



Журнал индексируется системами РИНЦ и Google Scholar.  
Сведения о журнале публикуются в международной системе «Ulrich's Periodicals Directory»

#### Редакционная коллегия

##### Главный научный редактор

**Корчунов А.Г.** – «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», профессор, доктор технических наук.

##### Заместитель главного научного редактора

**Анцупов В.П.** – «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», профессор, доктор технических наук.

**Бобарикин Ю.Л.** – «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», доцент, кандидат технических наук, г. Гомель, Республика Беларусь.

**Горбатюк С.М.** – Национальный исследовательский технологический университет «Московский институт стали и сплавов», профессор, доктор технических наук.

**Кузьминов А.Л.** – «Череповецкий государственный университет», профессор, доктор технических наук.

**Раскатов Е.Ю.** – «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», профессор, доктор технических наук.

**Трофимов В.Н.** – «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», профессор, доктор технических наук.

##### Ответственный редактор

**Слободянский М.Г.** – «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», доцент, кандидат технических наук.

Журнал основан в 2012 г.  
Периодичность выхода – 2 номера в год.

##### Адрес издателя:

455000, Челябинская обл.,  
г. Магнитогорск,  
пр. К. Маркса, 45/2,  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,  
издательский центр.

##### Адрес типографии:

455000, Челябинская обл.,  
г. Магнитогорск,  
пр. Ленина, 38,  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,  
участок оперативной полиграфии.

Выход в свет 19.02.2021. Заказ 54.  
Тираж 300 экз.

## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENTS

<b>В.П. Анцупов, М.И. Ячиков, И.М. Ячиков</b> Получение переплавляемого электрода для электрошлаковой печи из отработанных дисковых ножей и определение его свойств	4	<b>V.P. Antsupov, M.I. Yachikov, I.M. Yachikov</b> Producing remelt electrodes for electroslag remelting furnaces from used cutting discs and determining the properties	4
<b>А.В. Козлов, В.С. Верещагин</b> Нарезание кольцевых канавок в глубоких отверстиях с помощью универсальной расточной оправки	11	<b>A.V. Kozlov, V.S. Vereshchagin</b> Circular grooving in deep bores using a universal boring bar	11
<b>Д.В. Терентьев, С.И. Платов, В.К. Белов, Е.В. Губарев</b> Экспериментальные исследования маслостойкости поверхностей в зависимости от способа механической обработки	15	<b>D.V. Terentiev, S.I. Platov, V.K. Belov, E.V. Gubarev</b> Experimental research on oil absorption capacity of surfaces depending on a machining method	15
<b>И.А. Стрельников, Д.А. Пестряев, Ш.В. Садетдинов</b> Влияние дипинаконборатов на качество мойки металлической поверхности	20	<b>I.A. Strelnikov, D.A. Pestryaev, Sh.V. Sadetdinov</b> Effect of dipinakonborates on the quality of metal surface cleaning	20
<b>Виктор В. Точилкин, З.В. Камалихина, И.В. Котов, Василий В. Точилкин</b> Развитие конструкций для разлива стали системы сталеразливочный ковш - промежуточный ковш - кристаллизатор МНЛЗ	27	<b>Viktor V. Tochilkin, Z.V. Kamalikhina, I.V. Kotov, Vasiliy V. Tochilkin</b> Developing structures for casting steel through the ladle - tundish - CCM mold	27
<b>В.А. Андреященко</b> Анализ качества железнодорожных колес ТОО «ПРОММАШКОМПЛЕКТ»	31	<b>V.A. Andreyashchenko</b> Analysis of the quality of railway wheels produced by LLP Prommashkomplekt	31
<b>В.Д. Шипица, М.Ю. Чернявский</b> Оптимизация процесса вырезки образцов для исследования качества горячекатаных бесшовных труб	39	<b>V.D. Shipitsa, M.Yu. Chernyavsky</b> Optimizing the process of cutting specimens to study the quality of hot rolled seamless pipes	39
<b>Г.И. Трифонов</b> Разработка системы автоматизированного проектирования нанесения функциональных покрытий	43	<b>G.I. Trifonov</b> Development of the computer-aided design system for applying functional coatings	43
<b>В.А. Коструб, А.А. Мирошников</b> Разработка мобильной многофункциональной измерительной лаборатории на базе аналого-цифрового преобразователя	49	<b>V.A. Kostrub, A.A. Miroshnikov</b> Development of a mobile multifunctional measuring laboratory based on an analog-to-digital converter	49
<b>М.П. Шишкарёв</b> Надежность работы адаптивной фрикционной муфты второго поколения (базовый вариант)	56	<b>M.P. Shishkarev</b> Performance reliability of an adaptive friction clutch of the second generation (a basic version)	56
<b>Е.С. Решетникова, Ю.В. Гайворонская, Ю.А. Гудаева</b> Теория изображений и практические методы ее реализации при построении геометрических моделей в компетенции инженерный дизайн CAD	66	<b>E.S. Reshetnikova, Yu.V. Gaivoronskaya, Yu.A. Gudaeva</b> Image theory and practical methods of its implementation, when building geometrical models in the competence "Engineering design - CAD"	66



**к 60-летию юбилею**

**кафедры проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования  
Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова**

На кафедре осуществляется подготовка высококвалифицированных специалистов в области проектирования, эксплуатации и реновации металлургического оборудования.

Подготовка осуществляется по программам бакалавриата, магистратуры, специалитета и аспирантуры. Студенты активно изучают и используют современные системы автоматизированного проектирования CAD/CAE/CAM в процессе выполнения проектов и научных исследований. Осваивают навыки прямого и реверсивного инжиниринга с использованием 3D-моделирования и визуализации, 3D-сканирования и 3D-печати, элементы технологий виртуальной и дополненной реальности VR/AR в проектировании и дизайне промышленного оборудования. Принимают участие в перспективных научных исследованиях по направлению Индустрия 4.0, связанных с разработкой цифровых двойников технологических машин и комплексов, конструкций и агрегатов на основе новых технологий цифрового проектирования, и исследований их надежности при эксплуатации.

Студенты кафедры – постоянные участники финалов национального чемпионата профессионального мастерства Worldskills.

Кафедра активно сотрудничает со стратегическим партнёром в области подготовки кадров и проведения совместных научных исследований ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», а также с другими ведущими предприятиями региона и страны.

Преподаватели кафедры принимают активное участие в программах Европейского Союза по поддержке научных и образовательных проектов. Студенты кафедры проходят зарубежные практики и участвуют в программах академической мобильности.

За свою историю кафедра подготовила более 5000 высококлассных специалистов. Выпускники работают на крупных предприятиях и инжиниринговых фирмах во всех регионах страны и за рубежом.

Коллектив кафедры продолжает и приумножает лучшие традиции инженерного образования России. Многогранная и плодотворная деятельность кафедры, верность традициям и стремление к новому позволяет с уверенностью смотреть в будущее.



УДК 621.746.047:669.054.2

**В.П. Анцупов, М.И. Ячиков, И.М. Ячиков**  
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова»  
г. Магнитогорск, Россия  
E-mail: jachikov@mail.ru  
Дата поступления 18.12.2020

## ПЕРЕРАБОТКА В ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ ПЕЧИ ПЕРЕПЛАВЛЯЕМОГО ЭЛЕКТРОДА ИЗ ОТРАБОТАННЫХ ДИСКОВЫХ НОЖЕЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕГО АНИЗОТРОПИИ СВОЙСТВ

### Аннотация

В металлургическом производстве образуется большое количество легированного лома. Одной из его разновидностей являются отходы, образующиеся из вышедших из строя дисковых отработанных ножей для резки металла. Предлагается технология их вторичной переработки, включающая изготовление переплавляемых электродов из отработанных ножей одного типоразмера и получение заготовки путем переплава в электрошлаковой печи с внутренним кристаллизатором. Для формирования цилиндрического переплавного электрода с целью лучшего теплового и электрического контакта диски прижимают друг к другу под давлением не менее 1 МПа и приваривают их между собой с помощью дуговой аргоновой или плазменной сварки. Изготовленный подобным образом из отработанных дисковых ножей электрод обладает анизотропией свойств. Показана методика расчета эффективного коэффициента теплопроводности и изменения удельного электрического сопротивления в осевом направлении электрода с учетом передачи тепла и электрического тока через зону контакта двух металлических дисков.

**Ключевые слова:** дисковые ножи по металлу, электрошлаковый переплав, легированная сталь, переплавляемый электрод, анизотропия свойств, эффективный коэффициент теплопроводности, контактное давление.

### Введение

В прокатном производстве дисковые ножи применяют на дисковых ножницах при продольной резке и обрезке кромки листов и рулонной полосы металла на определенную ширину. Дисковый нож имеет круглую форму, изготавливается из материала высокой прочности и имеет по периметру режущую кромку. Для посадки на ось вращения в центре дискового ножа имеется отверстие, которое может быть выполнено как с пазами, так и с выступами, при этом ширина его кромки может варьироваться. Дисковые ножи могут изготавливаться из штамповочной, быстрорежущей, инструментальной и легированной сталей. Наибольшее распространение получили легированные инструментальные стали 9ХС, 9ХФ, ХВСГ, 6ХВ2С и др. [1].

На металлургических предприятиях существует проблема переработки и использования вторичного стального лома. В прокатном производстве имеется большое количество легированного лома в виде отходов, образующиеся из отработанных ножей для резки металла, причем до 70% составляют вышедшие из строя дисковые ножи.

Используемые в настоящее время дисковые ножи для резки металла имеют 40 типоразмеров с наружным диаметром  $D=125-370$  мм, с посадочным отверстием  $d=40-240$  мм и высотой  $B=6-30$  мм по ТУ 14-1-1146-74 из легированных сталей твердостью 50–61 HRC (по Роквеллу) (рисунок 1). Основные размеры стандартных дисковых ножей с внешним диаметром до 400 мм сведены в таблице 1.

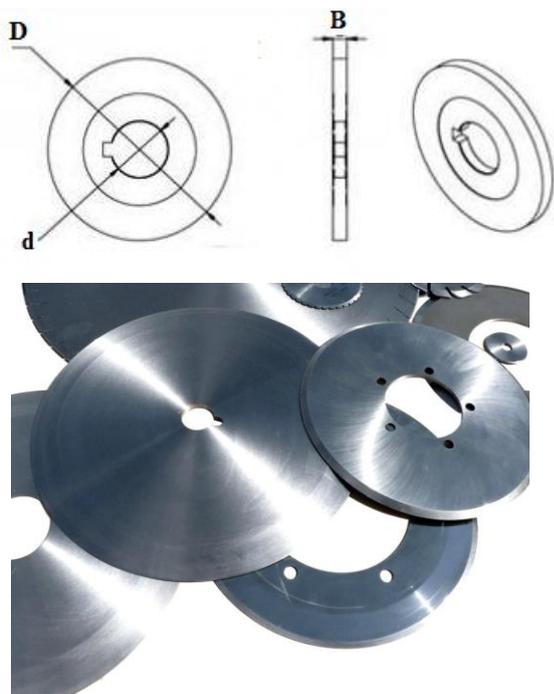


Рисунок 1. Основные размеры дисковых ножей по металлу

В настоящее время производство и переработка отработанных ножей чаще всего протекает по следующей технологической карте [2]:

- плавка стали в электрических печах;
- разливка металла для формирования электродов ЭШП;
- переплав электродов в ЭШП и получение заготовок;
- механическая обработка заготовок дисковых ножей;
- термическая обработка (отжиг);
- механическая обработка;
- закалка с высоким отпуском.

Таблица 1  
Типоразмеры стандартных дисковых ножей диаметром до 400 мм (мм)

<i>D</i>	<i>d</i>	<i>B</i>	<i>D</i>	<i>d</i>	<i>B</i>
260	120	20	350	240	20
260	150	20	360	150	20
260	150	30	360	150	30
270	150	20	360	220	30
275	125	20	370	210	20
300	150	20	370	240	20
300	175	16	370	240	30
350	200	30			

Из рассмотренной технологической схемы видно, что имеется двойной переплав получаемой заготовки. Возникает вопрос о возможности получения требуемой заготовки в установке ЭШП в одну стадию. Поставленная задача наталкивается, прежде всего, на проблему изготовления переплавного электрода.

В настоящее время наиболее распространенным способом получения расходных электродов ЭШП является процесс прессования металлической шихты, имеющий ряд недостатков. Неоднократно предпринимались попытки усовершенствования технологии прессования, конструкций прессовых установок и инструментальной наладки. Однако основными недостатками существующей схемы, связанной с прессованием, остаются наличие дорогого прессовального оборудования, недостаточная прочность получаемых электродов, возможность возникновения трещин [3, 4].

В данной работе предлагается получение переплавляемого электрода из отработанных дисковых ножей. Они практически полностью сохраняют типоразмеры стандартных дисковых ножей с тем отличием, что за счет износа внешний диаметр ножей уменьшается на  $\Delta_{\text{изн}}=3-5$  мм.

При наличии большого количества отработанных ножей предлагается переплавляемые электроды для ЭШП изготавливать из ножей одного типоразмера. Цилиндрический электрод получают путем прижатия отработанных ножей друг к другу под давлением не менее 1 МПа для лучшего теплового и электрического контакта, и далее приваривают диски ножей с помощью аргоновой или плазменной сварки. В зависимости от используемого размера отработанных ножей делают 3–5 сварных швов вдоль образующей цилиндра электрода (рисунок 2, а), либо проводят точечную сварку в 3–5 точках по внешней окружности контакта дисковых ножей (рисунок 2, б).

Сварку производят при обычном атмосферном давлении, при этом плотность энергии в дуге (тепловой поток) примерно такая же, как при обычной дуговой сварке. При этом сварочную ванну защищают от

действия кислорода воздуха аргоном, используя вольфрамовый электрод, который практически не расходится. Плазменную сварку выполняют с помощью плазмотрона, в котором дуга горит в атмосфере аргона повышенного давления. При этом в аргоновой струе достигают температуры до 12 тысяч градусов Цельсия в узком столбе

плазмы. В отличие от свободной дуги плазменная струя имеет практически цилиндрическую форму, создает давление на металл в 5–8 раз больше, при этом тепловая энергия вся сосредоточена в тонкой струе плазмы и нагрев металла происходит только в области сварки.

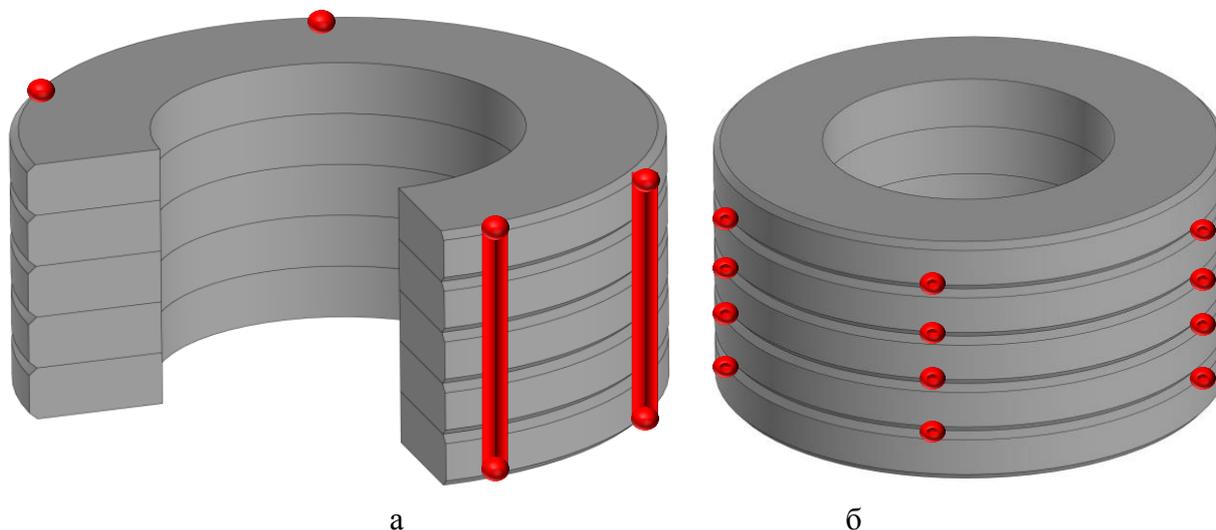


Рисунок 2. Изготовление переплавляемого электрода:

- а – путем нанесения сварных швов вдоль образующей цилиндра электрода;  
б – путем точечной сварки по внешней окружности в местах контакта дисковых ножей

### Расчет геометрии и свойств переплавляемого электрода, полученного из отработанных дисковых ножей

Рассмотрим расчет геометрии и свойств переплавляемого электрода из отработанных дисковых ножей и его переплав в электрошлаковой печи с внутренним кристаллизатором – дорном, предназначенным для формирования полости в выплавляемой заготовке.

Исходными данными являются размеры получаемой заготовки – ее внешний, внутренний диаметр и высота:  $D_3=350\text{--}500$  мм;  $d_3=150\text{--}240$  мм;  $H_3=720$  мм. Определим суммарную длину  $h$  переплавляемого электрода при переплаве отработанных ножей заданного диаметра  $D$ . По уравнению непрерывности

$$\gamma_{\text{т}} \pi \left( (D - \Delta_{\text{из}})^2 - d^2 \right) \frac{h}{4} = \gamma_{\text{т}} \pi \left( D_3^2 - d_3^2 \right) \frac{H_3}{4},$$

получим  $h = H_3 \frac{(D_3^2 - d_3^2)}{\left( (D - \Delta_{\text{из}})^2 - d^2 \right)}$ . При

ЭШП имеют место потери на угар металла

электрода, составляющие примерно 1%, с учетом этого необходимая минимальная длина переплавляемого электрода

$$h_s = 1,01h = 1,01 \cdot H_3 \frac{(D_3^2 - d_3^2)}{\left( (D - \Delta_{\text{из}})^2 - d^2 \right)}. \quad (1)$$

Для примера возьмем следующие исходные данные: размеры получаемой заготовки  $D_3=384$  мм,  $d_3=220$  мм,  $H_3=720$  мм; размеры переплавляемых ножей  $D=370$  мм,  $d=240$  мм,  $\Delta_{\text{изн}}=5$  мм. Поперечный размер переплавляемого электрода составляет 370 мм и равен внешнему диаметру ножей, определим минимальную длину  $h_s$  переплавляемого электрода. По уравнению непрерывности (1), получим  $h_s \approx 953$  мм.

На ПАО «ММК» для изготовления ножей используют сталь 6ХВ2С. Ее теплофизические свойства при комнатной температуре: плотность  $\gamma_{\text{т}}=7800$  кг/м<sup>3</sup>; теплоемкость  $c_{\text{т}}=460$  Дж/(кг·К), изотропная теплопроводность –  $\lambda_{\text{т}} = 40$  Вт/(м·К).

Электрод, изготовленный из отработанных дисковых ножей, обладает анизотропией свойств. Определим эффективный

коэффициент теплопроводности  $\lambda_{эф}$  в осевом направлении с учетом передачи тепла через зону контакта двух металлических дисков. Тепловой поток  $q$ , проходящий вдоль оси цилиндра, определяется термическим сопротивлением самого металла и термическим контактным сопротивлением  $R_k$ , возникающем при неплотном контакте двух металлических пластин.

