изменения показателей твердости в зависимости от времени и режимов старения

Результаты исследований, представленные на рисунке 5 позволяют визуально выявить элементарные составляющие изображений в виде пор и зерен, размеры которых меняются при различных режимах старения.

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет сделать заключение, что мультифрактальные параметры сплава Д16 являются наименее чувствительными к изменению увеличения и упорядоченности насыщения, что свидетельствует о наименьшей погрешности полученных данных. В качестве примера в таблице приведены показатели однородности и упорядоченности в абсолютных величинах, соответствующие различным значениям твердости.

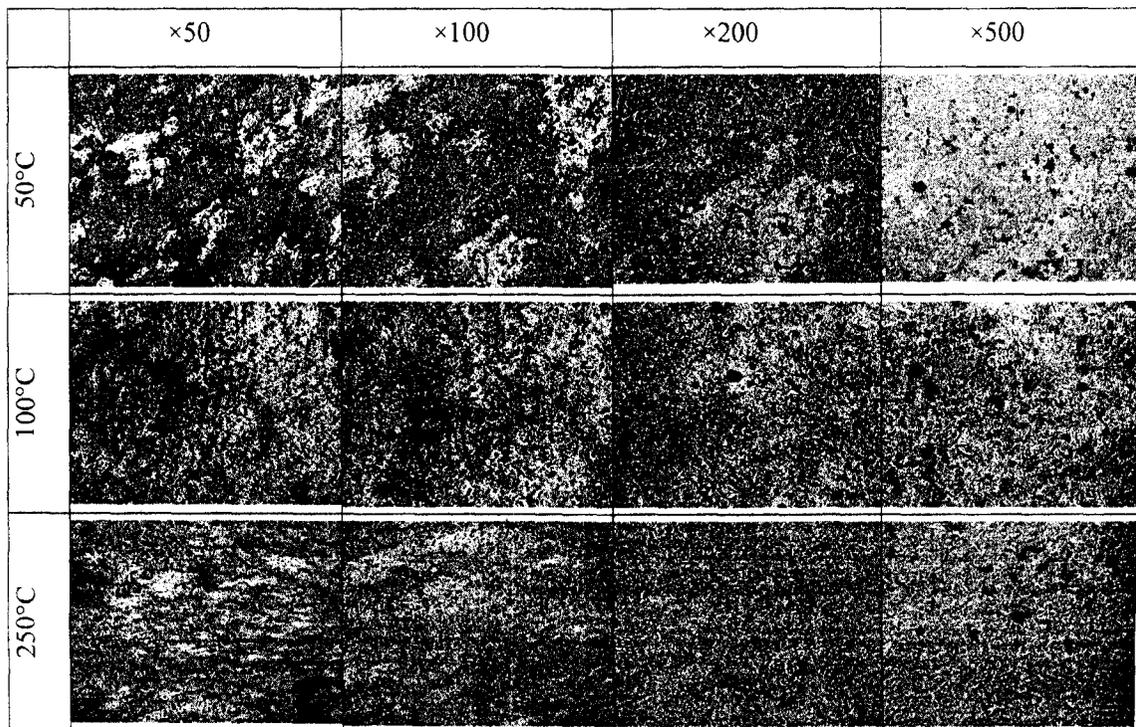


Рисунок 5 - Микроструктура сплава Д16, при различных увеличениях

Таблица - Показатели однородности и упорядоченности в абсолютных величинах соответствующие, различным значениям твердости

НВ	63	64	64	65	66	67	71	72	74
$D_1 - D_{200}$	0,049	0,062	0,055	0,054	0,075	0,084	0,08	0,092	0,099
$F_{200}$	0,849	0,635	0,765	0,397	0,445	0,301	0,706	0,549	0,392

### **ВЫВОДЫ**

Обобщая полученные экспериментальные данные можно сделать заключение, что использование методики мультифрактальной параметризации для установления взаимосвязи структурного состояния и механических свойств различных классов металлических материалов имеет ряд преимуществ перед классическими методами испытаний. С использованием программы MFRDrom проводится обработка оцифрованных металлографических изображений с последующей количественной и качественной оценкой полученных изображений.