Полное термическое сопротивление  $R = R_k + B/\lambda_{тр}$ , где  $B$  – толщина диска. Тепловой поток при перепаде температур  $\Delta t$ :

$$q = \lambda_{эф} \frac{\partial t}{\partial x} = \lambda_{эф} \frac{\Delta t}{\Delta x} = \lambda_{эф} \frac{\Delta t}{B + \delta_1}.$$

Принимая во внимание, что при плотном прижатии двух металлических дисков величина микрозазора  $\delta_1 \ll B$ , напишем выражение для определения эффективного коэффициента теплопроводности в осевом направлении

$$\lambda_{эф} = \frac{B}{R} = \frac{B}{R_k + \frac{B}{\lambda_{тр}}}. \quad (2)$$

Для нахождения термического контактного сопротивления  $R_k$  используем выражение для трех термических сопротивлений, действующих параллельно

$$\frac{1}{R_k} = \frac{1}{R_m} + \frac{1}{R_g} + \frac{1}{R_l}, \quad (3)$$

где  $R_m$  – термическое сопротивление фактического контакта, передающегося теплопроводностью через металл;  $R_g$  – термическое сопротивление межконтактной среды через микрозазоры, в которых находится воздух;  $R_l$  – термическое сопротивление за счет излучения. Обычно излучение учитывают при разнице температур между контактирующими поверхностями  $\Delta t = t_1 - t_2 > 700^\circ$  и когда используются материалы, имеющие низкую теплопроводность. В нашем случае, при контакте двух металлов с относительно высокой теплопроводностью этой величиной можно пренебречь, получим

$$\frac{1}{R_k} = \frac{1}{R_m} + \frac{1}{R_g}. \quad (4)$$

При рассмотрении процесса передачи тепла через зону контакта двух твердых тел обычно принимают ряд допущений [5]. С

их учетом для определения термического сопротивления фактического контакта воспользуемся выражением, полученным в работе [6]

$$\frac{1}{R_m} = 2,12 \cdot 10^4 \lambda_{тр} \left( \frac{p}{E} B_n \right)^{0,8}, \quad (5)$$

где  $p$  – давление в контакте, Н/м<sup>2</sup>;  $E$  – модуль упругости металла (модуль Юнга), его значение с увеличением температуры уменьшается (табл. 2).

Эмпирическая зависимость (5) выведена путем обработки данных, полученных при анализе поперечных и продольных профилеграмм с поверхностей с чистотой обработки 3–10 класса, для материалов с модулем Юнга  $E > 7 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup> и относительных нагрузках на контактные поверхности  $p/E = 5 \cdot 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-4}$ .

Таблица 2

Модуль Юнга в зависимости от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	20	50	100	200	300	400	500	600
$E, \text{ГПа}$	215	212	210	205	200	190	180	170

Коэффициент  $B_n$  характеризует геометрические свойства контактирующих поверхностей и зависит от суммы средних высот выступов микронеровностей контактирующих поверхностей  $h_\Sigma = h_{cp1} + h_{cp2} = 2h_{cp}$ .

График зависимости  $B_n(h_\Sigma)$ , приведенный в работе [5], был аппроксимирован в виде полинома второй степени

$$B_n = 27,106 - 0,5518 h_\Sigma + 0,0052 h_\Sigma^2, \quad (6)$$

где величина  $h_\Sigma$  задается в мкм. Средняя высота неровностей  $h_{cp}$  зависит от класса чистоты обработки поверхности согласно ГОСТ 2789-59.

Термическое сопротивление межконтактной среды зависит от теплопроводности воздуха между дисками  $\lambda_g$  (при средней температуре контакта поверхностей) и от величины  $m$ , являющейся коэффициентом заполнения профиля

$$\frac{1}{R_g} = \frac{\lambda_g}{h_\Sigma(1-m)}. \quad (7)$$

Графическая зависимость  $(1-m)$  от суммарной величины средних высот микровыступов  $h_\Sigma$ , приведенная в работе [6],

была аппроксимирована следующим уравнением

$$1 - m = 0,4154 + 8,1 \cdot 10^{-3} h_{\Sigma} - 9 \cdot 10^{-5} h_{\Sigma}^2. \quad (8)$$

Для определения теплопроводности воздуха в диапазоне температур 0–1200°C было использовано уравнение [7]

$$\lambda_6(t) = 2,54 \cdot 10^{-2} + \left( \frac{Bm}{m \cdot \text{град}} \right) + 7 \cdot 10^{-5} t - 1,4 \cdot 10^{-8} t^2. \quad (9)$$

Изотропный коэффициент теплопроводности металла также является функцией температуры

$$\lambda_{\text{т}}(t) = 40,1 - 0,0144 \cdot t - \left( \frac{Bm}{m \cdot \text{град}} \right) - 1,583 \cdot 10^{-5} \cdot t^2. \quad (10)$$

На основе математической модели (2) – (10) проведено компьютерное моделирование изменения эффективного коэффициента теплопроводности от параметров, влияющих на контактное термическое сопротивление. На рисунке 3,а показана зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от температуры при разных давлениях между дисками. Расчет проведен при толщине диска  $B=20$  мм и 6 классе чистоты поверхности ( $h_{\Sigma}=20$  мкм). Видно, что эффективная теплопроводность падает с увеличением температуры и растет с увеличением контактного давления и повышением чистоты обработки металла (рисунок 3,б). Последнее можно объяснить большей площадью микроконтактов при соприкосновении двух поверхностей.

Для дальнейших тепловых расчетов определим среднеинтегральные эффективные коэффициенты теплопроводности при  $p=1$  МПа в диапазоне температур от 0 до 800°C как  $\bar{\lambda}_{\text{эф}} = \frac{1}{800} \int_0^{800} \lambda_{\text{эф}}(t) dt$ , в результате

расчета получим:

при  $h_{\Sigma}=40$  мкм  $\bar{\lambda}_{\text{эф}}=7,8$  Вт/(м град);

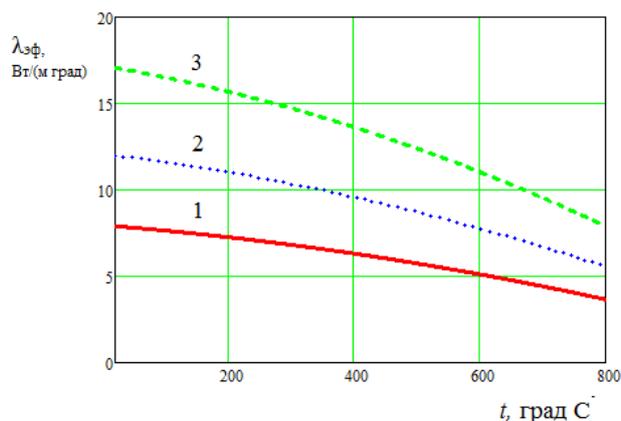
при  $h_{\Sigma}=20$  мкм  $\bar{\lambda}_{\text{эф}}=9,33$  Вт/(м град);

при  $h_{\Sigma}=10$  мкм  $\bar{\lambda}_{\text{эф}}=10,4$  Вт/(м град);

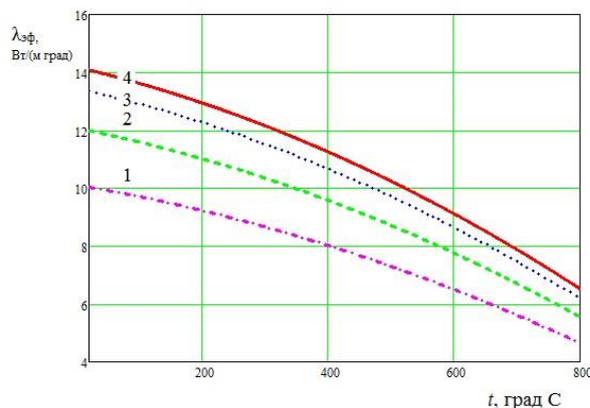
при  $h_{\Sigma}=5$  мкм  $\bar{\lambda}_{\text{эф}}=10,96$  Вт/(м град).

Средняя теплопроводность в этом диапазоне температур литого металла  $\bar{\lambda}_{\text{т}} \approx 30,9$  Вт/(м град).

При соприкосновении двух металлических дисков возникает дополнительное электрическое сопротивление  $R_{\text{к}}$ , называемое контактным сопротивлением. Оно состоит из двух частей  $R_{\text{к}} = R_{\text{пл}} + R_{\text{п}}$ . Первая составляющая  $R_{\text{пл}}$  сопротивления вызывается поверхностными пленками на контактных поверхностях и препятствующую протеканию тока. Вторая составляющая  $R_{\text{п}}$  определяется наличием шероховатостей на поверхности металла, в результате, соединенные в стык проводники соприкасаются лишь в отдельных точках, аналогично процессу передаче тепла через зону теплового контакта. В первом приближении можно считать, что  $R_{\text{пл}}$  и  $R_{\text{п}}$  не зависят друг от друга.



а



б

Рис. 3. Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от температуры:  
а – при давлении между дисками: 1 – 0,5 МПа; 2 – 1 МПа; 3 – 2 МПа;  
б – при разных классах чистоты обработки поверхности ( $p=1$  МПа): 1 – 5 класс ( $h_{\Sigma}=40$  мкм);  
2 – 6 класс ( $h_{\Sigma}=20$  мкм); 3 – 7 класс ( $h_{\Sigma}=10$  мкм); 4 – 8 класс ( $h_{\Sigma}=5$  мкм)

Если пренебречь  $R_{пл}$  и считать, что при прижатии двух дисков наблюдается только упругая деформация металла, то переходное сопротивление можно определить по формуле, предложенной в работе [8]

$$R_{п} = \frac{0,12 \cdot \rho \cdot E \cdot h_{ср}}{Q(1-\mu)}, \quad (11)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление металла;  $\mu=0,28-0,33$  – коэффициент Пуассона стали;  $E$  – модуль упругости;

$h_{ср}$  – средняя высота микронеровностей контактирующих поверхностей;

$Q = p \cdot f$  – усилие контактного нажатия при давлении сжатия  $p$ . Площадь контакта  $f = \pi((D - \Delta_{из})^2 - d^2)$ .

Полное электрическое сопротивление с учетом контактного сопротивления

можно записать как  $R' = \frac{\rho}{f} \left( B + \frac{0,12 \cdot E h_{ср}}{p(1-\mu)} \right)$

Эффективное удельное сопротивление

$$\rho_{эф} = \frac{R'f}{B} = \rho \left( 1 + \frac{0,12 \cdot E h_{ср}}{B \cdot p(1-\mu)} \right). \quad (12)$$

Отсюда относительное увеличение удельного сопротивления

$$K_{эф} = \frac{\rho_{эф}}{\rho} = \left( 1 + \frac{0,12 \cdot E h_{ср}}{B \cdot p(1-\mu)} \right). \quad (13)$$

При  $E=10^5$  МПа,  $p=1$  МПа,  $\mu=0,3$ ,  $B=20$  мм получим:

при  $h_{ср}=20$  мкм  $K_{эф}=18$ ; при  $h_{ср}=10$  мкм

$K_{эф}=9,6$ ; при  $h_{ср}=5$  мкм  $K_{эф}=5,3$ ; при

$h_{ср}=2,5$  мкм  $K_{эф}=3,1$ . Видно, что из-за нали-

чия контактного сопротивления увеличивается

эффективное удельное сопротивление, а значит и

объемное тепловыделение в переплавленном электроде при прохождении по

нему тока  $I$ :  $q_v = \rho \cdot J^2$ , где

$J = I/f$  – средняя плотность тока через

электрод.

При рассмотренных параметрах объемное тепловыделение в переплавленном электроде увеличивается в  $K_{эф}$  раз.

Посмотрим, насколько это скажется на тепловом состоянии составного электрода. Удельное сопротивление стали с возрастанием температуры растет линейно [9]

$$\rho_t = \rho(1 + \alpha_t(t - 20)), \quad (14)$$

где  $\rho=(0,1-0,13)10^{-6}$  Ом м,  $\alpha_t=(1-4)10^{-3}$  град $^{-1}$ –

температурный коэффициент электрического сопротивления. При  $\rho=0,11 \cdot 10^{-6}$  Ом м,

$\alpha_t=2 \cdot 10^{-3}$  град $^{-1}$  при  $t=500^{\circ}\text{C}$  имеем

$\rho_t \approx 2 \cdot 10^{-7}$  Ом м.

При максимальном токе печи ЭШП

$I=20$  кА имеем плотность тока

$J = I/f \approx 8,4$  А/см $^2$ , где площадь контакта

$f \approx 0,238$  м $^2$ .

Найдем объемное тепловыделение в литом электроде

$q_v = \rho_t J^2 = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 8,4 \cdot 10^8 \approx 168$  Вт/м $^3=0,000168$  Вт/см $^3$

и электроде, полученном из отработанных

ножей, при  $K_{эф}=20$

$q_v = K_{эф} \rho_t J^2 \approx 3360$  Вт/м $^3=0,00336$  Вт/см $^3$ .

Полученные оценки говорят о том,

что тепловыделением за счет джоулева

тепла в электроде, полученном из отработанных

ножей, можно пренебречь.

## Выводы

1. Предложена схема переработки отработанных дисковых ножей путем получения электрода из ножей одного типоразмера для дальнейшего переплава в установке ЭШП.
2. Показана методика расчета минимальной длины переплавляемого электрода из отработанных дисковых ножей для получения полой заготовки заданной длины, с внешним и внутренним диаметром, определяемые конструкцией внешнего и внутреннего кристаллизаторов.
3. Установлено наличие анизотропии теплопроводности и электропроводности в получаемых переплавленных электродах в осевом и радиальном направлениях. Для составного электрода средняя теплопроводность в осевом направлении в зависимости от свойств поверхности дисков снижается в 3–4 раза, а удель-

ное электрическое сопротивление увеличивается примерно в 3 раза по сравнению с литым металлом. При существующих плотностях тока через электроды джоулевым тепловыделением в электроде из отработанных ножей можно пренебречь.

#### Библиографический список

1. Лоладзе, Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т. Н. Лоладзе. – М: Машиностроение, 1982. – 320 с.
2. Вдовин К.Н., Ячиков М.И., Юсин А.Н., Позин А.Е., Русин Е.А. Переплав ножевых марок сталей методом ЭШП // Теория и технология металлургического производства, 2017, №1 (20) – С. 23–26.
3. Логинов Ю.Н., Карсаков В.В., Хайкин Б.Е. Сокращение образования трещин на поверхности расходуемых титановых электродов. Технология легких сплавов, 1984. № 6. С. 62–64.
4. Vdovin K.N., Tochilkin V.V., Yachikov I.M. Designing refractories for the tundish of a continuous caster Refractories and Industrial Ceramics. 2016. Т. 56. № 6. С. 569–573.
5. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А. Контактный теплообмен, Госэнергоиздат, 1963. – 280 с.
6. Попов В. М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. М., Энергия, 1971. – 216 с.
7. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. –720 с.
8. Бондаренко И.Б., Гатчин Ю.А., Иванова Н.Ю., Шилкин Д.А. Соединители и коммутационные устройства. Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 151 с.
9. Физические величины. Справочник. Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

---

#### *Information about the paper in English*

V.P. Antsupov, M.I. Yachikov, I.M. Yachikov  
Nosov Magnitogorsk State Technical University  
Magnitogorsk, Russia  
E-mail: jachikov@mail.ru  
Received 18.12.2020

#### REPROCESSING REMELT ELECTRODES IN ELECTROSLAG REMELTING FURNACES FROM USED CUTTING DISCS AND DETERMINING THE ANISOTROPY OF THE PROPERTIES

#### Abstract

The metallurgical industry is associated with much alloyed scrap. One of its varieties is wastes produced from used metal cutting discs. It is suggested to use the technology for their reprocessing, including the production of remelt electrodes from used shear blades of a single size and production of billets by remelting in the electroslag remelting furnace with an inner mold. To shape a cylindrical remelt electrode, discs are pressed to one another at 1 MPa or higher for a better thermal and electrical contact and welded together using argon or plasma arc welding. Electrodes manufactured according to such technology from used shear blades have the anisotropy of properties. The paper describes the method for calculating the effective heat conductivity factor and changes in specific electrical resistance in an axial direction of electrodes, factoring into heat and current transfer through a contact zone of two metal discs.

**Keywords:** metal cutting discs, electroslag remelting, alloyed steel, remelt electrode, anisotropy of properties, effective heat conductivity factor, contact pressure.

---



УДК 621.9.022

**А.В. Козлов, В.С. Верещагин**  
Филиал ФГАОУ «Южно-Уральский  
государственный университет» (НИУ)  
г. Златоуст, Россия  
E-mail: kozlovav@susu.ru  
Дата поступления 18.12.2020

## НАРЕЗАНИЕ КОЛЬЦЕВЫХ КАНАВОК В ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЯХ С ПОМОЩЬЮ УНИВЕРСАЛЬНОЙ РАСТОЧНОЙ ОПРАВКИ

### Аннотация

Рассмотрен процесс получения кольцевых канавок в глубоком отверстии с использованием универсальной расточной оправки. Выполнено теоретическое обоснование работы расточной оправки. Приведены результаты экспериментов по нарезанию кольцевых канавок в деталях из алюминиевого сплава марки Д16Т на токарном станке с ЧПУ мод. 16К20Ф3. Результаты экспериментальных исследований подтвердили возможность изменения предлагаемого метода для нарезания кольцевых канавок в глубоких отверстиях.

**Ключевые слова:** расточная оправка, обработка отверстий, кольцевая канавка, точность, универсальность.

### Введение

Нарезание внутренних кольцевых канавок в глубоких отверстиях представляет серьёзную проблему, поскольку при использовании традиционных канавочных резцов [1] сложно обеспечить стабильную величину глубины канавки из-за малой жесткости инструмента и его радиальных деформаций. Расточная оправка позволяет избавиться от данного недостатка, так как оправка снабжена выдвижным опорным элементом, который базируется по поверхностям обработанного отверстия.

### Основная часть

В работе [2] рассмотрена возможность базирования инструментов одностороннего резания по поверхностям обрабатываемого отверстия. Разработанная система математических моделей позволяет установить зависимость между диаметром инструмента, диаметром обрабатываемого отверстия и диаметром полученного отверстия, с помощью определённого вида базирования по поверхности. Схемы обработки отверстий при базировании на обрабатываемую и обработанную поверхности показаны ниже (рисунок 1).

В основе конструкции работы универсальной расточной оправки лежат следующие теоретические предпосылки. [2, 3] При обработке отверстий в случае выполнения минимального размера  $D_{min}$  (рис. 2в) расстояние между проекциями опорной точки базировочного элемента и формообразующей (периферийной) точкой режущей кромки на плоскость, перпендикулярную оси вращения –  $E$ , должны быть равны:

$$D_{min} = E. \quad (1)$$

При обработке максимального размера  $D_{max}$  опорная точка должна лежать на обрабатываемой поверхности (рис. 2б), тогда:

$$E \geq D_{max} - \frac{D_{max} - D_3}{2}. \quad (2)$$

После подставки (1) в (2) и преобразований имеем:

$$D_3 \leq 2D_{min} - D_{max}. \quad (3)$$

В случае обработки фасонных в осевом сечении отверстий базировочный элемент опирается в течении одного прохода на обрабатываемую поверхность, а резец начинает обрабатывать поверхность на заданную глубину  $t$  (рисунок 2б). Диаметр предварительно обработанной поверхности определяется крайними значениями соотношений (3), то есть:

$$D_3 = 2D_{min} - D_{max}. \quad (4)$$

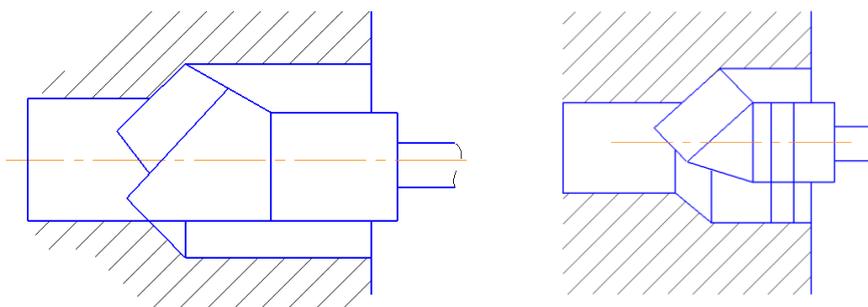


Рисунок 1. Схемы обработки отверстий при базировании на поверхности

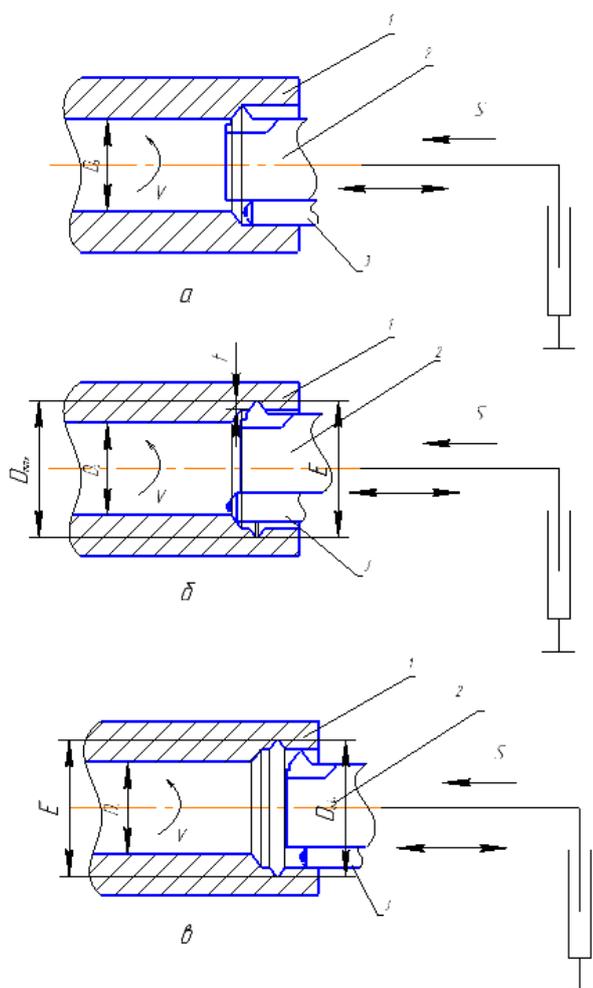


Рисунок 2. Схема нарезания кольцевой канавки

После выполнения канавки опорный элемент 3 отводится в исходное положение, инструменту 2 сообщается осевая подача и технологический цикл снова повторяется.

Для получения таких канавок была спроектирована и изготовлена расточная оправка (см. рисунок 3), в которой установлен резец с пластинкой из твердого сплава [4].

Устройство (рисунок 3), включает корпус 1, установленный на продольном суппорте токарного станка, расточную оправку 2 с размещённым в ней режущим элементом 3, опорным элементом 4 и пальцем 5. В продольном отверстии оправки размещен с возможностью осевого перемещения опорный элемент 4. Опорный элемент связан с пальцем 5, установленным на корпусе 1 с возможностью поперечных перемещений. Палец 5 входит в наклонный паз 6 выполненный в корпусе 1. Перемещение пальца по наклонному пазу приводит к выдвиганию опорного элемента 4. Палец, жёстко связанный с корпусом, перемещается путем изменения координаты  $x$  в системе ЧПУ, то есть поперечным перемещением суппорта станка.

Расточная оправка была установлена на токарный станок 16К20Ф3 с устройством ЧПУ NC-201М Российского производства. [5] После изготовления, сборки и установки расточной оправки был проведён процесс обработки с целью подтверждения работоспособности данной конструкции.

Для процесса обработки была использована заготовка цилиндрической формы из алюминиевого сплава Д16Т с наружным диаметром 45 мм, внутренним отверстием диаметром 27 мм. Все кольцевые канавки были выполнены по управляющей программе. Канавки имеют одинаковую глубину и шаг – 3 мм (см. рисунок 7). Изменять эти параметры можно с помощью управляющей программы, а корректировать наклон и профиль канавок возможно путём замены и соответствующей заточки твердосплавной пластинки.

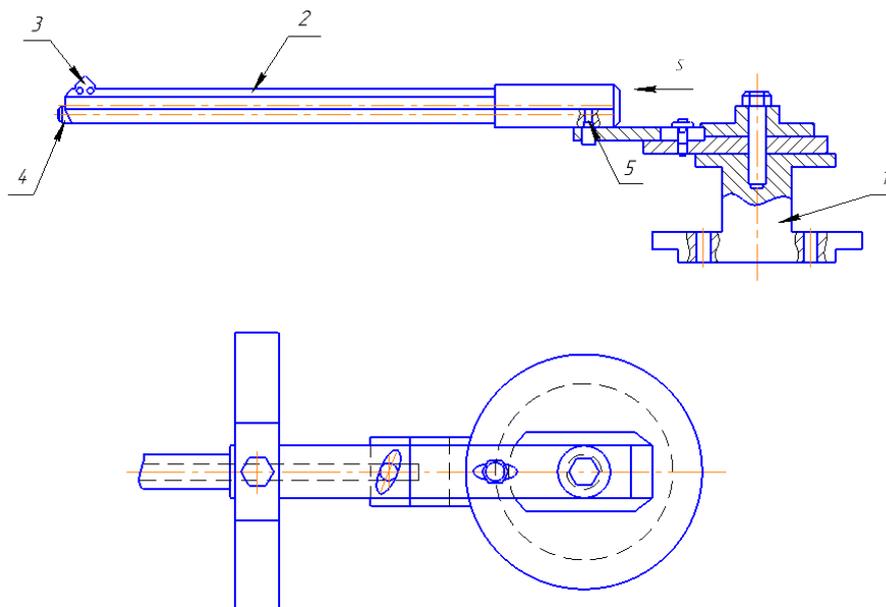


Рисунок 3. Универсальная расточная оправка



Рисунок 4. Общий вид расточной оправки, установленной на станке

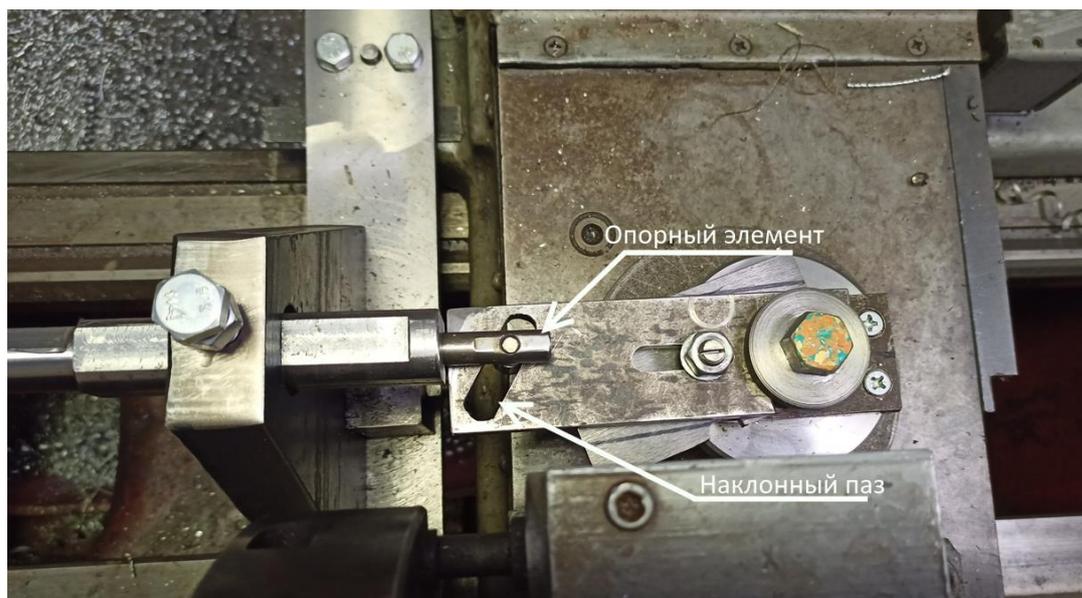


Рисунок 5. Механизм перемещения опорного элемента по наклонному пазу



Рисунок 6. Процесс нарезания  
кольцевых канавок



Рисунок 7. Заготовка после обработки  
универсальным инструментом

### Заключение

Таким образом была подтверждена возможность получения кольцевых канавок с использованием универсальной расточной оправки. Отработка программы показала работоспособность данной установки, поскольку был достигнут ожидаемый результат. Кольцевые канавки, выполненные с использованием данной разработки, имеют стабильный и точный профиль. Расточная оправка не содержит в себе сложных деталей и конструкций, что делает ее простой в изготовлении и доступной для использования.

### Библиографический список

1. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – Т. 2. – 496 с.
2. Козлов, А.В. Исследование процессов формообразования отверстий мерными инструментами: монография / А.В. Козлов, И.П. Дерябин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006 – 251 с.
3. Лакирев, С.Г. Математическое моделирование точности обработки глубоких отверстий концевыми мерными инструментами / С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич, А.В. Козлов // Прогрессивная технология обработки глубоких отверстий: сборник тезисов докладов 7-й Всесоюзной конф. – М.: Информатика, 1991 – С. 21–24.
4. А.с. 1373484 СССР МКИ В 23 В 35/00. Способ многопроходной обработки отверстий / С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич, А.В. Козлов № 4092586/31-08; заявл. 15.05.86; опубл. 15.02.88, Бюл. № 6.
5. А.с. 1827331 СССР МКИ В 23 В 35/00. Способ обработки некруглых валов и отверстий и устройство для его осуществления / С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич, А.В. Козлов, С.Г. Чиненов № 4922123/08; заявл. 25.03.91; опубл. 15.07.93, Бюл. № 26.

*Information about the paper in English*

**A.V. Kozlov, V.S. Vereshchagin**  
Branch of South Ural State University  
(National Research University)  
Zlatoust, Russia  
E-mail: kozlovav@susu.ru  
Received 18.12.2020

### CIRCULAR GROOVING IN DEEP BORES USING A UNIVERSAL BORING BAR

#### Abstract

The paper describes a process of circular grooving in deep bores using a universal boring bar. A theoretical rationale for a boring bar operation is provided. The paper contains results of the experiments on circular grooving in parts from aluminum alloy grade D16T on CNC lathe 16K20FZ. The experimental research proved that the suggested method could be used for circular grooving in deep bores.

**Keywords:** boring bar; bore processing; circular groove; accuracy; universality.



УДК 621.9.022

**Д.В. Терентьев, С.И. Платов,  
В.К. Белов, Е.В. Губарев**  
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова»  
г. Магнитогорск, Россия  
E-mail: ktnterentyev@mail.ru  
Дата поступления 13.12.2020

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАСЛОЕМКОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СПОСОБА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

### Аннотация

В статье представлены результаты экспериментальных исследований микрофотографии контактирующих поверхностей узлов трения, которая в свою очередь характеризует маслоемкость и толщину смазочного слоя в зоне контакта.

**Ключевые слова:** микрофотография, маслоемкость контактирующих поверхностей, толщина смазочного слоя, износ.

### Введение

Различные зубчатые передачи, а также подшипники качения, работающие в металлургических машинах и агрегатах, относятся к узлам трения, в которых между формами взаимодействующих поверхностей нет никакой геометрической связи.

При разработке таких элементов металлургического оборудования требуется учитывать параметры их эксплуатации и условия трения. Известно, что наиболее рациональные условия трения между трущимися поверхностями возникают при жидкостном или смешанном трении с преимуществом долей жидкостного.

Основным источником возникновения жидкостного трения в тяжело нагруженных узлах технологического оборудования является эластогидродинамическая пленка. При проектировании подшипниковых узлов и зубчатых передач, в которых возможна реализация режимов эластогидродинамической смазки, требуется определение толщины смазочного слоя  $h_0$  в контакте при их эксплуатации. В свою очередь, микрофотография контактирующих поверхностей, которая зависит от способа механической обработки, значительно влияет на нагнетающую способность смазочного материала в зону контакта и, соответственно, на формирование смазочного слоя

между трущимися поверхностями.

### Основная часть

Мониторинг теоретических и экспериментальных способов определения толщины смазочного слоя показывает, что основное влияние на оказывают вязкость смазочного материала, температура и скорость качения на контакте, нагрузка на единицу длины контакта. Микрорельеф контактирующих поверхностей учитывается лишь высотным параметром  $R_a$  без учета вида обработки при определении параметра  $\lambda$ , характеризующего режим трения в контакте. В тоже время, микрофотография поверхности характеризуется далеко не только высотными и шаговыми параметрами, такими как  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ ,  $S_m$ ,  $S_a$ .

В процессе эксплуатации машин и агрегатов маслоемкость контактирующих поверхностей играет важную роль при взаимодействии со смазочным материалом и, соответственно, влияет на процесс изнашивания узлов трения [1-6].

Соотношение количества материала поверхностей трения, находящегося в выступах и объема впадин между ними при определенном микрорельефе, зависит не только от высотных и шаговых параметров, но и от способа механической или другой обработки поверхностей.

Для проведения экспериментальных

исследований маслостойкости были изготовлены три пары цилиндрических образцов, финишную обработку которых осуществляли различными механическими способами: точением, шлифованием и полированием. В дальнейшем моделировали работу тел качения и взаимодействие контактирующих поверхностей с различным микрорельефом.

Для оценки поверхностных слоев роликов в НИЦ «Микротопография» МГТУ им. Г.И. Носова измеряли метрологические 3D параметры и функции микротопографии поверхности.

Измерения микротопографии производили на оптическом профилометре ConTourGTK1 (фирма Bruker, США).

Параметры микротопографии поверхности роликов измеряли с использованием стандартной программы исключения формы поверхности. Параметры микротопо-

графии фиксировали как без использования фильтров выделения SL-поверхности, так и с использованием стандартных фильтров с длинноволновой границей  $\lambda_c = 0,8$  мм и соответствующей ей коротковолновой границей  $\lambda_s = 25$  мкм. Данный режим измерения соответствует стандарту ISO 25178. Оптический профилометр обеспечивает разрешение по вертикали  $1 \text{ \AA}$ . Общий диапазон измерений по вертикали от 0.1 нм до 10 мм.

На рисунках 1-6 представлены фрагменты карт поверхности образцов в одинаковом масштабе и гистограммы распределения ординат этих поверхностей.

Характеристиками гистограмм являются амплитудные параметры  $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_{ku}$ ,  $S_{sk}$ .

Изрезанность поверхности характеризуют частотные параметры  $S_{dq}$ ,  $S_{dr}$ ,  $S_{ds}$ ,  $S_{al}$ .

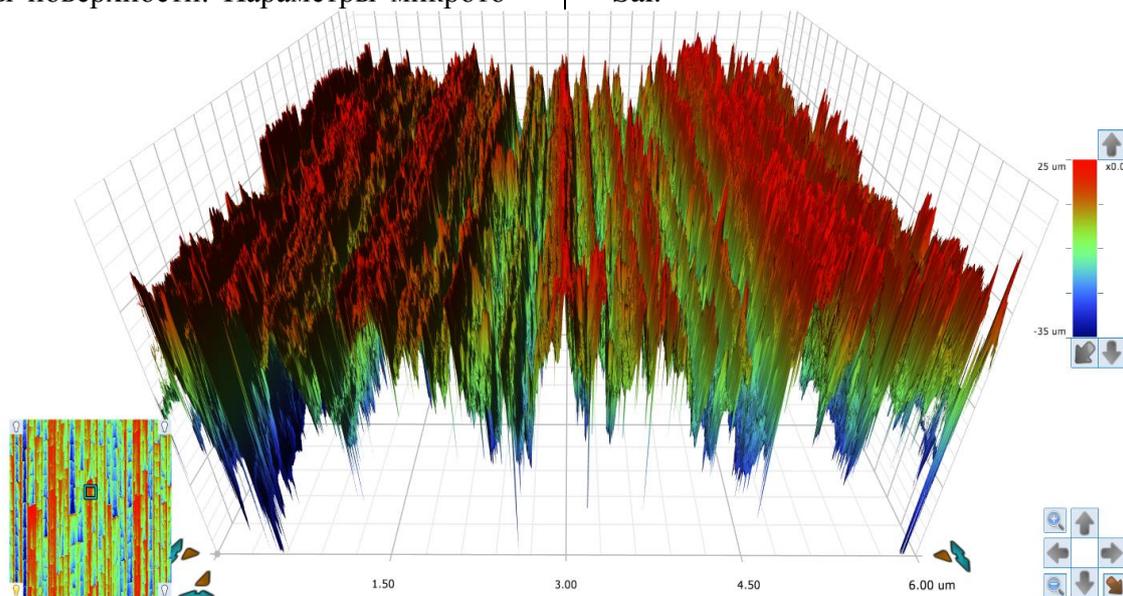


Рисунок 1. Карта поверхности ролика после токарной обработки

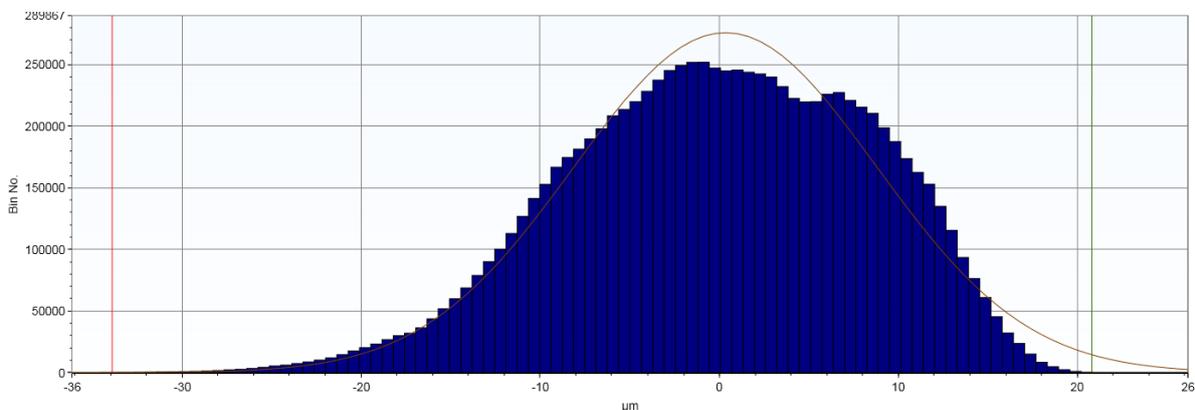


Рисунок 2. Гистограмма распределения ординат поверхности ролика после токарной обработки