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).*

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Встовский, Г.В. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов [Текст] / Г.В. Встовский, А.Г. Колмаков, И.Ж. Бунин. - Ижевск.: Научно-издательский центр "Регулярная и хаотическая динамика", 2001. - 116 с.
2. Галимов, Э.Р. Влияние подготовки изображений на результаты параметризации структур сварных соединений из сталей аустенитного класса [Текст] / Э.Р. Галимов [и др.] // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева, Казань. - 2011. - №3. - С. 18-21.
3. Фридляндер, И.Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы [Текст] / И.Н. Фридляндер. - М.: Металлургия, 1979. - 208 с.
4. Анваров, А.Д. Возможность идентификации механических свойств металла оборудования химических производств при экспертизе промышленной безопасности на базе метода мультифрактальной параметризации [Текст] / А.Д. Анваров [и др.] // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева, Казань. - 2006. - №1. - С.77-82.
5. Галимов, Э.Р. Использование мультифрактальной параметризации в задачах металлургии порошковых сталей [Текст] / Э.Р. Галимов, А.Г. Кудрин, А.С. Маминов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. СПб. - 2009. - № 4-2. - С. 26-30.

**Сергей Вячеславович Курынцев**  
Кандидат экономических наук,  
доцент  
ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ»  
Тел: (843) 238-44-10, (987) 290-19-53  
E-mail: [kuryntsev16@mail.ru](mailto:kuryntsev16@mail.ru)

**Беляев Алексей Витальевич**  
Ассистент  
ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ»  
Тел: (843) 238-44-10, (843) 521-40-15  
E-mail: [alexey-beljaev@mail.ru](mailto:alexey-beljaev@mail.ru)

**Галимов Энгель Рафикович**  
Доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ»  
Тел: (843) 238-44-10  
E-mail: [kstu-material@mail.ru](mailto:kstu-material@mail.ru)

S.V. KURYNTSEV, A.V. BELYAEV, E.R. GALIMOV

## **APPLICATION OF MULTIFRACTAL PARAMETERIZATION FOR EVALUATION OF STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF METALS**

*The possibility of using the technique multifractal parameterization using the characteristics of uniformity and regularity of the microstructure for evaluation of mechanical properties of metallic materials.*

**Key words:** *steel, aluminum alloys, mechanical properties, microstructure, multifractal parameterization*

## BIBLIOGRAPHY

- [1] Vstovskii, G.V. Introduction to the multifractal parametrization of structures of materials [Text] / G.V. Vstovskii, A.G. Kolmakov, I.Zh. Bunin. - Izhevsk.: Research and Publishing Center "Regular and Chaotic Dynamics", 2001. - 116 p.
- [2] Galimov, E.R. Effect of training images on the results of the parameterization of the structures of welded joints of austenitic steels [Text] / E.R. Galimov // Journal of KSTU. AN Tupolev. - Kazan. – 2011. - № 3. - Pp. 18-21.
- [3] Fridlyander, I.N. Wrought aluminum alloy construction [Text] / I.N. Fridlyander. – Moscow: Metallurgy, 1979. - 208 p.
- [4] Anvarov, A.D. Ability to identify the mechanical properties of metal equipment of chemical production in the examination of industrial safety on the basis of the method of multifractal parameterization [Text] / A.D. Anvarov // Bulletin of KSTU. AN Tupolev. - Kazan. – 2006. - № 1. – Pp. 77-82.
- [5] Galimov, E.R. Using multifractal parameterization in the problems of powder metallurgy steels [Text] / E.R. Galimov, A. Kudrin, A. Maminov // Scientific and technical statements STU. St. Petersburg. - 2009. - № 4-2. - Pp. 26-30.

**Sergey V. Kuryntsev**  
Candidate of Economic Sciences,  
Associate Professor  
FSBIHE "Kazan National Research  
Technical University. AN Tupolev -  
KAI "  
Tel: (843) 238-44-10, (987) 290-19-  
53  
E-mail: [kuryntsev16@mail.ru](mailto:kuryntsev16@mail.ru)

**Aleksei V. Belyaev**  
Assistant  
FSBIHE "Kazan National  
Research  
Technical University. AN  
Tupolev - KAI "  
Tel: (843) 238-44-10, (843) 521-40-  
15  
E-mail: [alexey-beljaev@mail.ru](mailto:alexey-beljaev@mail.ru)