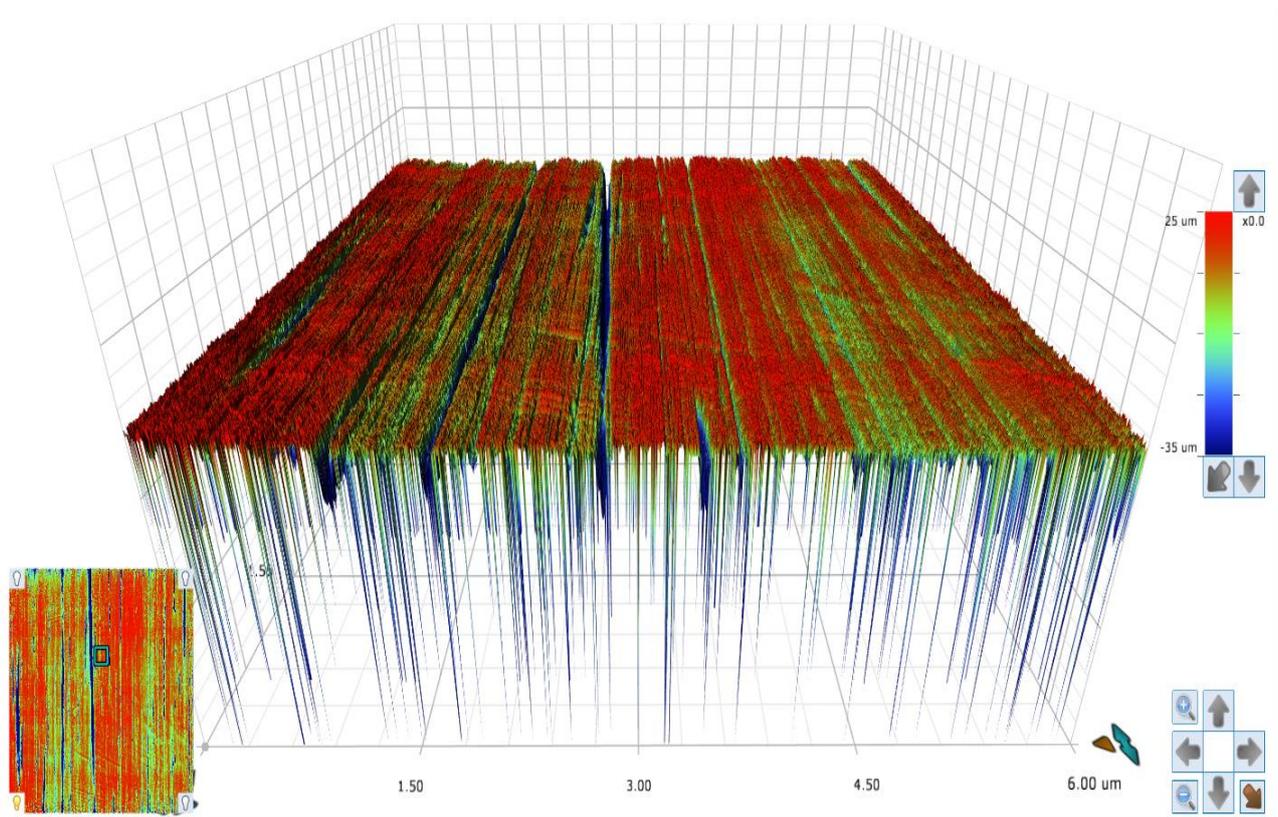


Рисунок 3. Карта поверхности ролика после шлифования

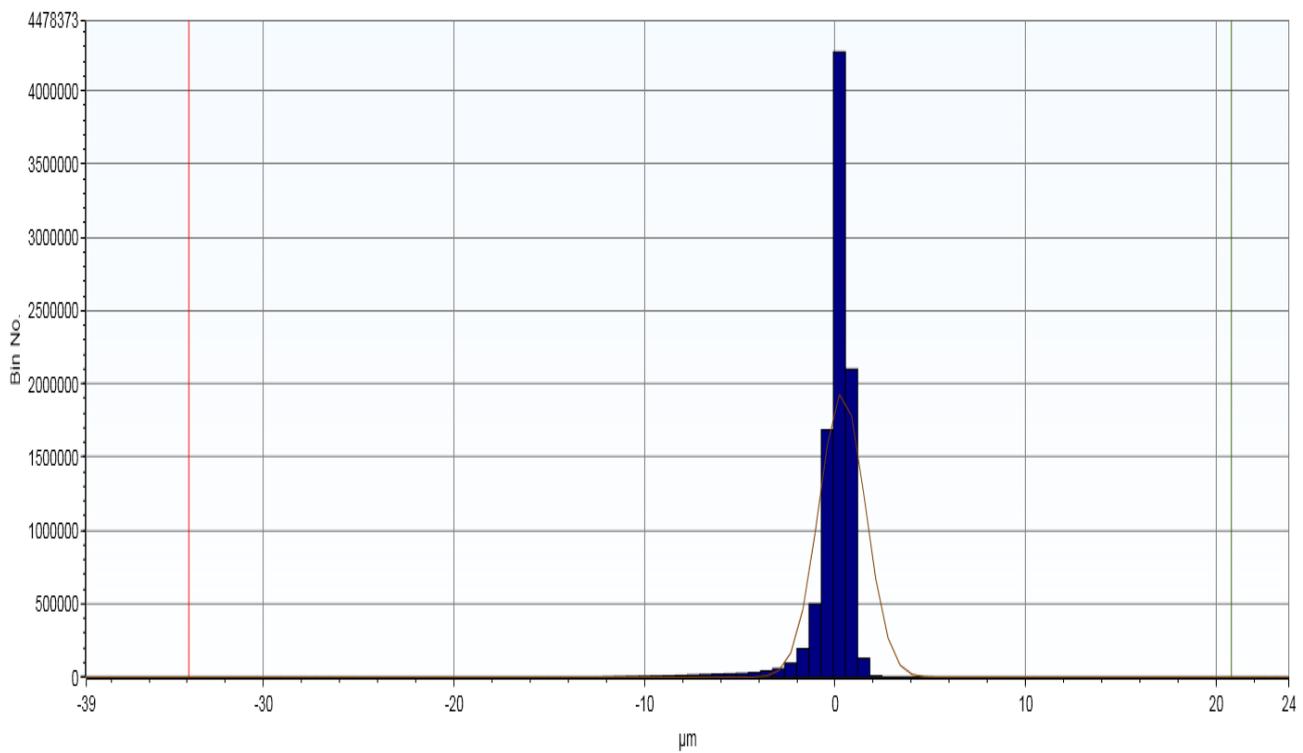


Рисунок 4. Гистограмма распределения ординат поверхности ролика после шлифования

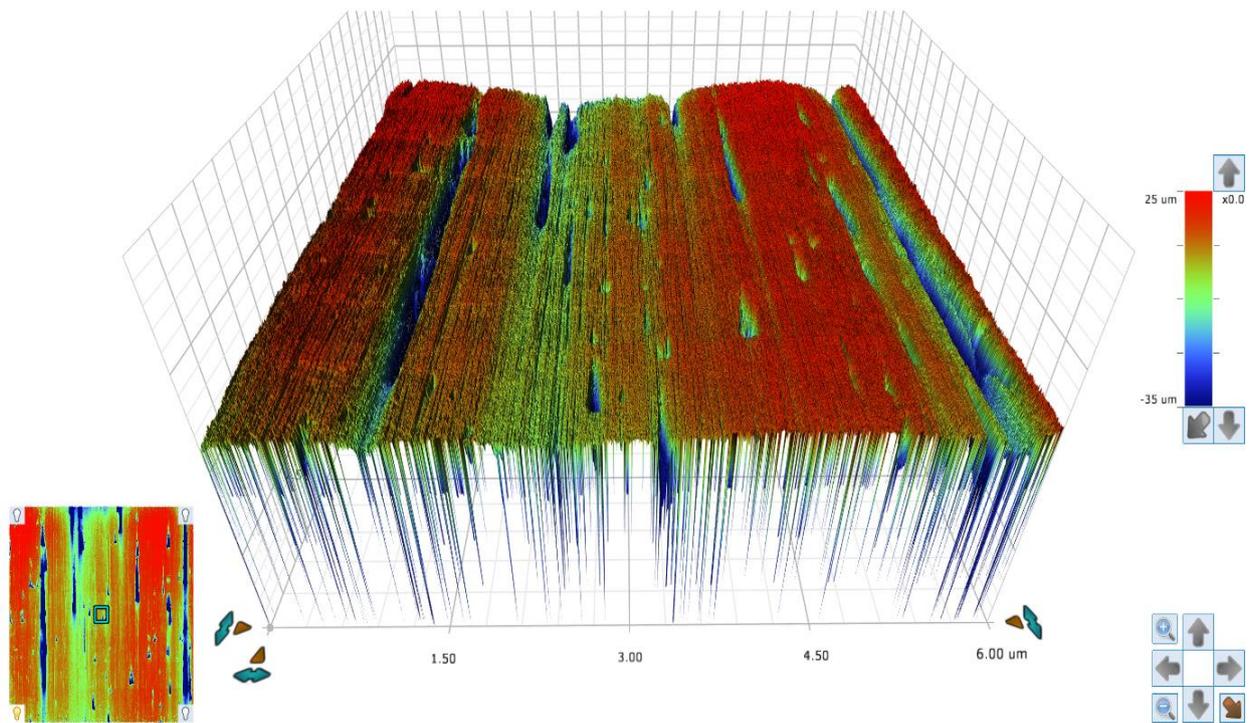


Рисунок 5. Карта поверхности ролика после полирования

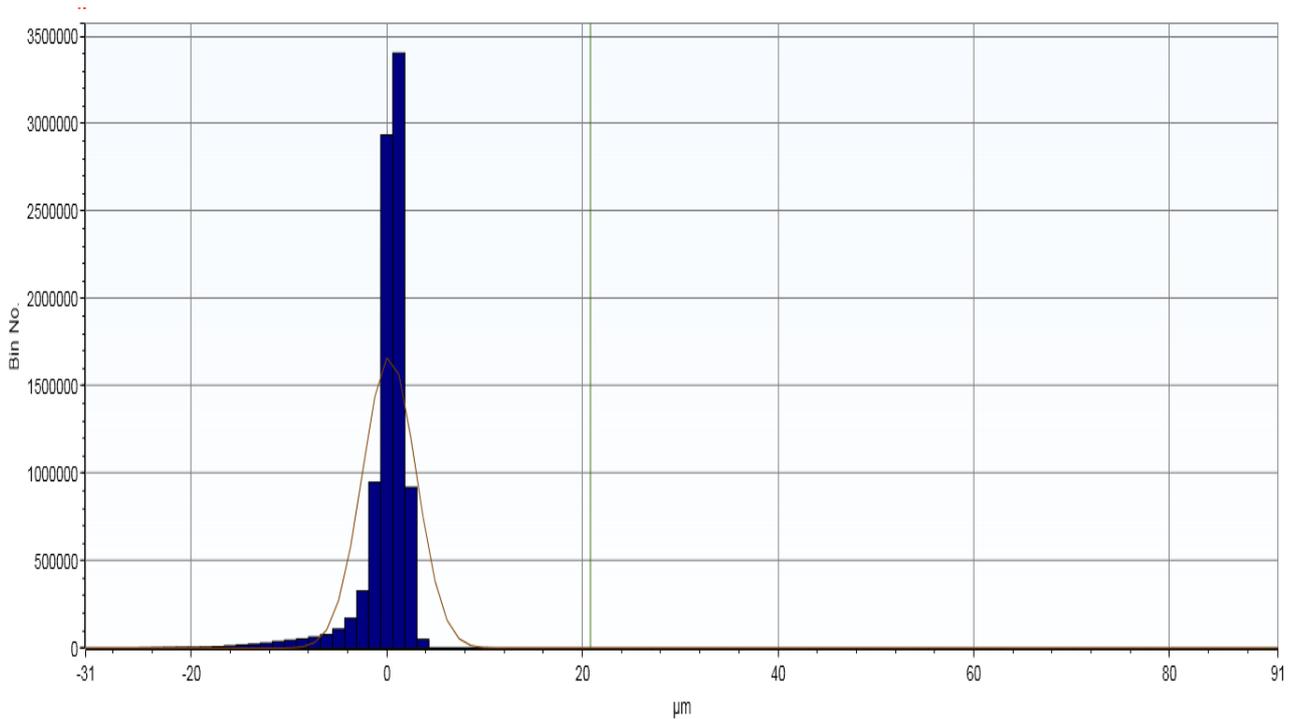


Рисунок 6. Гистограмма распределения ординат поверхности ролика после полирования

### Заключение

Анализ результатов, полученных в ходе исследования микротопографии поверхностей роликов после различных методов механической обработки показал следующее. В процессе шлифования и полирования происходят значительные (в 4-6 раз)

уменьшения амплитудных параметров шероховатого слоя  $S_a$  и  $S_q$  по сравнению с поверхностью после точения. Причем наибольшее влияние шлифования и полирования заметно в верхних и средних слоях шероховатого слоя, что приводит к большой асимметрии гистограммы распределения ординат профиля. Параметр  $S_{dr}$  с нулевых значений меняется до 4. Эти изменения

хорошо видны при сравнении поверхности после точения (см. рисунок 1) и поверхностей после шлифования и полирования (см. рисунки 3 и 5 соответственно).

Распределение ординат становится явно не гауссовским. Параметр  $S_{ku}$ , для нормального распределения равный 3, меняется до катастрофически больших значений (более 20).

Как следствие этих процессов, площадь шероховатой поверхности (параметр  $S_{dr}$ ) после шлифования и полирования уменьшается в 5 раз и объем пустот шероховатого слоя (параметр  $V_{vc}(10,80)$ ) уменьшается в 10 раз.

Следует обратить внимание на то, что количество пиков на поверхности (параметр  $S_{ds}$ ) и корреляционные длины (параметр  $S_{al}$ ) после шлифования и полирования изменяются незначительно.

Полученные в ходе экспериментальных исследований результаты в дальнейшем использовались при определении толщины смазочной пленки в узлах трения.

#### Библиографический список

1. Ковалевский, В.Ф. Триботехнические характеристики пар трения скольжения с маслоудерживающим рельефом, сформированным капельно-адгезионной технологией / В.Ф. Ковалевский // Омский научный вестник. 2013. №2. С. 78-81.
2. Пашовкин, С.А. Модель контакта шероховатых поверхностей с учетом маслостойкости в зоне контакта / С.А. Пашовкин // Известия вузов. Машиностроение. 2008. №12. С. 67-72.
3. Белов, В.К. К методике определения маслостойкости шероховатой поверхности // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: межрегион. сб. науч. тр. / В.К. Белов, М.В. Пономарев, А.В. Горбунов // Под ред. В.М. Салганика. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорского государственного технического ун-та им. Г.И. Носова, 2011. С. 220-224.
4. Ogarkov, N.N. Oil absorption capacity of the contact surfaces in metal-forming processes / N.N. Ogarkov, S.I. Platov, E.S. Shemetova, D.V. Terentev, V.A. Nekt, M.N. Samodurova // Metallurgist. – 2017. – Т. 61. – №1-2. – P. 58-62.
5. Terentyev, D.V. Effect of operating modes and contact surface oil absorption on lubricant film thickness in heavy-duty friction units of metallurgical plants / D.V. Terentyev, N.N. Ogarkov, S.I. Platov, A.V. Kozlov // Chernyemetally. – 2018. – №9. – P. 60-64.
6. Терентьев, Д.В. Разработка рациональных режимов смазывания подшипниковых узлов слябовых машин непрерывного литья заготовок / Д.В. Терентьев, С.И. Платов, Ю.В. Жиркин, Е.И. Мироненков // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2014. – №1 (190). – С. 164-168.

---

---

#### *Information about the paper in English*

**D.V. Terentiev, S.I. Platov, V.K. Belov, E.V. Gubarev**  
Nosov Magnitogorsk State Technical University  
Magnitogorsk, Russia  
E-mail: ktnterentyev@mail.ru  
Received 13.12.2020

#### EXPERIMENTAL RESEARCH ON OIL ABSORPTION CAPACITY OF SURFACES DEPENDING ON A MACHINING METHOD

#### Abstract

The paper presents experimental research on microtopography of contacting surfaces of friction units, which characterizes oil absorption capacity and lubricant film thickness in a contact zone.

**Keywords:** microtopography, oil absorption capacity of contacting surfaces, lubricant film thickness, wear.

---

---



УДК 620.193

**И.А. Стрельников, Д.А. Пестряев, Ш.В. Садетдинов**  
ФГБОУ ВО «Чувашский государственный  
университет им. И. Н. Ульянова»  
г. Чебоксары, Россия  
E-mail: strelnikov.15@mail.ru  
Дата поступления 27.10.2020

## ВЛИЯНИЕ ДИПИНАКОНБОРАТОВ НА КАЧЕСТВО МОЙКИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

### Аннотация

Важной операцией в технологии ремонтного производства является мойка деталей и узлов машин с целью очистки металлической поверхности от разного вида загрязнений. Известные синтетические моющие средства Лабомид-101, Лабомид-102, Лабомид-203, МС-6, МС-8, Темп-100, Темп-100А не обеспечивают необходимого качества мойки деталей и узлов машин в ремонтном производстве металлургических заводов. Поэтому исследования по улучшению качества мойки очищаемой металлической поверхности путем повышения, моющего и противокоррозионного свойств синтетических моющих средств (СМС) являются актуальными и востребованными. В настоящей работе рассматривается влияние дипинаконборатов лития (ДПКБЛ), натрия (ДПКБН) и калия (ДПКБЛК) на качество мойки металлической поверхности путем улучшения моющего и противокоррозионного свойства раствора Лабомид-203. Приводятся физико-химические характеристики дипинаконборатов лития, натрия и калия, которые характеризуют их как индивидуальные соединения. Исследованием влияния содержания дипинаконборатов лития, натрия, калия в составе раствора Лабомид-203 на степень очистки и смачивания металлической поверхности. Показано, что названные характеристики зависят от концентрации дипинаконбората и эффективной является концентрация 30 г/л. Установлено, что оптимальным режимом качественной мойки испытуемыми СМС с использованием дипинаконборатов являются температура 80°C при продолжительности процесса 5 минут. Коррозионная стойкость стали Ст3 к 5%-ному водному раствору Лабомид-203 дипинаконборатов и в присутствии ДПКБЛ, ДПКБН и ДПКБК концентрации 30 г/л увеличивается, что подтверждено изучением скорости коррозии стали в испытуемых СМС. На основе полученных экспериментальных данных сделано заключение, что дипинаконбораты лития, натрия и калия являются эффективными присадками к синтетическим моющим средствам и повышают качество мойки металлической поверхности. Дипинаконбораты можно рекомендовать в качестве присадок к СМС, повышающим качество мойки металлической поверхности в технологии ремонта механического оборудования металлургических заводов.

**Ключевые слова:** синтетические моющие средства, мойка деталей и узлов машин, металлургические заводы. Лабомид-203, дипинаконбораты лития, натрия, калия, концентрация 30 г/л, степень очистки и смачивания металлической поверхности, оптимальный режим мойки, температура 80°C, продолжительность мойки 5 минут, скорость коррозии стали Ст3.

### Введение

Современные металлургические заводы оснащены сложным, высокопроизводительным и дорогостоящим оборудованием. В процессе работы они теряют свои качества из-за износа и разрушения деталей, что приводит к снижению точности,

мощности и производительности оборудования. Для поддержания оборудования в нормальном состоянии необходимо производить ремонтные работы.

Технологический процесс планово-предупредительного ремонта включает раз-

борку, очистку, мойку, дефектацию, сортировку, восстановление и изготовление деталей, комплектование, сборку, испытания и окраску [1,2].

Важной операцией в технологии ремонтного производства является мойка деталей и узлов машин с целью очистки металлической поверхности от разного вида загрязнений, таких как масла, смазки, грязи, пылевые отложения и так далее. Мойку производят при помощи синтетических моющих средств (СМС) Лабомид-203, МС-8, Темп-100А, Боратфосфатных и некоторых других [3-5].

Недостатками известных синтетических моющих средств являются их низкое качество мойки металлической поверхности металла и противокоррозионное свойство. В научно-технической литературе имеются сведения о подверженности технологических средств к биопоражению, что является предметом отдельного исследования [6,7]. Для повышения моющих, противокоррозионных свойств СМС и качества мойки, к ним добавляют специальные присадки. Следует отметить, что исследования в области повышения моющего и противокоррозионного свойств СМС, а также качества мойки очищаемой металлической поверхности являются актуальными и востребованными [8-11].

Цель работы – улучшение качества мойки металлической поверхности путем повышения, моющего и противокоррозионного свойств синтетического моющего средства Лабомид-203 с использованием дипинаконборатов лития (натрия, калия).

### Основная часть

Для улучшения качества мойки металлической поверхности к водному раствору синтетического моющего средства Лабомид-203 добавляли в отдельности дипинаконбораты лития (натрия, калия).

Дипинаконборат лития (ДПКБЛ) формулы  $\text{Li}[\text{V}(\text{O}_2\text{C}_6\text{H}_{12})_2] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , дипинаконборат натрия (ДПКБН) формулы  $\text{Na}[\text{V}(\text{O}_2\text{C}_6\text{H}_{12})_2] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , дипинаконборат калия (ДПКБК) формулы  $\text{K}[\text{V}(\text{O}_2\text{C}_6\text{H}_{12})_2] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , получали путем упаривания при  $60^\circ\text{C}$  смеси монобората ще-

лочного металла и пинаконгидрата в мольном соотношении 1:2 [12]. Дипинаконбораты лития, натрия и калия – это бесцветные кристаллические вещества, составы которых установлены химическим анализом образцов. Результаты кристаллооптического исследования твердых фаз характеризуют дипинаконбораты лития, натрия и калия, как индивидуальные соединения.

Для ДПКБЛ определены: растворимость, % при  $25^\circ\text{C}$ , которая равна 3,50; плотность –  $1,148 \text{ г/см}^3$ , вычислены молекулярный и удельный объемы, равные  $280,27 \text{ см}^3/\text{моль}$  и  $0,87 \text{ см}^3/\text{г}$ , соответственно, а показатели преломления кристаллов равны  $n_g - 1,450$ ;  $n_p - 1,436$ .

Для ДПКБН определены: растворимость, % при  $25^\circ\text{C}$  – 28,51; плотность –  $1,157 \text{ г/см}^3$ , вычислены молекулярный и удельный объемы, равные  $284,19 \text{ см}^3/\text{моль}$  и  $0,86 \text{ см}^3/\text{г}$ , соответственно, а показатели преломления кристаллов равны  $n_g - 1,462$ ;  $n_p - 1,459$ .

Для ДПКБК определены: растворимость, % при  $25^\circ\text{C}$  – 50,88; плотность –  $1,184 \text{ г/см}^3$ , вычислены молекулярный и удельный объемы, равные  $298,1 \text{ см}^3/\text{моль}$  и  $0,85 \text{ см}^3/\text{г}$ , соответственно, а показатели преломления кристаллов равны  $n_g - 1,466$ ;  $n_p - 1,448$ .

Испытания по влиянию дипинаконборатов на качество мойки металлической поверхности проводили по методике, описанной в научной статье [13]. В эксперименте использовали лабораторную моечную установку и образцы из стальной пластинки Ст3 размером  $150 \times 70 \times 2$  мм. Перед испытанием поверхность образцов шлифовали с одной стороны, удаляли продукты коррозии в ингибированной кислоте, обезжиривали венской известью, промывали холодной водой и сушили между листами фильтровальной бумаги. Затем на обезжиренную поверхность образцов наносили модельное загрязнение в количестве 0,1 г равномерным слоем, выдерживали на воздухе в течение 30 минут и образцы с загрязнением взвешивали. В качестве модельного загрязнения использовали смесь отработанного моторного масла со смолистым отложением из центрифуги в соотношении 2:1.

Далее устанавливали образцы с загрязнением в моечную установку с испытуемым СМС и производили мойку при температурах раствора 20,40,60,80 и 100°С в течение 2, 3, 4, 5 и 6 минут. Образцы после мойки высушивали и взвешивали. Степень очистки металлической поверхности определяли весовым методом с вычислением процента смываемости загрязнений с поверхности металла по формуле:  $P = M_1 - M_2 / M_1 \cdot 100\%$ , где  $M_1$  – масса образца с загрязнением;  $M_2$  – масса образца после мойки. Одновременно со степенью очистки металлической поверхности испытуемыми СМС определяли и степень смачивания путем визуального фиксирования нарушения сплошности водяной пленки на поверхности металла. Смачивающая способность характеризуется временем в секундах от начала испытания до разрыва водяной пленки [14].

Так как химический состав СМС влияет на качество мойки [15] изучено влияние концентрации дипинаконборатов лития, натрия, калия на степень очистки и смачивания металлической поверхности.

Результаты исследования влияния концентрации ДПКБЛ, ДПКБН и ДПКБК в составе 5%-ного раствора Лабомида-203 при 20°С при продолжительности мойки 5 минут на степень очистки и смачивания металлической поверхности представлены на рисунке.

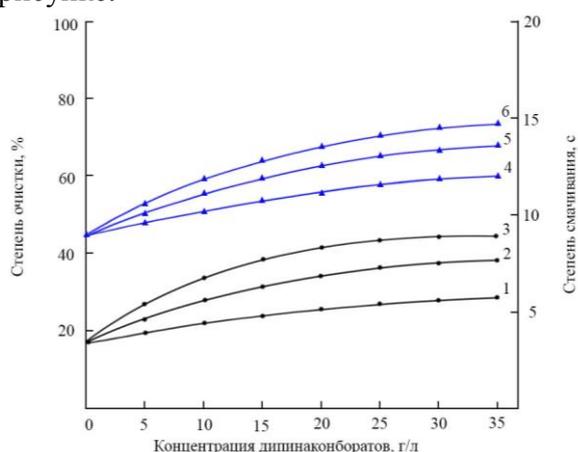


Рисунок 1. Зависимость степени очистки и смачивания металлической поверхности от концентрации дипинаконборатов в составе 5%-ного раствора Лабомида-203:

- 1,4 – 5%-ный раствор Лабомида-203+ ДПКБЛ;
- 2,5 – 5%-ный раствор Лабомида-203+ ДПКБН;
- 3,6 – 5%-ный раствор Лабомида-203+ ДПКБК

Согласно данным рисунка 1 степень очистки и смачивания металлической поверхности зависит от концентрации дипинаконбората. При концентрации 30 г/л дипинаконбората достигается наивысшее значение очистки и смачивания, а дальнейшее повышение концентрации дипинаконбората не приводит к существенному увеличению рассматриваемых показателей. Поэтому в следующих экспериментах использовали 5%-ный раствор Лабомида-203 с концентрацией дипинаконбората 30 г/л.

С учетом того, что на эффективность процесса очистки поверхности металла влияют такие технологические параметры как: продолжительность мойки и температура раствора СМС [16], проведены исследования по выявлению оптимального режима мойки загрязненной металлической поверхности.

Полученные экспериментальные данные по степени очистки и смачивания металлической поверхности при различных режимах мойки испытуемыми СМС представлены в таблице 1.

Из данных таблицы 1 видно, что дипинаконбораты лития, натрия и калия в составе 5%-ного водного раствора Лабомида-203 увеличивают степень очистки и смачивания металлической поверхности. При этом значения степени очистки и смачивания увеличиваются при добавлении дипинаконборатов в ряду ДПКБЛ < ДПКБН < ДПКБК, а также с повышением температуры от 20 до 80°С. В интервале температур раствора от 80 - 100°С значения характеризующие качество мойки уменьшаются и происходит помутнение раствора СМС. Данное явление объясняется процессом дегидратации молекул поверхностно-активных веществ и выделением в раствор молекул коллоидных частиц, что в итоге приводит к уменьшению концентрации компонентов СМС и ухудшению качества мойки [17]. Оптимальным режимом качественной мойки испытуемыми СМС являются температура 80°С при продолжительности процесса 5 минут.

Таблица 1

Степень очистки и смачивания металлической поверхности испытуемыми СМС  
при различных режимах мойки

Температура раствора, °С	Время мойки, мин	Лабомид-203		Лабомид- 203+ДПКБЛ		Лабомид- 203+ДПКБН		Лабомид- 203+ДПКБК	
		Степень очистки, %	Степень смачива- ния,с	Степень очистки, %	Степень смачива- ния, с	Степень очистки, %	Степень смачива- ния,с	Степень очистки, %	Степень смачива- ния,с
20	2	12,8	8	16,6	9	22,9	10	24,8	11
	3	13,6	9	19,5	10	25,4	11	29,8	12
	4	14,8	10	24,8	11	31,0	12	36,5	13
	5	17,4	11	28,2	12	38,6	14	44,0	15
	6	17,8	11	28,6	12	38,8	14	44,8	15
40	2	38,2	10	40,4	11	42,7	12	49,4	14
	3	41,4	11	43,5	13	46,8	14	53,3	15
	4	42,8	12	45,2	14	50,6	15	55,1	16
	5	43,5	14	47,8	15	58,0	16	67,7	17
	6	43,8	14	48,3	15	58,8	16	68,2	17
60	2	58,4	12	65,1	14	71,7	16	78,9	18
	3	60,8	13	68,8	15	74,8	17	81,2	19
	4	61,7	15	70,7	17	79,5	19	85,0	21
	5	62,9	16	73,5	18	86,6	21	88,3	22
	6	63,4	16	73,8	18	87,1	21	88,6	23
80	2	69,7	14	71,2	18	76,7	18	82,2	19
	3	71,6	15	74,6	19	80,8	19	85,7	22
	4	73,2	16	77,2	21	84,6	21	90,3	23
	5	74,3	17	80,5	23	92,0	23	98,6	25
	6	75,6	17	80,8	23	92,9	23	98,8	26
100	2	69,1	13	70,5	17	77,9	18	82,1	19
	3	68,6	12	69,6	16	76,3	16	81,5	18
	4	67,3	11	68,3	15	75,4	14	80,0	16
	5	66,5	10	67,5	14	73,6	13	78,6	14
	6	66,0	10	66,4	13	71,4	13	77,8	14

Нами также была изучена коррозионная стойкость стали Ст3 к 5%-ному водному раствору Лабомида-203 дипинаконборатов и в присутствии ДПКБЛ, ДПКБН и ДПКБК концентрации 30 г/л. Исследования скорости коррозии стали в испытуемых СМС проводили по методике, описанной в литературе [18]. Коррозионные испытания (рисунок 2) показали, что 5%-ный водный раствор Лабомида-203 проявляет относительно большую коррозионную активность. Скорость коррозии стали после 24 и 120 часов испытания в указанном растворе составляет  $52,9 \cdot 10^{-3}$  и  $25,4 \cdot 10^{-3}$  г/м<sup>2</sup>·ч, соответственно. Присутствие дипинаконборатов в 5%-ном водном растворе Лабомида-203, снижает скорость коррозии стали в изучаемых синтетических моющих средствах (см. рисунок 2).

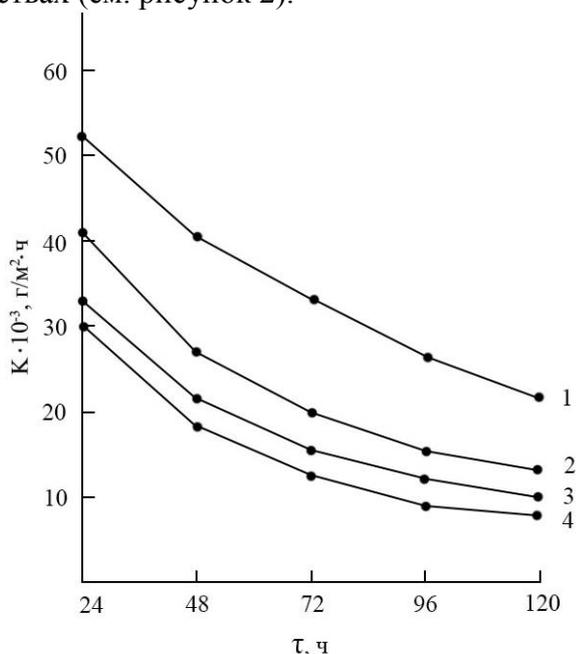


Рисунок 2. Влияние дипинаконборатов на скорость коррозии стали Ст3:  
 1 – 5%-ный раствор Лабомида-203;  
 2 – 5%-ный раствор Лабомида-203+ ДПКБЛ;  
 3 – 5%-ный раствор Лабомида-203+ ДПКБН;  
 4 – 5%-ный раствор Лабомида-203+ ДПКБК

Полученные экспериментальные данные, хорошо согласуются с известными фактами по влиянию боратных комплексов на противокоррозионные свойства синтетических моющих средств Лабомид-101, Лабомид-102, Лабомид-203, МС-6, МС-8, Темп-100, Темп-100А [19,20], которые ши-

роко используются при ремонте механического оборудования металлургических заводов.

### Заключение

На основе полученных экспериментальных данных можно заключить следующее:

- дипинаконбораты лития, натрия и калия являются эффективными присадками к синтетическим моющим средствам и повышают качество мойки металлической поверхности;
- наивысшие значения степени очистки и смачивания металлической поверхности получены при концентрации дипинаконбората 30 г/л в составе синтетического моющего средства;
- качественная мойка металлической поверхности с применением дипинаконбората достигается при температуре 80°C и продолжительности процесса 5 минут;
- дипинаконбораты снижают скорость коррозии стали в синтетических моющих средствах;
- из изученных дипинаконборатов наиболее эффективной присадкой к синтетическим моющим средствам является дипинаконборат калия;
- дипинаконбораты лития, натрия и калия можно рекомендовать в качестве присадки к СМС повышающей качество мойки металлической поверхности в технологии ремонта механического оборудования металлургических заводов.

### Библиографический список

1. Плахтин В.Д. Надежность, ремонт и монтаж металлургических машин. – М.: Металлургия. – 415 с.
2. Фадеев И.В., Ременцов А.Н., Мороз С.М., Ш.В.Садетдинов. Разработка композиции технологической жидкости для увеличения долговечности деталей и узлов транспортных средств // Вестник Московского автомобильно-

- дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2017. – № 3 (50). – С.90-97.
3. Пестряев Д.А., Садетдинов Ш.В. Повышение эффективности мойки деталей при ремонте мобильной техники в агропромышленном комплексе // В сборнике: Молодежь и инновации. Материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. – 2020. – С. 261-265.
  4. Илларионов И.Е., Садетдинов Ш.В., Фадеев И.В. Физико-химические основы разработки синтетических моющих средств на основе боратов для очистки поверхности металла // В сборнике: Современные технологии в машиностроении и литейном производстве. Материалы III Международной научно-практической конференции. – 2017. – С.8-14.
  5. Илларионов И.Е. Пестряев Д.А., Садетдинов Ш.В., Стрельников И.А. Разработка боратфосфатных моющих средств для очистки деталей металлургических машин в ремонтном производстве // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2019. – № 1(12). – С.71-75.
  6. Uspensky I.A., Fadeev I.V., Pestryaeva L.Sh., Sadetdinov Sh.V. Enhancing the antimicrobial properties of borates in coolant fluids // В сборнике : IOP Conference Series: Earth and Environmental Science The proceedings of conference AgroCON-2019. – 2019. – С.012143.
  7. Пат.2718066 Российская Федерация, МПК С 10М 125/26. Бактерицидная присадка к смазочно-охлаждающим жидкостям // Илларионов И.Е., Садетдинов Ш.В., Пестряева Л.Ш., Пешкумов О.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ «Чувашский государственный университет имени И.Н.Ульянова». № 2019124048; заявл. 23.07.2019; опубл. 30.03.2020.
  8. Пестряев Д.А., Садетдинов Ш.В., Пестряева Л.Ш. Влияние некоторых боратов на электрохимическое поведение стали в растворах синтетических моющих средств // В сборнике: Перспективы развития технического сервиса в агропромышленном комплексе. Сборник материалов Национальной (Всероссийской) научно-практической конференции, посвященной 55-летию создания кафедры технического сервиса (ремонта машин и технологии конструкционных материалов). – 2019. – С. 145-152.
  9. Пат.2680083 Российская Федерация, МПК С 11D 9/16, С 11D 3/30. Моющая композиция для очистки металлических поверхностей // Илларионов И.Е., Садетдинов Ш.В., Королев А.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ «Чувашский государственный университет имени И.Н.Ульянова». № 2018141011; заявл. 21.11.2018; опубл. 15.02.2019.
  10. Садетдинов Ш.В., Стрельников И.А., Пестряев Д.А. Аминоборатные ингибиторы коррозии механического оборудования металлургических заводов // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2020. – № 1(14). – С.18-24.
  11. Пестряев Д.А., Садетдинов, Ш.В. Противокоррозионная присадка триборатэтилендиамина к моющим средствам для агропромышленного комплекса // В сборнике: Молодежь и инновации. Материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. – 2020. – С. 261-265.
  12. Калачева В.Г., Шварц Е.М., Беньковский В.Г., Леонов И.Д. Дипинаконбораты щелочных металлов // Журнал неорганической химии. – 1970. – Т.15. – № 2. – С.401-403.
  13. Стрельников И.А., Пестряев Д.А., Садетдинов Ш.В. Влияние температуры раствора боратфосфатных моющих средств на качество очистки металла // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2019. – № 2(13). – С.23-28.
  14. Быков В.В., Загородских Б.П., Садетдинов Ш.В., Юдин В.М. Повышение эффективности мойки деталей при ремонте автомобилей // Известия Нижне-

- волжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2019. – № 1(53). – С.358-363.
15. Фадеев И.В., Садетдинов Ш.В. Влияние моноборатов лития, натрия, калия на моющие и противокоррозионные свойства синтетических моющих средств // Приволжский научный журнал. – 2015. – № 2(34). – С.86-90.
16. Быков В.В., Загородских Б.П., Ременцов А.Н., Юдин В.М. Влияние температуры растворов синтетических моющих средств на их моющую способность // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2019. – № 1(53). – С.249-255.
17. Абрамзон А.А., Котомин А.А. Моющее действие компонентов синтетических моющих средств // Журнал прикладной химии. – 2000. – Т.23. – № 11. – С.1902-1904.
18. Успенский И.А., Фадеев И.В., Пестряева Л.Ш., Садетдинов Ш.В., Казарин А.С. Новые ингибиторы коррозии для защиты сельскохозяйственной техники // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2020. – № 3(59). – С.365-376.
19. Стрельников И.А., Пестряев Д.А., Садетдинов Ш.В. Коррозионные характеристики углеродистой стали в растворах синтетических моющих средств // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2020. – Т.16. – № 3 (183). – С.112-115
20. Фадеев И.В., Ременцов А.Н., Садетдинов Ш.В. Новые боратсодержащие присадки к моющим средствам для узлов и агрегатов транспортных средств // Автотранспортное предприятие. – 2015. – № 2. – С.46-50.

---

---

*Information about the paper in English*

**I.A. Strelnikov, D.A. Pestryaev, Sh.V. Sadetdinov**  
Ulianov Chuvash State University  
Cheboksary, Russia  
E-mail: strelnikov.15@mail.ru  
Received 27.10.2020

EFFECT OF DIPINAKONBORATES ON THE QUALITY OF METAL SURFACE CLEANING

**Abstract**

A crucial operation of a repair process is cleaning machine parts and units to remove various types of dirt from metal surfaces. Well-known detergents, such as Labomid-101, Labomid-203, MC-6, MC-8, Temp-100, Temp-100A, do not ensure the required quality of cleaning machine parts and units, when repairing metallurgical plants. Thus, research on improving the quality of washing a metal surface to be cleaned by increasing cleaning and anti-corrosion properties of detergents is currently relevant and essential. This paper describes the effect of lithium, sodium and potassium dipinakonborates on the quality of cleaning the metal surface by improving cleaning and anti-corrosion properties of Labomid-203. The authors state physical and chemical characteristics of lithium, sodium and potassium dipinakonborates, which characterize them as individual compounds. The research on the effect of the content of lithium, sodium and potassium dipinakonborates in Labomid-203 solution on the level of cleaning and wetting the metal surface showed that the said characteristics depended on the dipinakonborate concentration. The efficient concentration is 30 g/l. It was found that an optimum mode of the thorough cleaning with the detergents under study with dipinakonborates was 80°C within 5 minutes. There is an increase in corrosion resistance of steel St3 to a 5% water solution of Labomid-203 dipinakonborates and in the presence of lithium, sodium and potassium dipinakonborates with a concentration of 30 g/l. This is proved by studying the steel corrosion rate in the detergent under tests. The experimental data showed that lithium, sodium and potassium dipinakonborates were efficient additives to detergents and increased the quality of metal surface cleaning. Dipinakonborates may be recommended as additives to the detergents increasing the quality of metal surface cleaning, when repairing mechanical equipment of metallurgical plants.

**Keywords:** detergents, cleaning machine parts and units, metallurgical plants, Labomid-203, lithium, sodium and potassium dipinakonborates, concentration of 30 g/l, level of cleaning and wetting the metal surface, optimum cleaning mode, 80°C, cleaning within 5 minutes, corrosion rate of steel St3.

---

---



УДК 531.43/46

Виктор В. Точилкин<sup>1</sup>, З.В. Камалихина<sup>1</sup>,

И.В. Котов<sup>2</sup>, Василий В. Точилкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова»  
г. Магнитогорск, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС»  
г. Москва, Россия

E-mail: toch56@mail.ru

Дата поступления 11.12.2020

## РАЗВИТИЕ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ РАЗЛИВКИ СТАЛИ СИСТЕМЫ СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫЙ КОВШ - ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ КОВШ - КРИСТАЛЛИЗАТОР МНЛЗ

### Аннотация

В работе представлен анализ конструктивных особенностей и работы узла промежуточного ковша (ПК), обеспечивающего перемещение жидкой стали в кристаллизатор в разливочных устройствах ковша машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Совершенствование оборудования и методик анализа работы конструкций, обеспечивающих продвижение жидкого металла в кристаллизаторы сортовой МНЛЗ обеспечивает рациональное движение жидкого металла и получение заготовок в соответствии с заданными характеристиками. Представлены процессы управления потоками жидкой стали системы ПК - кристаллизатор. Рассмотрено огнеупорное оборудование в указанной системе. Разработка и использование конструкций комплектов обеспечивает эффективное гашение воронки, возникающей над разливочными отверстиями промежуточного ковша, и обеспечивают правильное формирование струй жидкого металла в ПК. Это обеспечило эффективное формирование движения жидкого металла в разливочной камере промежуточного ковша сортовой МНЛЗ и создает условия для повышения качества металла и уменьшения брака непрерывно-литых заготовок.

**Ключевые слова:** машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), промежуточный ковш (ПК), математическое моделирование, огнеупорные конструкции.