**Engel R. Galimov**  
Doctor of Technical Sciences,  
Professor  
FSBIHE "Kazan National  
Research Technical  
University. AN Tupolev -  
KAI "  
Tel: (843) 238-44-10,  
E-mail: [kstu-material@mail.ru](mailto:kstu-material@mail.ru)

УДК 371.261

А.В. КИРИЧЕК, А.В. МОРОЗОВА

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОЦЕНИВАНИЯ УРОВНЯ  
СФОРМИРОВАННОСТИ КЛАСТЕРОВ КОМПЕТЕНЦИЙ  
СПЕЦИАЛИСТА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОФИЛЯ**

*В статье описывается ряд моделей оценивания уровня сформированности кластеров компетенций молодого специалиста в рамках реализации федерального государственного образовательного стандарта нового поколения для специальностей технического профиля с учетом компетентностной модели системы европейских стандартов инженерного образования и требований европейской системы аккредитации инженерных программ EUR-ACE.*

*Ключевые слова:* специалист, компетенция, федеральный государственный образовательный стандарт.

**ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Первый модуль модели оценивания качества подготовки специалиста в соответствии с ФГОС нового поколения, требующей реализации схемы: **ОЦЕНКА УСВОЕНИЯ СИСТЕМЫ ДИДАКТИЧЕСКИХ ЕДИНИЦ → ОЦЕНКА УСВОЕНИЯ УЧЕБНЫХ ДИСЦИПЛИН → ОЦЕНКА УРОВНЯ СФОРМИРОВАННОСТИ КОМПЕТЕНЦИИ → ОЦЕНКА УРОВНЯ СФОРМИРОВАННОСТИ СОЦИАЛЬНО-ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ КОМПЕТЕНТНОСТИ СПЕЦИАЛИСТА** [1, 2] позволяет оценить уровень каждой компетенции выпускника профессиональной школы в соответствии с ООП направления подготовки [1, 3]. Такая модель основывается на формализации информационных пространств, определенных федеральными государственными образовательными стандартами нового поколения, путем построения аксиоматического базиса квалиметрической многомерной модели социально-профессиональной компетентности специалиста [2].

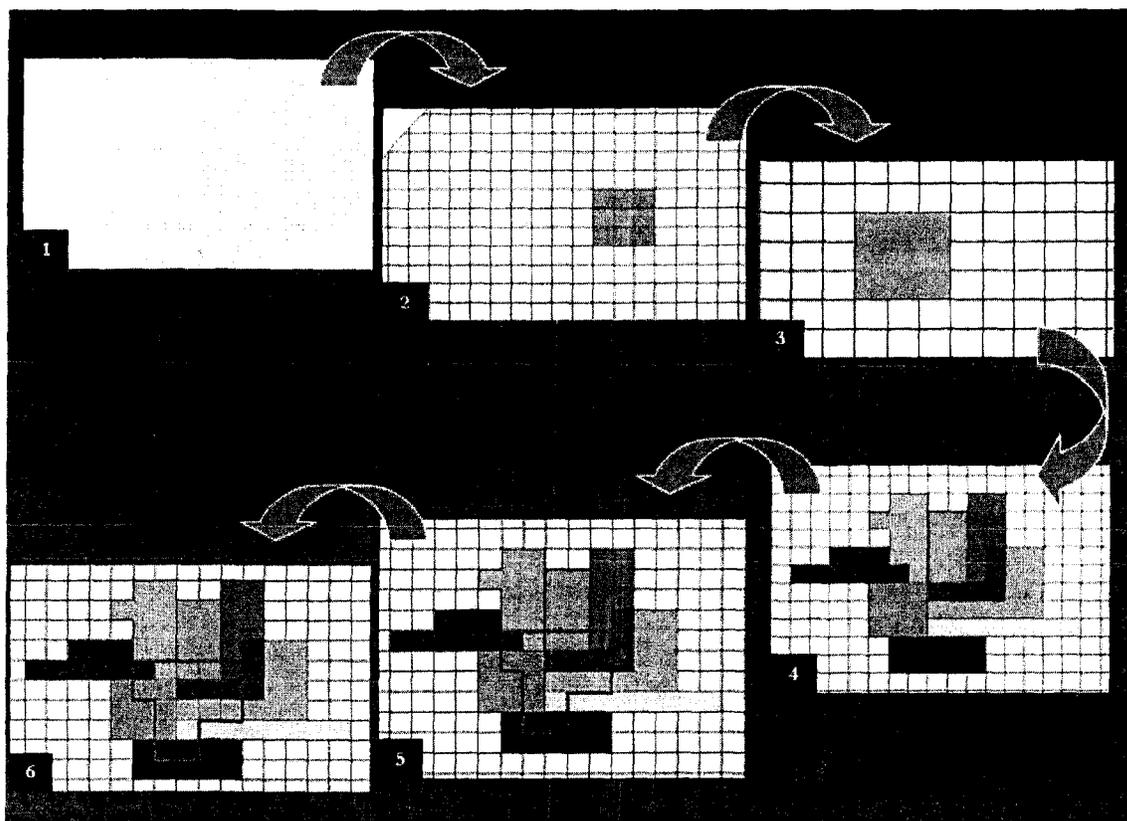
Дальнейшая разработка модели оценивания качества подготовки специалиста реализует этап перехода от оценивания отдельных компетенций специалиста к модели их кластеризации с учетом компетентностной модели системы европейских стандартов инженерного образования и требований европейской системы аккредитации инженерных программ EUR-ACE.