### Введение

В составе МНЛЗ важнейший комплект агрегатов и устройств - система промежуточный ковш (ПК) - кристаллизатор [1]. Его особенность - передача жидкой стали в кристаллизатор машины. Отмеченные агрегаты и устройства работают в условиях больших температур жидкого металла и требуют надежного тепло изолирования зеркала металла в ковшах. В условиях возникновения воронок над разливочным отверстием возникает необходимость исключения попадания шлаков в струю металла, перемещающуюся в кристаллизатор. Важнейшее требование к работе комплекта оборудования – выпуск непрерывно-литой за-

готовки с требуемым качеством, для обеспечения получения проката с заданными характеристиками.

### Основная часть.

#### Особенности оборудования для подачи стали в кристаллизатор

Один из определяющих элементов системы – промежуточный ковш, он обеспечивает распределение потоков жидкого металла и удаление неметаллических включений (НВ), перед разливкой стали в кристаллизаторы [2].

На рисунке 1 отмечены конструктивные особенности узла промежуточного ковша, обеспечивающего перемещение жидкой стали в кристаллизатор открытой струей.

В промежуточном ковше важнейшая камера (камеры – в случае многоручьевого ковша), обеспечивающая передачу жидкой стали в кристаллизатор - разливочная [3].

Данное перемещение жидкого металла сопровождается изменением уровня металла над отверстием (отверстиями) ковша.

Важно оценить параметры движения металла, так как в условиях вращательного движения стали над разливочным отверстием промежуточного ковша. При этом в жидкую сталь попадают частицы шлака и в заготовке возникают строчные шлаковые включения.

Поступление шлака в металл, находящийся в кристаллизаторе, приводит к дефектам заготовки [4]: «ромбичности» и т.п., а также разрыву оболочки непрерывно-литой заготовки и последующему прорыву металла в зоне вторичного охлаждения.

Над конструкциями отверстия, обеспечивающего в системе ковш – кристаллизатор подачу жидкой стали в кристаллизатор, движение потоков жидкого металла представляем в виде стабильного вращательного движения. Движение обеспечивается в системе цилиндрических координат  $r, \theta, z$ . Координата  $z$  ориентирована по оси струи стали, перемещающейся из отверстия ковша [5].

Уравнение Бернулли в пространстве движения жидкой стали в ковше можно представить в виде [5]:

$$\frac{p}{\rho g} + z + \frac{v_{\theta}^2}{2g} = const, \quad (1)$$

Дифференцируя данную зависимость по  $r$ , получаем:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -\rho v_{\theta} \frac{\partial v_{\theta}}{\partial r}. \quad (2)$$

Анализируя зависимости (1, 2) [5] для вращательного движения жидкой стали над разливочным отверстием промежуточного ковша необходимо сказать, что параметры движения - скорости  $v_r$  и  $v_z$  практически нулевые, градиент давления в окружном направлении отсутствует, а  $v_{\theta}$  не зависит от  $z$  и

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho \frac{v_{\theta}^2}{r}. \quad (3)$$

При анализе зависимостей (2) и (3) можно получить значения для соотношения скорости и радиусов

$$v_{\theta} \cdot r = const. \quad (4)$$

Можно отметить:

- По мере уменьшения радиуса  $r$  скорость увеличивается.
- Область контура над разливочным отверстием расположена в рамках радиуса  $r_m$ .
- В рамках данного радиуса давление сравнивается с давлением сжимаемой среды, в которой работает ковш.

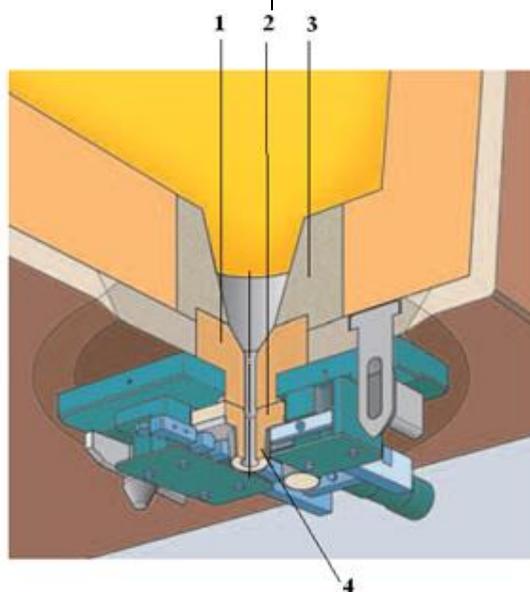


Рисунок 1. Конструктивные особенности узла промежуточного ковша, обеспечивающего перемещение жидкой стали в кристаллизатор:

1- узел ковша; 2 – корпус; 3 – торкрет-масса; 4 – втулка

Верхняя поверхность стали при безвихревом перемещении металла в разливочное отверстие можно представить в виде

$$h = h_0 - \frac{v_0^2}{2g}.$$

где  $h_0$  – номинальный уровень жидкого металла в объеме промежуточного ковша.

В результате изменения площади разливочного отверстия изменяется уровень контура поверхности жидкой стали над разливочным отверстием (см. кривую 2, рисунок 2). На вид контура поверхности в данном случае также влияет движение теплоизолирующей смеси над отверстием ковша.

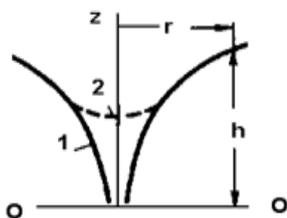


Рисунок 2. Вид движения жидкого металла над разливочным отверстием:

- 1 – верхняя поверхность стали при безвихревом перемещении металла в разливочное отверстие;
- 2 – контур поверхности жидкой стали в результате изменения проходного сечения отверстия; О-О горизонтальная поверхность над разливочным отверстием

### Моделирование работы конструкций разливочной камеры ковша

Оценка параметров движения жидкой стали в системе ковш – кристаллизатор выполнена численными методами [4, 5], здесь основное внимание уделено движения жидкости:

1. Перемещение жидкого металла по пространству промежуточного ковша;
2. Перемещение стали в системе промежуточный ковш – кристаллизатор через конструкции ковша.

Модель включает оценку геометрии конструкций ковша, его разливочного отверстия, уравнения Навье-Стокса для жидкой стали и уравнения неразрывности потока для несжимаемой жидкости [6].

Зависимости для оценки параметров движения жидкого металла:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u}, \\ \rho \nabla \vec{u} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

где  $\vec{u}$  – вектор скорости металла;  $\vec{F}$  – вектор объёмных сил;  $p$  – давление жидкой стали;  $\nabla p$  – градиент давления;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости жидкого металла;  $\nabla^2 \vec{u}$  – лапласиан  $\vec{u}$ ;  $\rho$  – плотность жидкого металла.

При анализе расчетов приняты следующие положения [7]:

1. Удельная масса жидкой стали постоянная.
2. Уровень жидкой стали в сталеразливочном ковше максимальный.
3. Уровень металла в промежуточном ковше находится на номинальном значении.

С учетом проведенного моделирования разработаны компоновка нового промежуточного ковша и отдельные элементов разливочной камеры [8], обеспечивающих уменьшение воронки вращения металла над разливочным отверстием и исключение разрыва сплошности покровного шлака над сталью в промежуточном ковше. Данные конструкции обеспечивают формирование затопленных потоков стали в объеме воронки вращения над разливочным отверстием.

### Заключение

1. Выполнен анализ работы оборудования промежуточного ковша, обеспечивающего движение разливаемого металла из камеры ковша в кристаллизатор. В процессе разливки стали, в условиях наличия вращательного движения стали над разливочным отверстием промежуточного ковша, в непрерывно-литой заготовке возникают строчные шлаковые включения. Они возникают в периоды неустановившихся процессов разливки металла: замены сталеразливочного или промежуточного ковшей, окончание периода разливки стали на машине.
2. Создано оборудование [8] исключающее формирование воронки вращения

и проникновение строчных шлаковых включений в объем жидкой стали, поступающей в кристаллизатор и далее в зону вторичного охлаждения МНЛЗ. Это значительно уменьшает число дефектов непрерывно-литой заготовки.

#### Библиографический список

1. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Технологии современной металлургии. – М.: Новые технологии, 2004. – 784 с.
2. Gushchin V.N., Ul'yanov V.A. Improved tundish refining of steel in continuous-casting machines // *Steel in Translation*. 2017. Vol. 47. № 5. – P. 320-324.
3. Совершенствование конструкций огнеупоров разливочной камеры промежуточного ковша МНЛЗ / К. Н. Вдовин, В. В. Точилкин, О. А. Филатова // *Новые огнеупоры*. – 2015. – № 9. – С. 3-7.
4. Modeling Study of Turbulent Flow in a Continuous Casting Slab Mold Comparing Three Ports SEN Designs / Ismael Calderón-Ramos, Rumualdo Servín-Castañeda, Alejandro Pérez-Alvarado [et al.] // *ISIJ International*. 2019. Vol. 59. № 1. P. 76-85.
5. Optimization of the hydrodynamic characteristics of tundishes in order to remove exogeneous nonmetallic inclusions / A. V. Kuklev, V. V. Tinyakov, Yu. M. Aizin [et al.] // *Metallurgist*. 2004. Vol. 48. № 3/4. P. 153-157.
6. Vdovin K.N., Tochilkin Vas. V., Filatova O.A, Tochilkin Vik. V. Design and methods for the numerical analyses of the refractory equipment of tundish ladle of a continuous casting machine // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2019. Volume 60, No. 4, P. 323–326. DOI. 10.1007/s11148-019-00361-7
7. Проектирование цехов сталеплавильного производства / К.Н. Вдовин, В.Ф. Мысик, В.В. Точилкин, Н.А. Чиченев. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016. – 505 с.
8. Пат. 37476 РФ, МПК7 В22D 41/00. Ковш промежуточный для непрерывной разливки металла / В.Ф. Рашников, В.Ф. Дьяченко, К.Н. Вдовин, В.В. Точилкин, В.М. Корнеев, Е.Ю. Мацко, В.С. Климов. Опубл. 27.04.2004. Бюл. № 12.

---

#### Information about the paper in English

Viktor V. Tochilkin<sup>1</sup>, Z.V. Kamalikhina<sup>1</sup>,  
I.V. Kotov<sup>2</sup>, Vasily V. Tochilkin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Nosov Magnitogorsk State Technical University  
Magnitogorsk, Russia

<sup>2</sup>MISIS National University of Science and Technology  
Moscow, Russia

E-mail: toch56@mail.ru

Received 11.12.2020

---

#### DEVELOPING STRUCTURES FOR CASTING STEEL THROUGH THE LADLE - TUNDISH - CCM MOLD

##### Abstract

The paper analyzes the design features and operation of the tundish assembly used to transfer liquid steel to the mold in pouring units of the ladle on continuous casting machines (CCM). By improving the facilities and methods of analyzing the operation of units ensuring the liquid steel flow to molds of a billet CCM, we promote a reasonable liquid steel flow and production of billets in compliance with the set parameters. The paper describes processes of controlling liquid steel flows through the tundish – mold. Refractory equipment of the stated system is described. Developing and using structures of sets ensure the efficient dissipation of the swirling effect above the casting openings of the tundish and promote well-organized flows of liquid steel in the tundish. This contributes to the efficient organization of steel flows in the casting chamber of the tundish of the billet CCM and creates conditions to improve the steel quality and reduce the number of rejected concast billets.

**Keywords:** continuous casting machine (CCM), tundish, mathematical simulation, refractory structures.

---



УДК 621.771

**В.А. Андреященко**  
Екибастузский инженерно-технический институт  
им. акад. К. Сатпаева  
г. Экибастуз, Республика Казахстан  
E-mail: Vi-ta.z@mail.ru  
Дата поступления 03.10.2020

## АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС ТОО «ПРОММАШКОМПЛЕКТ»

### Аннотация

В работе выполнен анализ качества железнодорожных колес, выпущенных ТОО «Проммашкомплект» в 2019 году, который показал, что в целом качество колес соответствует требованиям ГОСТ 10791-2011 «Колеса цельнокатаные, технические условия. Комплексный показатель качества железнодорожных колес находится в диапазоне от 0,97 до 1. С целью снижения брака рекомендовано проведение входного контроля химического состава и корректировка режима обработки на основе уточненных данных по химическому составу.

**Ключевые слова:** железнодорожное колесо, качество, химический состав, механические свойства, квалитетический анализ.

### Введение

Уровень развития железнодорожного транспорта влияет на общее развитие экономики страны. Важность железнодорожных перевозок заключается в том, что осуществляя перевозки в соответствии с запросами производства, они дают возможность нормальному развитию и функционированию всех отраслей, регионов и предприятий, работа которых зависит от своевременных перевозок, тем самым обеспечивает экономическую целостность и безопасность страны.

В Транспортной стратегии Казахстана поставлены задачи интеграции в общемировую транспортную систему, создания современной инфраструктуры, развития и эффективного использования транзитного потенциала. Основным приоритетным направлением в долгосрочной перспективе является формирование в республике полноценной, современной сети железных дорог – комфортных для трансконтинентального движения грузов, а также удобных для международного и внутреннего туризма.

Географическое положение страны создает уникальные возможности развития транзитных железнодорожных перевозок, поскольку именно через Казахстан проходят кратчайшие маршруты в Европу из

стран Юго-восточной Азии (включая Китай), из Европы в Центральную и Южную Азию.

Основной задачей колесопрокатного комплекса ТОО «Проммашкомплект» является производство железнодорожных цельнокатаных колес, бандажей, центров и шестерен большого диаметра для подвижного состава железных дорог. Оборудование предприятия позволяет производить колеса по требованиям современных стандартов (ГОСТ 10791-2011, AAR, IS) в том числе и колеса для локомотивов и высокоскоростного пассажирского подвижного состава.

Для производства продукции высокого качества применяется широкий спектр оборудования для нагрева металла перед прокаткой, с использованием электроэнергии, оборудования для прессопрокатной деформации металла, автоматизированные процессы термической обработки, полнопрофильной механической обработки поверхности колес, дробеметного упрочнения дисков колес, проведение всех видов неразрушающего контроля качества продукции. Обеспечение стабильной и безаварийной работы цеха осуществляется за счет использования в производственном процессе автоматизированных транспортных систем и роботов-манипуляторов.

Цель настоящего исследования заключается в анализе качества железнодорожных колес, производимых на ТОО «Проммашкомплект».

### Основная часть

Качество железнодорожных колес, получаемых на ТОО «Проммашкомплект» оценивалось за 2019 год. Для оценки качества была выбрана наиболее распространенная сталь для производства железнодорожных колес, эксплуатируемых на территории СНГ – колесная сталь марки 2.

Требования ГОСТ 10791-2011 [1] по химическому составу и уровню механических характеристик, каждый из которых является единичным показателем качества, приведены в таблицах 1 и 2. Выборка состояла из 234 данных сдаточных испытаний всех колес, произведенных из колесной стали марки 2 в 2019 году. Колеса отбирались по одному из партии, партия составляет 180-200 колес. Для проведения статистического анализа результатов испытаний вся выборка была проверена на нормальность. В ходе проверки выявлено, что такие элементы, как углерод, кремний, марганец, сера и фосфор имеют нормальный закон

распределения, однако статистическое распределение остальных элементов состава стали отличается от нормального распределения. Это может быть связано с их низким содержанием в стали, а также тем, что количественно с учетом погрешности прибора их содержание близко к нижнему допустимому пределу определения элемента прибором. Распределение относительной частоты появления значений механических свойств железнодорожных колес является нормальным. Это свидетельствует о том, что в данной выборке отсутствуют грубые промахи и грубые погрешности, а также ошибки, связанные с человеческим фактором и др., следовательно, такую выборку можно принять для последующего анализа.

После проверки выборки на нормальность решено перейти к анализу качества железнодорожных колес. На основе результатов сдаточных испытаний железнодорожных колес из колесной стали марки 2 построены графические карты по каждому единичному показателю качества. Для удобства проведения анализа на картах нанесены предельно допустимые границы каждого показателя качества.

Таблица 1

Требования ГОСТ 10791-2011 [1] к массовой доле элементов колесной стали марки 2, содержание в %

Химический элемент	C	Si	Mn	P
Содержание, %	0,55-0,63 <sup>+0,03</sup> <sub>-0,02</sub>	0,22-0,45±0,03	0,5-0,9 <sup>+0,05</sup> <sub>-0,03</sub>	≤0,03+0,005
Химический элемент	S	Cr	Mo	Nb
Содержание, %	≤0,025+0,05	≤0,3+0,02	≤0,08	≤0,05
Химический элемент	Ti	Ni	Cu	V
Содержание, %	≤0,03+0,006	≤0,3+0,02	≤0,3+0,03	≤0,1+0,02

Таблица 2

Требования ГОСТ 10791-2011 [1] к механическим свойствам железнодорожных колес из колесной стали марки 2

Определяемая характеристика (параметр)	Ед. изм.	Значение параметра
Временное сопротивление обода $\sigma_B$	МПа	910-1110
Относительное удлинение обода $\delta$	%	не менее 8
Относительное сужение обода $\psi$		не менее 14
Ударная вязкость диска КСУ, при +20°C	Дж/см <sup>2</sup>	не менее 20
Твердость обода на глубине 30 мм	НВ	≥255
Твердость обода в точке А		твердость должна быть ниже твердости на глубине 30 мм от поверхности катания не менее чем на 15 НВ

Анализ полученных данных по химическому составу стали железнодорожных колес показал, что все (кроме углерода) элементы химического состава стали находятся в рамках регламентируемых ГОСТ 10791-2011 диапазонов. Количество углерода для некоторых колес выходит за требуемый диапазон значений (рисунок 1). При этом наблюдается как превышение по количеству углерода, так и пониженное его содержание. Стоит отметить, что отклонение в количестве углерода не сопровождается отклонением по другим химическим элементам. В целом кремний и марганец находятся в диапазоне, смещенном к верхней допустимой границе. Как следует из анализа литературных данных, повышенное в допустимом диапазоне количество кремния способствует росту характеристик прочности при неизменном уровне пластичности. При этом такие вредные примеси, как сера и фосфор находятся существенно ниже допустимого диапазона значений. Такой уровень этих элементов исключает образование микро- и макроструктурных дефектов, и существенной ликвации. Предположительно, сталь с пониженным содержанием вредных примесей должна показывать хорошие данные по количеству неметаллических включений в структуре металла. Сталь имеет весьма низкое содержание таких элементов, как титан, ванадий, ниобий. Распределение этих элементов при анализе показало отклонение от нормального закона распределения.

Как отмечено выше, отклонения по углероду можно разделить на две основные группы. Первая группа с повышенным количеством углерода, вторая группа с пониженным количеством углерода. В целом 4% железнодорожных колес имеют завышенное количество углерода и 2% от всех произведенных колес имеют заниженное по углероду количество. Стоит отметить, что максимальное значение углерода не превышает 1 относит. % от верхнего значения и находится в пределах погрешности измерения, которая составляет 0,04. Минимальное

значение углерода отличается от номинального значения также не более чем на 1 относит. %, и, аналогично, находится в пределах погрешности измерения. Таким образом, можно сделать вывод о практически полном соответствии химического состава стали регламентируемым параметрам.

Так как непрерывнолитые заготовки для производства железнодорожных колес приобретаются, а не производятся на данном предприятии, то по металлургическому признаку выработка рекомендаций не требуется и имеет смысл перейти к оценке качества механических характеристик произведенных железнодорожных колес. Уровень механических характеристик железнодорожных колес показан на рисунке 2.

В целом механические характеристики железнодорожных колес соответствуют требованиям ГОСТ 10791-2011. Однако результаты анализа показали, 13 колес имеют отклонения по уровню временного сопротивления, что составляет 6% от общего количества произведенных железнодорожных колес. При этом во всех случаях отклонения относятся к заниженным значениям предела прочности. Максимальное отклонение значений временного сопротивления составляет 12%. При этом стоит отметить, что величина отклонения от регламентируемого уровня предела прочности существенно превышает величину погрешности измерения. По остальным показателям механические характеристики находятся в допустимых пределах.

Также в результате анализа выявлены отклонения по величинам твердости на глубине 30 мм от обода колеса. Отклонения имеют 3 колеса, что составляет около 1% от всех колес. Максимальное отклонение составляет 6% от нормированного показателя. Стоит отметить, что отклонения по значениям твердости имеют колеса, не имеющие отклонений по другим показателям качества.