**АКТУАЛЬНОСТЬ И НОВИЗНА**

Пусть  $p$ -ый объект обладает множеством знаний, полученных в результате освоения системы дидактических единиц  $D_i, i = \overline{1:n}$ , и отображается в  $n$ -мерном информационном пространстве  $N$  точкой  $N_p(q_{p1}; q_{p2}; \dots; q_{pr}; \dots; q_{pn})$ . Тогда совокупный уровень освоения учебной дисциплины  $A_j, j = \overline{1:m}$ , определяется подмножеством дидактических единиц  $D_{jk} \subset \{D_i\}, i = \overline{1:n}, g = \overline{1:t}$ .

В рамках ООП по направлению подготовки специалистов разрабатывается компетентностная модель выпускника, которая определяется матрицей соответствия составных частей ООП (реализуемых учебных дисциплин) и системы компетенций, формируемых в рамках освоения ООП. Если совокупность дидактических единиц  $D_{jk}, g = \overline{1:t}$ , определяет уровень усвоения учебной дисциплины  $A_j, j = \overline{1:m}$ , то каждая компетенция  $B_k, k = \overline{1:l}$ , формируется как интегративное информационное подпространство, на которое оказывают

воздействие несколько учебных дисциплин, причем каждая учебная дисциплина оказывает различный уровень воздействия. Этот процесс можно условно интерпретировать с помощью модели, представленной на рисунке 1.



*Рисунок 1 – Модель формирования компетенции специалиста  $B_k$  посредством долевого влияния уровней освоения подмножества учебных дисциплин  $A_j$  ООП, формируемых на базе информационных пространств подмножества дидактических единиц  $D_j$*

Если в формировании компетенции  $B_k$  участвует подмножество учебных дисциплин  $A_j$ ,  $j' = \overline{1:m'}$ , то для  $p$ -го объекта можно определить уровень сформированности  $H_{pk}$  компетенции  $B_k$ .

При этом, имея числовую характеристику  $H_{pk}$  уровня сформированности компетенции  $B_k$ , а также значения порогового  $H_k^{\min}$ , продвинутого  $H_k^v$  и высокого  $H_k^*$  уровней ее сформированности, можно составить геометрическую интерпретацию, которая имеет вид линейной модели.

Если рассматривать всю совокупность компетенций  $B_k$ ,  $k = \overline{1:l}$ , определяемую ООП, то для ее геометрической интерпретации целесообразно использовать плоскостную модель в форме лепестковой диаграммы, которую можно интерпретировать как «полная компетенциограмма» (рисунок 2).

Сравнительный анализ компетентностной модели специалиста, построенной в рамках ФГОС ВПО направлений подготовки специалистов технического профиля, и компетентностной модели системы европейских стандартов инженерного образования, а также требований европейской системы аккредитации инженерных программ EUR-ACE позволяет сделать вы-

вод о целесообразности формирования вторичной группировки компетенций в систему компетентностных кластеров  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$  «Знания и понимание», «Инженерный анализ», «Инженерное проектирование», «Инженерная практика», «Исследования» и «Личностные навыки».