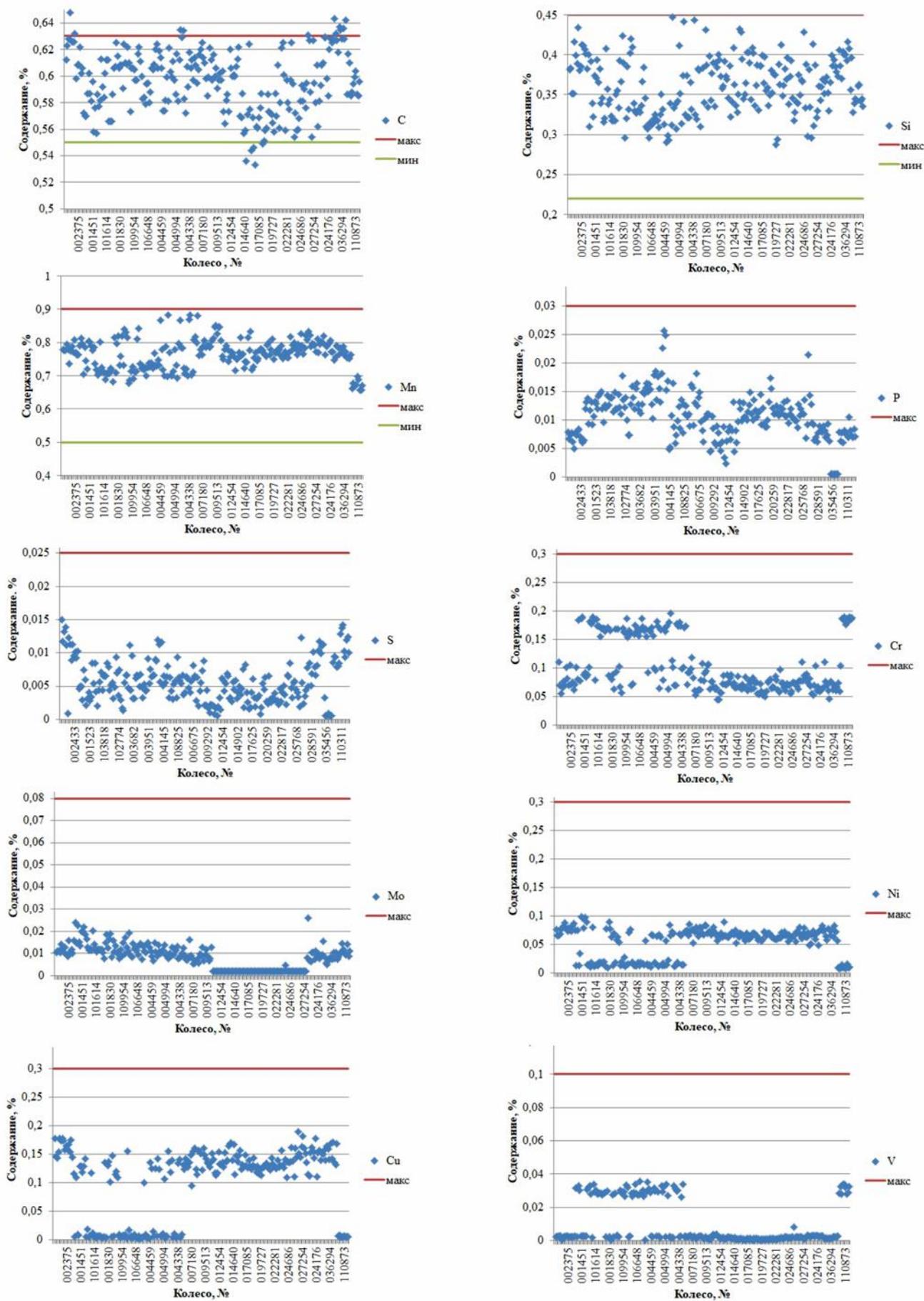


Рисунок 1. Графические карты распределения химического состава

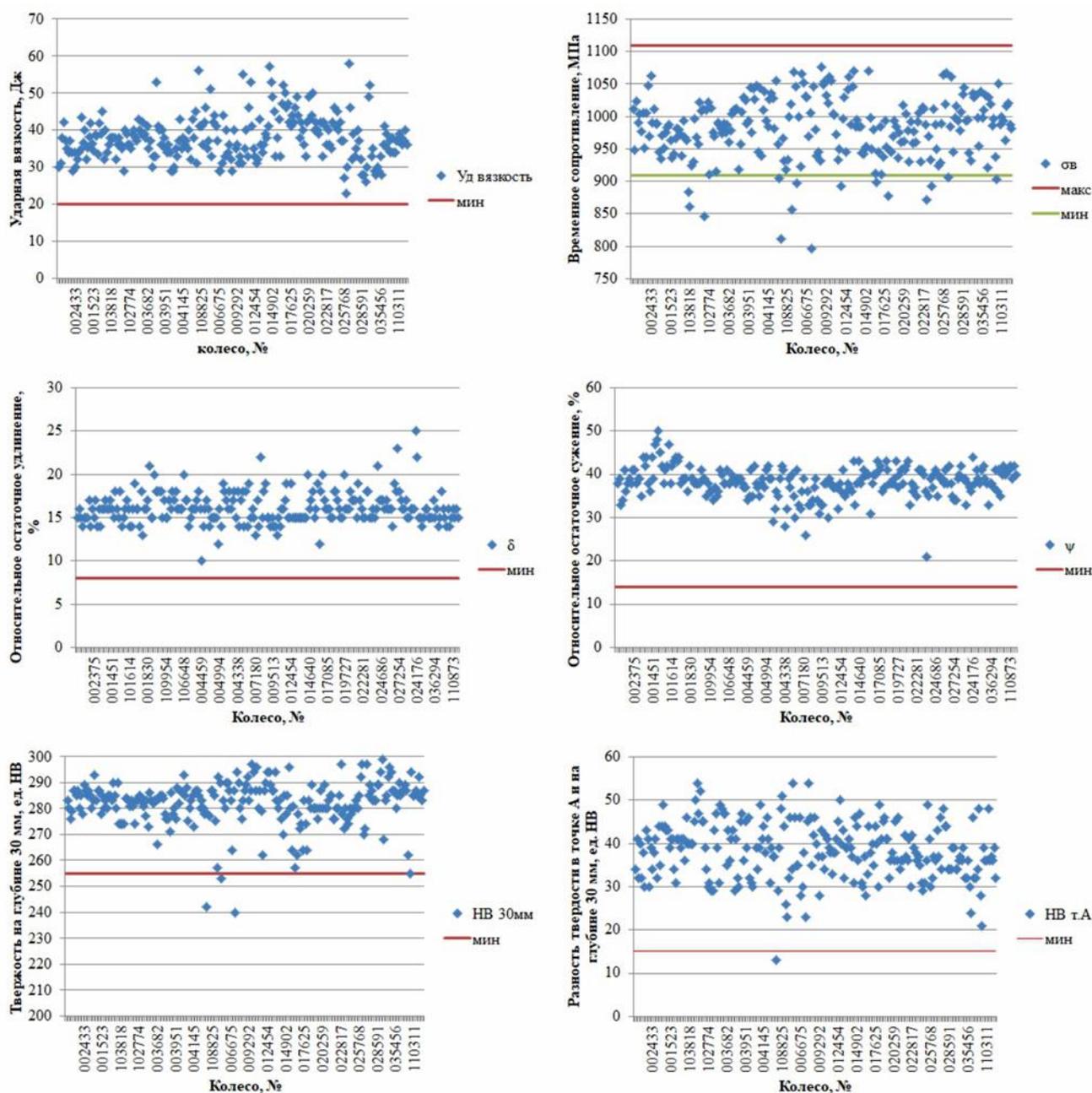


Рисунок 2. Графические карты распределения механических свойств

Для оценки качества воспользуемся построением обобщенного показателя качества. С этой целью частные отклики обобщим, воспользовавшись формулой (1) [2]:

$$Y_i = \sqrt[N]{\prod_{N=1}^N y_{ui}}, \quad (1)$$

где  $Y_i$  – обобщенный показатель качества для каждого исследуемого железнодорожного колеса;

$\prod_{N=1}^N y_{ui}$  – произведение частных откликов;

$y_{ui}$  – частные отклики.

Такое обобщение частных откликов возможно только в случае перевода частных откликов в безразмерные величины. Для каждого частного отклика введем следующие преобразования:

$$C = \begin{cases} 1, & \text{если } 0,55 \leq C \leq 0,63 \\ 0, & \text{если } C < 0,55 \text{ и } C > 0,63 \end{cases}$$

$$Si = \begin{cases} 1, & \text{если } 0,22 \leq Si \leq 0,45 \\ 0, & \text{если } Si < 0,22 \text{ и } Si > 0,45 \end{cases}$$

$$Mn = \begin{cases} 1, & \text{если } 0,5 \leq Mn \leq 0,9 \\ 0, & \text{если } Mn < 0,5 \text{ и } Mn > 0,9 \end{cases}$$

$$P = \begin{cases} 1, & \text{если } P \leq 0,03 \\ 0, & \text{если } P > 0,03 \end{cases}$$

$$S = \begin{cases} 1, & \text{если } S \leq 0,025 \\ 0, & \text{если } S > 0,025 \end{cases}$$

$$Cr = \begin{cases} 1, & \text{если } Cr \leq 0,3 \\ 0, & \text{если } Cr > 0,3 \end{cases}$$

$$Mo = \begin{cases} 1, & \text{если } Mo \leq 0,08 \\ 0, & \text{если } Mo > 0,08 \end{cases}$$

$$Nb = \begin{cases} 1, & \text{если } Nb \leq 0,05 \\ 0, & \text{если } Nb > 0,05 \end{cases}$$

$$Ti = \begin{cases} 1, & \text{если } Ti \leq 0,03 \\ 0, & \text{если } Ti > 0,03 \end{cases}$$

$$Ni = \begin{cases} 1, & \text{если } Ni \leq 0,3 \\ 0, & \text{если } Ni > 0,3 \end{cases}$$

$$Cu = \begin{cases} 1, & \text{если } Cu \leq 0,3 \\ 0, & \text{если } Cu > 0,3 \end{cases}$$

$$V = \begin{cases} 1, & \text{если } V \leq 0,1 \\ 0, & \text{если } V > 0,1 \end{cases}$$

$$\sigma_B = \begin{cases} 1, & \text{если } 910 \leq \sigma_B \leq 1110 \\ 0, & \text{если } \sigma_B < 910 \text{ и } \sigma_B > 1110 \end{cases}$$

$$\delta = \begin{cases} 1, & \text{если } \delta \geq 8 \\ 0, & \text{если } \delta < 8 \end{cases}$$

$$\psi = \begin{cases} 1, & \text{если } \psi \geq 14 \\ 0, & \text{если } \psi < 14 \end{cases}$$

$$KCU = \begin{cases} 1, & \text{если } KCU \geq 20 \\ 0, & \text{если } KCU < 20 \end{cases}$$

$$НВ = \begin{cases} 1, & \text{если } НВ \geq 255 \\ 0, & \text{если } НВ < 255 \end{cases}$$

$$\Delta НВ = \begin{cases} 1, & \text{если } \Delta НВ \geq 15 \\ 0, & \text{если } \Delta НВ < 15 \end{cases}$$

Преобразовав частные отклики по приведенным выше условиям (регламентированы ГОСТ 10791-2011) получили значения частных откликов для каждого анализируемого колеса. В случае если хотя бы один из показателей качества не удовлетворяет требуемым условиям, то обобщенный показатель качества обращается в 0. В случае, когда все анализируемые характеристики находятся в заданном диапазоне, обобщенный показатель качества равен 1. Таким образом, обнаружено, что годными по химическому составу являются 92% исследованных колес, по механических свойствам – 93%, и полностью годными по всем показателям являются 86% железнодорожных колес.

Следующим этапом анализа является построение «Дерева свойств» [3] с определением коэффициентов весомости (таблица 3). Коэффициенты весомости были назначены при помощи экспертного метода.

Для перевода единичных показателей качества в нормированные показатели качества воспользовались методикой, приведенной в работе [4]. Был определен обобщенный показатель качества  $K_o$  для всех железнодорожных колес, произведенных на ТОО «Проммашкомлект» в 2019 году, а также показатели качества с ранжированием по группе показателей качества: показатель качества по химическому составу, механическим свойствам, а также показатель качества структуры стали. Результаты распределения показателя качества по количеству появлений показаны на рисунке 3.

Таблица 3

Иерархическая совокупность свойств железнодорожных колес  
из колесной стали марки 2

$i=0$	$i=1$	$i=2$
Качество железнодорожных колес – $K_0$	Химический состав $k_{1.1}; \alpha=0,3$	C (углерод) $r_{2.1}; \alpha=0,2$
		Si (кремний) $r_{2.2}; \alpha=0,2$
		Mn (марганец) $r_{2.3}; \alpha=0,1$
		Величина углеродного эквивалента ( $C_{ЭКВ}$ ) $r_{2.4}; \alpha=0,5$
	Механические свойства $k_{1.2}; \alpha=0,4$	Временное сопротивление обода $\sigma_B$ $r_{2.5}; \alpha=0,1$
		Относительное удлинение обода $\delta$ $r_{2.6}; \alpha=0,1$
		Относительное сужение обода $\psi$ $r_{2.7}; \alpha=0,1$
		Ударная вязкость диска КСУ, при +20°C $r_{2.8}; \alpha=0,1$
		Твердость обода на глубине 30 мм $r_{2.9}; \alpha=0,3$
		Твердость обода в точке А $r_{2.10}; \alpha=0,3$
	Структура стали $k_{1.3}; \alpha=0,3$	Микроструктура $r_{2.11}; \alpha=0,5$
		Макроструктура $r_{2.12}; \alpha=0,5$

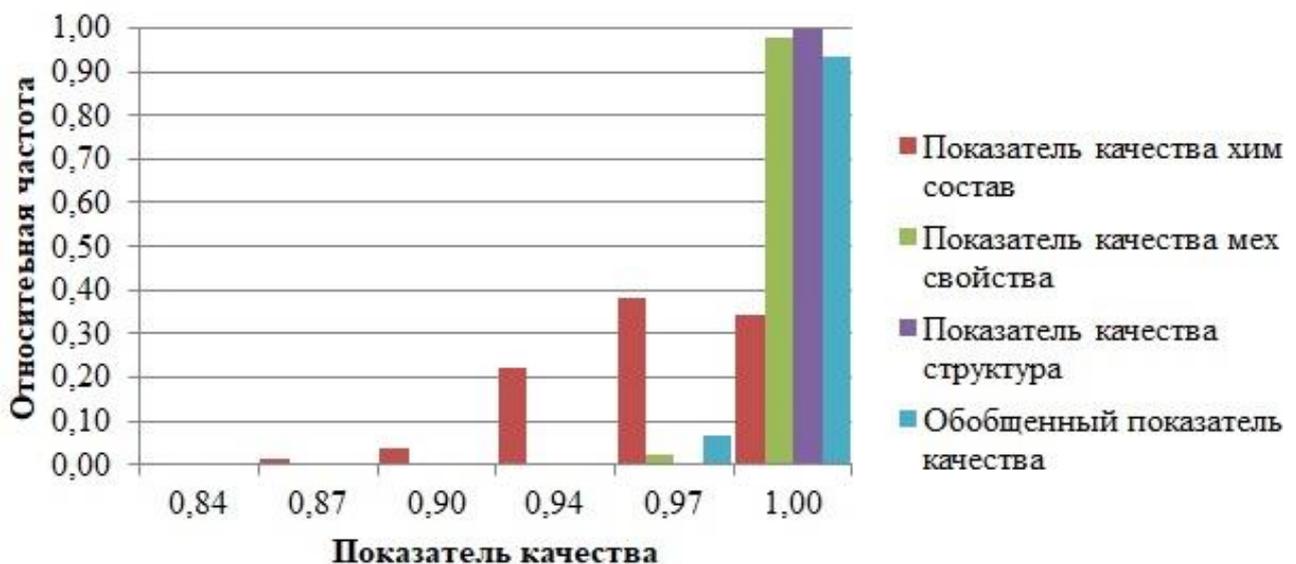


Рисунок 3. Показатель качества железнодорожных колес

Анализ результатов значений показателя качества показал, что наибольшее отклонение наблюдается по химическому составу. При этом распределение является нормальным. Показатель качества по химическому составу находится в диапазоне от 0,84 до 1. Показатель качества по механическим характеристикам находится в диапазоне от 0,97 до 1. Отклонений от идеальных показателей качества по микроструктуре не выявлено. Таким образом, наибольшее влияние на обобщенный показатель качества  $K_0$  оказывает химический состав стали. Отклонение качества по химическому составу вызывает его снижение в наибольшей степени, при этом обобщенный показатель качества  $K_0$  находится в пределах от 0,97 до 1.

### Заключение

Анализ качества железнодорожных колес, выпущенных ТОО «Проммашкомплект» в 2019 году показывает, что в целом качество колес соответствует требованиям ГОСТ 10791-2011 «Колеса цельнокатаные, технические условия. Комплексный показатель качества железнодорожных колес находится в диапазоне от 0,97 до 1. Максимальный вклад в отклонения от единицы вносит химический состав стали. В ряде случаев отклонения по химическому составу вызывают отклонения по механическим свойствам. Отбраковка продукции по

уровню механических характеристик составляет 1,5% от общего количества произведенных железнодорожных колес за 2019 год. Таким образом, с целью снижения брака рекомендовано проведение входного контроля химического состава и корректировка режима обработки на основе уточненных данных по химическому составу.

### Библиографический список

1. ГОСТ 10791-2011. Колеса цельнокатаные, технические условия. В 2012–01–01. М.: Стандартиформ. 2011. 27 с.
2. Зорин В.А., Павлов А.П., Пегачков А.А. Контроль качества продукции и услуг: Учебное пособие. М.: МАДИ (ГТУ), 2007. 82с.
3. Комплексная оценка качества арматурного проката, производимого в условиях АО «АМТ» / Кривцова О.Н., Гун Г.С., Кузьмина Н.Ю., Панин Е.А., Насонов А.И. // Качество в обработке материалов. 2015. №2 (4). С. 18-23.
4. Оценка качества арматурной стали СПЦ АО «АМТ» / Кривцова О.Н., Панин Е.А., Кузьмина Н.Ю., Насонов А.И. // Современная металлургия начала нового тысячелетия. К 80-летию НЛМК: сб.науч.тр. МНПК. 2014.Ч.2 С. 26-33.

---

### *Information about the paper in English*

V.A. Andreyashchenko  
Satpayev Ekibastuz Engineering and Technical Institute  
Ekibastuz, Kazakhstan  
E-mail: Vi-ta.z@mail.ru  
Received 03.10.2020

### ANALYSIS OF THE QUALITY OF RAILWAY WHEELS PRODUCED BY LLP PROMMASHKOMPLEKT

#### Abstract

The paper analyzes the quality of railway wheels produced by LLP Prommashkomplekt in 2019 in general compliance with GOST 10791-2011 “Wrought steel railway wheels. Specifications.” An integrated quality factor was within a range of 0.97 to 1. To reduce the amount of rejected products, it is recommended to carry out an incoming control of chemistry and adjust the treatment schedule using updated information about the chemistry.

**Keywords:** railway wheel, quality, chemistry, mechanical properties, qualimetric analysis.

---



УДК 621.771

**В.Д. Шипица, М.Ю. Чернявский**  
ОАО «Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания» (ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»)  
г. Жлобин, Республика Беларусь  
E-mail: nti.to@bmz.gomel.by  
Дата поступления 04.09.2020

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫРЕЗКИ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ГОРЯЧЕКАТАНЫХ БЕСШОВНЫХ ТРУБ

### Аннотация

В статье предлагается описание специального приспособления для фиксации патрубков на ленточнопильном станке при изготовлении образцов из стальных бесшовных горячекатаных труб для проведения лабораторных испытаний и исследований. Приспособление разработано и изготовлено на участке подготовки проб трубной лаборатории Центральной заводской лаборатории ОАО "БМЗ-управляющая компания холдинга "БМК".