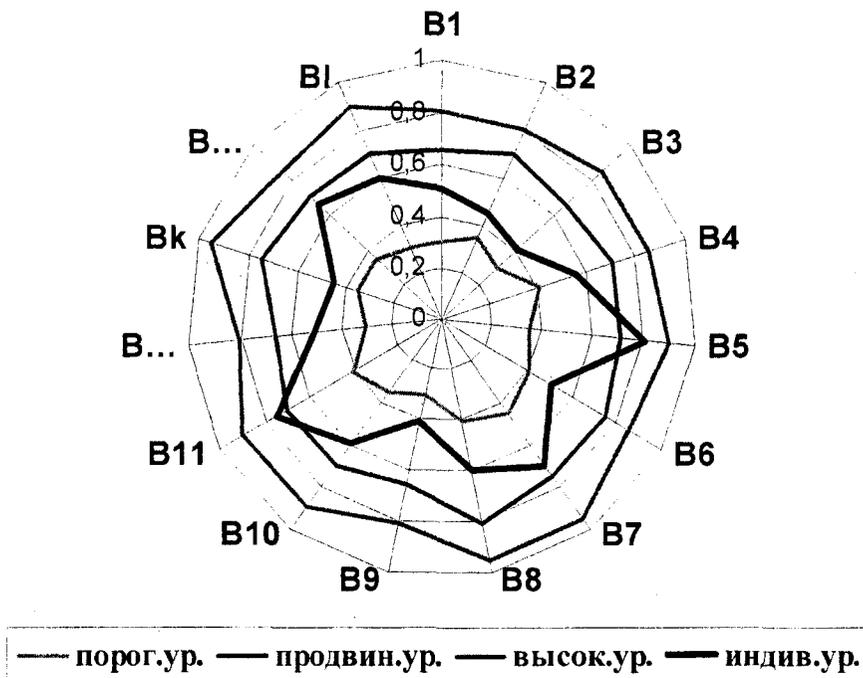


Рисунок 2 – Полная компетенциограмма специалиста (образец) – плоскостная уровневая модель системы компетенций специалиста

Принципиально важным является тот факт, что каждая компетенция  $B_k$  оказывает различное влияние на каждый компетентностный кластер  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ , в формировании которого она участвует. Таким образом, становится актуальным введение системы коэффициентов  $\gamma_{ki}$ , которые характеризуют уровень влияния компетенции  $B_k$  при формировании компетентностного кластера  $K_i, i = 1, \dots, 6$ , специалиста, причем целесообразно использовать такие значения  $\gamma_{ki}$ , что  $0 \leq \gamma_{ki} \leq 1$  и  $\sum_{k=1}^l \gamma_{ki} = 1$ .

Если в формировании компетентностного кластера  $K_i$ , где участвует подмножество компетенций  $B_{k'}, k' = \overline{1:l'}$ , то для  $p$ -го объекта уровень сформированности  $T_{pi}$  компетентностного кластера  $K_i$  можно охарактеризовать несколькими показателями:

- по уровню достижения максимального значения среди всех имеющихся уровней сформированности компетенций  $B_{k'} \subset \{B_k\}, k = \overline{1:l}, k' = \overline{1:l'}$  и оказывающих влияние на уровень сформированности компетентностного кластера  $K_i, i = 1, \dots, 6$ , т.е.:

$$T_{pi} = \max\{H_{pk'}; k' = \overline{1:l'}\} \quad (1)$$

- по уровню достижения минимального значения среди всех имеющихся уровней сформированности компетенций  $B_k \subset \{B_k\}, k = \overline{1:l}, k' = \overline{1:l'}$  и оказывающих влияние на уровень сформированности компетентностного кластера  $K_i, i = 1, \dots, 6$ , т.е.:

$$T_{pi} = \min\{H_{pk'i}; k' = \overline{1:6}\} \quad (2)$$

- по уровню достижения среднего значения среди всех имеющихся уровней сформированности компетенций  $B_k \subset \{B_k\}, k = \overline{1:l}, k' = \overline{1:l'}$  и оказывающих влияние на уровень сформированности компетентностного кластера  $K_i, i = 1, \dots, 6$ , т.е.:

$$T_{pi} = \frac{\sum_{k'=1}^{l'} \gamma_{k'i} \cdot H_{pk'i}}{k'} \quad (3)$$

Кроме того, для каждой компетентностного кластера  $K_i, i = 1, \dots, 6$ , в соответствии с ООП можно установить несколько уровней сформированности:

-  $T_i^{\min}$  - пороговый уровень; характеризует такой уровень сформированности компетентностного кластера  $K_i$  выпускника, который устанавливает его минимальное значение в соответствии требованиям ООП по подготовке выпускника к профессиональной деятельности;

-  $T_i^v$  - продвинутый уровень; характеризует такой уровень сформированности компетентностного кластера  $K_i$  выпускника, который констатирует наличие у него устойчивых навыков в рамках системы компетенций кластера  $K_i$  при выполнении требований ООП по подготовке выпускника к профессиональной деятельности;

-  $T_i^w$  - высокий уровень; характеризует такой уровень сформированности компетентностного кластера  $K_i$  выпускника, который показывает наличие высокого уровня владения теоретико-методологическими подходами к решению профессиональных задач, а также практического опыта профессиональной деятельности по профилю ООП.

Значения параметров  $T_i^{\min}, T_i^v$  и  $T_i^w$  целесообразно определять в виде:

$$T_i^{\min} = \min\{H_k^{\min}; k = \overline{1:l}\} \quad (4)$$

$$T_i^v = \frac{\sum_{k=1}^l H_k^v}{l} \quad (5)$$

$$T_i^w = \max\{H_k^w; k = \overline{1:l}\} \quad (6)$$

Кроме того, для ряда компетенций ООП устанавливает только значения порогового и высокого уровней. В этом случае целесообразно принять:  $T_i^v = T_i^w$ .

Если учесть, что для уровня сформированности  $T_{pi}$  компетентностного кластера  $K_i$  установлен пороговый уровень  $T_i^{\min}$ , продвинутый уровень  $T_i^v$  и высокий уровень  $T_i^w$ , то можно ввести условный ранг уровневой компетентностной кластеризации  $t_{pk}$  в виде:

$$u_{pi} = \begin{cases} 0, & \text{если } 0 \leq T_{pi} < T_i^{\min}; \\ 1, & \text{если } T_i^{\min} \leq T_{pi} < T_i^v; \\ 2, & \text{если } T_i^v \leq T_{pi} < T_i^w; \\ 3, & \text{если } T_i^w \leq T_{pi} \leq 1; \end{cases} \quad (7)$$

Условный ранг уровневой компетентностной кластеризации  $u_{pi}$  может использоваться при автоматизации процесса формирования кластерной компетенциограммы при формировании символьной переменной  $U_{pi}$ , описывающей уровень сформированности компетентностного кластера  $K_i$ ,  $i = 1, \dots, 6$ . В этом случае в соответствии с ООП используют следующую уровневую интерпретацию:

если  $u_{pi} = 0$ , то  $U_{pi} :=$  "кластер компетенций  $K_i$  не сформирован";

если  $u_{pi} = 1$ , то  $U_{pi} :=$  "специалист имеет низкий уровень сформированности кластера компетенций  $K_i$ ";

если  $u_{pi} = 2$ , то  $U_{pi} :=$  "специалист имеет средний уровень сформированности кластера компетенций  $K_i$ ";

если  $u_{pi} = 3$ , то  $U_{pi} :=$  "специалист имеет высокий уровень сформированности кластера компетенций  $K_i$ ".

В этой связи, имея числовую характеристику  $T_{pi}$  уровня сформированности компетентностного кластера  $K_i$ ,  $i = 1, \dots, 6$ , а также значения порогового  $T_i^{\min}$ , продвинутого  $T_i^v$  и высокого  $T_i^w$  уровней его сформированности, можно составить геометрическую интерпретацию, представленную на рисунке 3, которая имеет вид линейной модели.

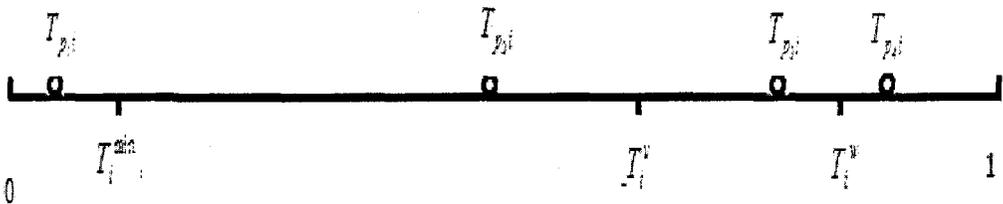


Рисунок 3 – Линейная модель оценки уровня сформированности компетентностного кластера  $K_i$  :

$T_{p1}^i$  - объект  $P_1$  не компетентен в рамках рассматриваемой ООП;

$T_{p2}^i$  - объект  $P_2$  имеет низкий уровень сформированности компетентностного кластера  $K_i$  ;

$T_{p3}^i$  - объект  $P_3$  имеет средний уровень сформированности компетентностного кластера  $K_i$  ;

$T_{p4}^i$  - объект  $P_4$  имеет высокий уровень сформированности компетентностного кластера  $K_i$  .

Если рассматривать все множество компетентностных кластеров  $K_i$ ,  $i = 1, \dots, 6$ , то для ее геометрической интерпретации целесообразно использовать плоскостную модель в форме лепестковой диаграммы, которую можно интерпретировать как «кластерная компетенциограмма».

Пусть  $p$ -ый объект имеет уровни сформированности компетентностных кластеров  $K_1, K_2, \dots, K_6$ , характеризуемые показателями  $T_{p1}, T_{p2}, \dots, T_{p6}$ . Кроме того, рассчитана система пороговых  $T_i^{\min}$ , продвинутых  $T_i^v$  и высоких  $T_i^w$  уровней их сформированности, где  $i = 1, \dots, 6$ , которую целесообразно представить в форме таблицы 1.

Тогда кластерная компетенциограмма специалиста будет иметь вид, представленный на рисунке 4.

Таблица 1 – Система пороговых, продвинутых и высоких уровней сформированности компетентностных кластеров выпускника в рамках ООП направления подготовки специалиста

Кластер компетенций	Пороговый уровень	Продвинутый уровень	Высокий уровень
$T_{p1}$	$T_1^{\min}$	$T_1^v$	$T_1^w$
$T_{p2}$	$T_2^{\min}$	$T_2^v$	$T_2^w$
...	...	...	...
$T_{p6}$	$T_6^{\min}$	$T_6^v$	$T_6^w$

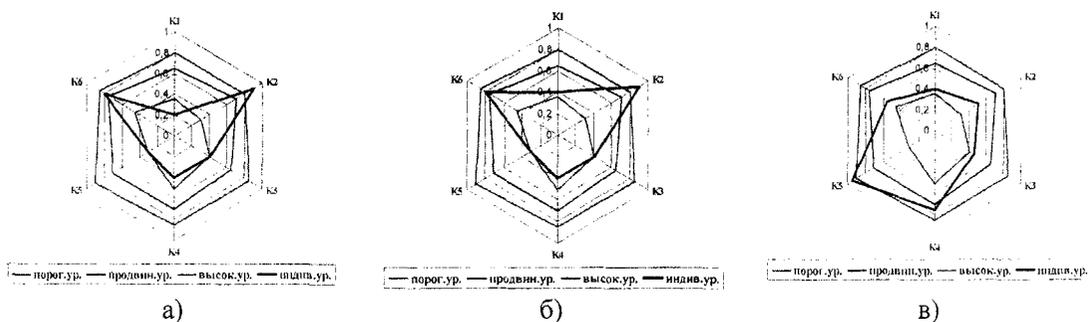


Рисунок 4 – Кластерная компетенциогрaмма специалиста (образец) – плоскостная уровневая модель системы кластеров компетенций специалиста (в соответствии с компетентностной моделью системы европейских стандартов инженерного образования и требований европейской системы аккредитации инженерных программ EUR-ACE):

- а) молодой специалист не освоил успешно ФГОС ВПО направления подготовки специалистов в кластере «Знания и понимание»;
- б) молодой специалист в результате успешного освоения ФГОС ВПО направления подготовки специалистов имеет доминанту в кластерах «Инженерный анализ» и «Личностные качества»;
- в) молодой специалист в результате успешного освоения ФГОС ВПО направления подготовки специалистов имеет доминанту в кластерах «Инженерная практика» и «Исследования»

## ВЫВОД

Полученная кластерная компетенциогрaмма специалиста позволяет визуализировать процесс оценивания уровня сформированности базовых компетентностных кластеров и может рассматриваться как компонент системы признания результативности образовательной деятельности вуза инженерного профиля на международном уровне, потенциально создает возможность решить и вопрос о нахождении обобщенного параметра  $Z_p$ , характеризующего индивидуальный уровень сформированности профессиональной компетентности, которым обладает  $p$ -й объект в условиях вуза, а также в целом решает проблему определения функциональной зависимости между уровнем сформированности профессиональной компетентности  $Z_p$ , которым обладает  $p$ -й объект, и совокупным количеством его знаний по учебным дисциплинам  $Y_p$  в виде  $Z_p = \Phi(Y_p)$  посредством кластеризованной совокупности  $K_i$ ,  $i = 1, \dots, 6$ .

Предложенная модель является компонентом теоретико-методологического обеспечения процедуры оценивания социально-профессиональной конкурентоспособности молодых специалистов на рынке труда с применением автоматизированной системы «Кадровая квалиметрия специалиста».

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозова, А.В. Квалиметрическая оценка уровня социально-профессиональной конкурентоспособности выпускников на региональном рынке труда [Текст] / А.В. Морозова // Известия ОрелГТУ. Серия Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2007. - № 1/265(531). – С. 147-155.
2. Киричек, А.В. Аксиоматический базис квалиметрической многомерной модели социально-профессиональной компетентности молодого специалиста [Текст] / А.В. Киричек, А.В. Морозова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Том 13. - 2011. - № 4(4). - С. 1232-1235.
3. Морозова, А.В. Методологические основы формирования модели квалиметрического оценивания компетенций специалиста для машиностроительного производства // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 1(291). – С. 69-81.

**Андрей Викторович Киричек**

Госуниверситет - УНПК, г Орел  
доктор технических наук, профессор, директор Технологического института  
тел./ fax (4862)555524  
E-mail: [avk@ostu.ru](mailto:avk@ostu.ru)

**Анна Валентиновна Морозова**

Кандидат социологических наук  
Заместитель директора по НИР  
Технологического института им. Н.Н. Поликарпова  
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК»  
Тел.: (4862) 555524  
E-mail: [niotiuostu@gmail.com](mailto:niotiuostu@gmail.com)

A.V. KIRICHEK, A.V. MOROZOVA

## THE MACHINE-BUILDING PROFILE SPECIALIST COMPETENCE CLUSTER FORMEDNESS LEVEL ESTIMATION MODEL WORKING OUT

*In article a number of a young specialist competence clusters formedness level estimation models within the limits of the federal state educational standard of new generation for specialties of a technical cross-section realization with the European accreditation system of engineering education and requirements engineering programs EUR-ACE European standards system of the competence models account is described.*

**Keywords:** *the specialist, the competence, the federal state educational standard.*

## BIBLIOGRAPHY

- [1] Morozova, A.V. A graduates socially-professional competitiveness level qualimetry estimation on a regional labour market [Text] / A.V.Morozova//Izvestija OreIStU. A series Fundamental and applied problems of technics and technology. – 2007. - № 1/265 (531). – Pp. 147-155.
- [2] Kirichek, A.V. The young expert socially-professional competence qualimetry multidimensional model axiomatic basis [Text] / A.V.Kirichek, A.V.Morozova//News of the Samara center of science of the Russian Academy of Sciences. Volume 13. - 2011. - № 4 (4). - Pp. 1232-1235.
- [3] Morozova, A.V. The specialists in machine-building manufacture competence estimations qualimetry model formation methodological basis//Fundamental and applied problems of technics and technology. – 2012. – № 1 (291). – Pp. 69-81.

**Andrey Viktorovich Kirichek**

Doc. Sc. tech., Prof.  
Federal State Budget Educational Institution of Higher Vocational Training "State University – Educational Scientific Production Complex", OreI  
Phone:(4862) 55-55-24  
E-mail: [ti@ostu.ru](mailto:ti@ostu.ru)

**Anna Valentinovna Morozova**

Can.Sc. soc.,  
Deputy Director of the Institute for scientific research works  
Polikarpov Technological Institute  
FSBEI HVT «State University – ESPC»  
Tel.: (4862) 555524  
E-mail: [niotiuostu@gmail.com](mailto:niotiuostu@gmail.com)

*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, 43-48-90  
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  
Алисова М.В., Тарасов Д.Е.  
Компьютерная верстка  
Алисов А.А.

Подписано в печать 27.02.2012 г.  
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 8,9.

Тираж 600 экз.

Заказ № 171/12 111

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе  
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»  
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.