Конструкция приспособления позволяет надежно фиксировать на станке образцы труб различных типоразмеров; передвигать их на рабочем столе пилы в горизонтальном направлении на расстояние, необходимое для обеспечения точной длины изготавливаемого образца, а также устанавливать точную ширину полосы; обеспечивать вырезку образцов без уклона по направлению проката, соблюдать параллельность противоположных сторон заготовки, что является обязательными требованиями к изготовлению образцов на растяжение, ударную вязкость, твердость, прокаливаемость.

Работа на ленточнопильном станке с применением данного приспособления обеспечивает необходимую точность образцов без использования измерительных устройств, позволяет исключить операцию фрезерования заготовок после вырезки на ленточнопильном станке, сокращает время на шлифовку образцов, что значительно ускоряет процесс изготовления образца, а значит и время, затраченное на испытания в целом.

**Ключевые слова:** бесшовные горячекатаные трубы, изготовление образцов для испытаний, ленточнопильный станок, патрубок, специальное приспособление для фиксации, литая пластина, сегмент трубы, упоры, поворачивающиеся кулачки.

### Введение

Трубная лаборатория Центральной заводской лаборатории «БМЗ-управляющая компания холдинга «БМК» проводит в среднем 3,5 тысячи различных физико-механических испытаний и металлографических исследований стальных горячекатаных бесшовных труб диаметром от 21,3 до 168,3 мм с толщиной стенки в диапазоне 2,3 ÷ 25,0 мм из более чем 100 марок сталей. Лаборатория оснащена современным испытательным оборудованием, позволяющим с высокой точностью и достоверностью определять прочностные и пластические характеристики труб, в том числе и при высокой температуре, измерять твердость металла различными методами, определять

прокаливаемость труб после термообработки [1], проводить испытания на раздачу и бортование, определять работу удара, рассчитывать ударную вязкость, определять долю вязкой составляющей в изломе [2]. Металлографический участок лаборатории проводит исследования макро и микроструктуры труб как в горячекатаном состоянии, так и после различных видов термообработки. Сдаточные металлографические испытания труб предполагают оценку загрязненности стали неметаллическими включениями как по ГОСТ 1778, так и по методам ISO, ASTM, DIN.

Первым шагом к обеспечению точности и достоверности результатов испытаний является этап изготовления образцов

на станочном участке лаборатории из предоставленных трубопрокатным цехом проб труб – патрубков. Изготовление образцов - длительный и трудоёмкий процесс. Сложность процесса усугубляется широким спектром типоразмеров труб из различных марок сталей различного назначения, одновременно поступающих на участок. Методики испытаний предъявляют к образцам высокие требования по форме, точности геометрических размеров, к чистоте поверхности. Необходимо также исключить нагрев и подкалку образцов в процессе изготовления. При этом станочник ограничен во времени. Время, затраченное на изготовление образцов, зачастую определяет своевременность выдачи результатов испытаний, что немаловажно в реальных производственных условиях.

### Основная часть

Рассмотрим процесс подготовки поэтапно на примере изготовления образцов в виде полосы (сегмент) для испытания на растяжение. Первая операция - вырезка черновой заготовки – полосы из патрубка. В зависимости от типоразмера испытуемой трубы заготовка имеет фиксированную ширину, продольная ось заготовки должна строго соответствовать направлению прокатки, противоположные стороны полосы должны быть параллельны друг другу. Операция вырезки выполняется на ленточнопильном станке TMJ PILOUS PP 362 (рисунок 1), стандартная комплектация которого не предусматривает специальное крепление круглых заготовок, в нашем случае патрубков. На пиле также отсутствует специальная система, позволяющая передвигать патрубок на фиксированное расстояние в горизонтальном направлении для вырезки полосы в заданный размер. Приходится после первого реза полосы вручную пере закреплять патрубок в гидравлических тисках и использовать металлическую линейку для установки определенной ширины вырезаемой полосы, что не всегда обеспечивает необходимую точность и требует определенного времени.

Операция 2 – черновая обработка заготовки - полосы в размер на фрезерном

станке и операция 3 – чистовая обработка образца на плоскошлифовальном станке.

Специалистами трубной лаборатории было разработано и изготовлено специальное приспособление для крепления патрубков в ленточнопильном станке, которое устанавливается на горизонтальный стол пилы. Приспособление обеспечивает надежную фиксацию патрубков различных типоразмеров, позволяет передвигать образец в горизонтальном направлении на строго фиксированное расстояние, обеспечивает продольность и параллельность образца.



Рисунок 1. Общий вид ленточнопильного станка TMJ PILOUS PP 362

Приспособление представляет собой прямоугольную стальную литую пластину размером 220×400×10 мм. На пластину с помощью двух болтов крепится так называемый желоб, изготовленный из разрезанной вдоль трубы. После установки патрубка в желоб производится его фиксация гидравлическими тисками станка, что исключает проворачивание патрубка во время реза. Желоб позволяет надежно фиксировать патрубок близких диаметров. При значительном уменьшении диаметра патрубка необходимо закрепить в желобе вставку соответствующего размера. Вставки также изготовлены из продольно разрезанных труб нужного диаметра. Общий вид составных частей приспособления приведен на рисунке 2.

Для получения полосы - заготовки с параллельными стенками после первого реза конструкция перемещается поперек режущего полотна пилы. Для регулировки ширины изготавливаемой заготовки на рабочем столе станка имеются отверстия и

установлен упор в виде поворачивающегося кулачка с площадками, что позволяет устанавливать ширину заготовки в зависимости от требуемого размера без дополнительных замеров. Упор изготовлен таким

образом, что при его повороте уменьшается, либо увеличивается расстояние, на которое необходимо передвинуть патрубок (рисунок 3). На кулачки нанесена соответствующая маркировка.

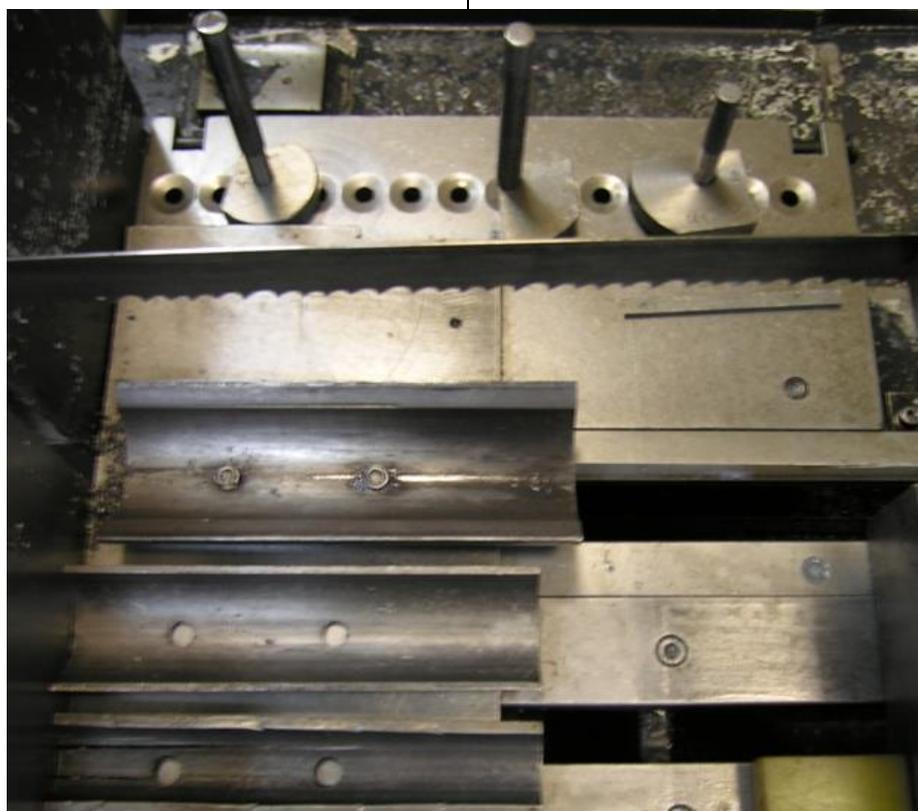


Рисунок 2. Общий вид составных частей приспособления для крепления патрубков в ленточнопильном станке

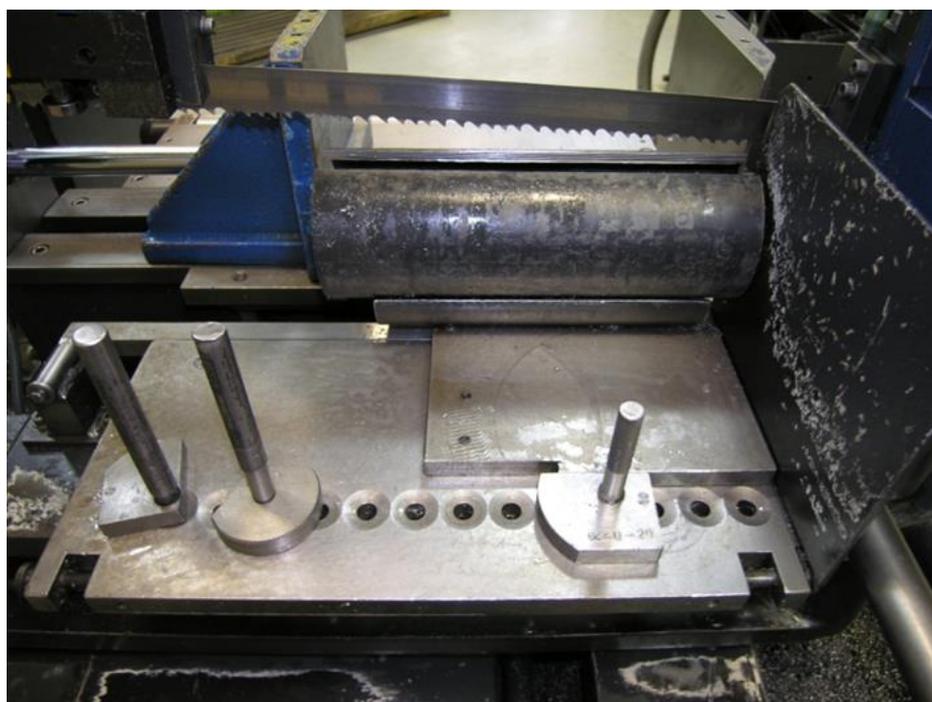


Рисунок 3. Процесс работы с помощью приспособления

Таким образом, уже на этапе первой операции подготовки образца при вырезке на ленточнопильном станке получена черновая полоса - заготовка нужного размера и обеспечена параллельность сторон образца. Это позволяет исключить из процесса подготовки образцов для испытаний на растяжение операцию фрезерования, тем самым уменьшить время подготовки образцов, высвободить фрезерный станок для обработки образцов других видов, а также позволяет экономить электроэнергию и снизить расход твердосплавных пластин для фрезерования.

### Выводы

Разработано и внедрено специальное приспособление для установки патрубков в ленточнопильном станке.

Конструкция приспособления позволяет получать необходимое качество полусы-заготовки уже на этапе вырезки и тем самым исключить из процесса изготовления образцов операцию фрезерования.

В результате внедрения достаточно простого приспособления для крепления патрубка уменьшилось время изготовления образцов, снижен расход твердосплавных пластин для фрезерования, снижен расход электроэнергии за счет исключения операции фрезерования.

### Библиографический список

1. Золоторевский В.С., Механические свойства металлов - М.: МИСИС, 1998,- 401с
2. Барон А.А. Определение механических свойств материалов. Приборы и методы. Учебное пособие. - Волгоград: ВолГТУ, 2015. - 185 с

---

### *Information about the paper in English*

**V.D. Shipitsa, M.Yu. Chernyavsky**

OJSC Byelorussian Steel Works – Management Company of Byelorussian Metallurgical Company Holding  
(OJSC BMZ – Management Company of BMC Holding)  
Zhlobin, the Republic of Belarus  
E-mail: nti.to@bmz.gomel.by  
Received 04.09.2020

### OPTIMIZING THE PROCESS OF CUTTING SPECIMENS TO STUDY THE QUALITY OF HOT ROLLED SEAMLESS PIPES

#### Abstract

The paper describes a special holding tool for pipe branches on a bandsaw, when manufacturing specimens from steel seamless hot rolled pipes to carry out laboratory tests and research. The tool was developed and manufactured in the sample preparation division of the pipe laboratory at the Central Plant Laboratory of OJSC BMZ – Management Company of BMC Holding.

The tool is designed to reliably hold on the machine pipe specimen of various sizes; to move them horizontally on the work bench of the saw to the distance required to ensure an accurate length of the manufactured specimen and to set an accurate strip width; to cut specimen without being inclined to the direction of rolled products, to control the parallel alignment of opposite sides of the billet, which is mandatory for manufacturing samples for tension, impact toughness, hardness and hardening characteristics.

This tool applied on the bandsaw ensures the required accuracy of specimen without measurement tools, excludes the operation of milling billets after cutting on the bandsaw, reduces time for sample grinding, considerably accelerating the sample manufacturing process, and, consequently, time spent for the tests in general.

**Keywords:** seamless hot rolled pipes, manufacturing test samples, bandsaw, pipe branch, special holding tool, cast plate, pipe segment, stop blocks, rotating cams.

---



УДК 621.793/.795: 004.942

**Г.И. Трифонов**  
Военный учебно-научный центр  
Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия  
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»  
г. Воронеж, Россия  
E-mail: trifonov\_gi@mail.ru  
Дата поступления 24.10.2020

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ НАНЕСЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

### Аннотация

На сегодняшний день существует ряд задач и проблемных областей, связанных с технологической подготовкой плазменного напыления и проектированием технических систем, решение которых наиболее актуально в производственных сферах. В данной работе проводились исследования последовательности процессов, происходящих при планировании технологии плазменного напыления. Производился анализ факторов плазменного напыления, влияющих на разработку системы автоматизированного проектирования (САПР). В ходе исследований разработаны: структурная схема САПР нанесения покрытий и структурная схема принятия решений при проектировании покрытий. Смоделированы этапы формирования САПР для плазменного напыления.

**Ключевые слова:** плазменное напыление, система автоматизированного проектирования, покрытие, деталь, схема, этапы.

### Введение

На современных промышленных предприятиях, в частности на машиностроительных и авиастроительных заводах, на сегодняшний день весьма активно используются аддитивные методы восстановления деталей машин. Со стороны экономической целесообразности восстановление деталей обусловлено тем, что около половины механизмов, поступающие на ремонтные работы, могут быть использованы после восстановления при их себестоимости 15...30% цены от новых деталей. При этом стоит отметить, что лишь 5...9% деталей не подлежат восстановлению [1-3].

Одним из перспективных способов восстановления изношенных деталей является плазменное напыление (рисунок 1). Стоит отметить, что данный способ обладает возможностью варьирования материалами состава покрытий при их нанесении. Возможно использование металлов, керметов, керамики [2]. Все другие методы нанесения покрытий резко ограничивают выбор используемых материалов [3].

При контакте плазменной струи с поверхностью детали протекают различные физико-химические и теплофизические процессы. Одним из основополагающих параметров, характеризующих процесс плазменного напыления и качество получаемого покрытия, является температура нагрева поверхности восстанавливаемой детали. При этом необходимо учитывать, что нанесение множества слоев с контролируемой геометрией формообразования возможно при условии точного математического прогнозирования. Из чего следует, что в областях методологического планирования при использовании плазменных технологий можно вынести конкретные проблемные вопросы, относящиеся к конкретной детали и её функциональному слою [4].

При планировании применения технологии плазменного напыления можно выделить технические проблемы, характеризующие конкретную деталь и её функциональный слой. В частности, появляется необходимость математического моделирования процессов плазменного напыления.

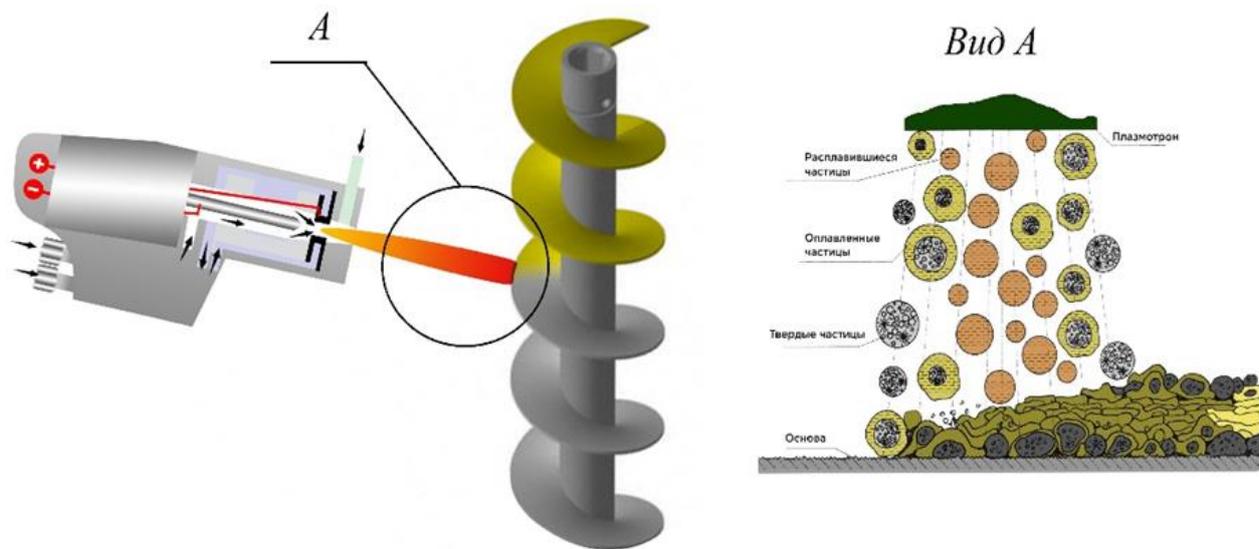


Рисунок 1. Процесс плазменного напыления

Цель данной работы является анализ факторов плазменного напыления, влияющих на создание системы автоматизированного проектирования, а также исследование и разработка основополагающих структурных схем САПР нанесения покрытий.

#### Актуальность

В настоящее время возможности вычислительных комплексов позволяют использовать математическое моделирование в качестве основного методологического подхода при решении технологических задач [5].

Учитывая степень развития области применения технологии плазменного напыления, на сегодняшний день существует ряд задач и проблемных областей, связанных с технологической подготовкой и проектированием технических систем, решение которых наиболее актуально в производственных сферах. Следовательно, подходя к решению проблемы автоматизации технологического процесса в виду совершенствования производственных систем и технологических процессов, необходимо комплексно подойти к планированию создания САПР плазменного напыления.

Однако, при разработке САПР для плазменного напыления, невозможно охватить все критерий и задачи, которые, как правило, входят в набор функциональных возможностей, существующих САПР, поскольку данный газотермический процесс

весьма сложен и обладает множеством факторов и особенностей, которые не представляется возможным в полной мере учесть при автоматизированном проектировании.

#### Исследования

Анализируя особенности процесса плазменного напыления [6], выделим основные факторы, которые напрямую влияют на разработку системы автоматизированного проектирования нанесения функциональных покрытий, и делающие процесс планирования использования САПР в данной отрасли весьма затруднительным:

1) Технологическая карта маршрута технологического процесса, как показывает практика [7], весьма детерминирована. Но при этом технологический процесс, в зависимости от предъявляемых требований к функциональному покрытию, может либо сокращаться, либо расширяться. Например, добавление или сокращение проходов инструмента (плазмотрона), введение дополнительных технологических операций по обработке поверхности детали и т.д.

2) При использовании технологии плазменного напыления, как правило, необходима ювенильная поверхность для обработки детали, и выдержка строго отведенного времени для каждой из основных и дополнительных технологических операций. Вследствие данных требований для каж-

дого отдельного случая необходимо учитывать в САПР специальное межоперационное оборудование для транспортировки деталей (манипуляторы, автоматизированные конвейеры и т.д.).

3) Необходимо учитывать, что при плазменном напылении обрабатываемая поверхность детали в большинстве случаев подвергается предварительной обработке, поскольку специфика процесса напыления требует точную оценку поверхности детали для целесообразности проведения процесса восстановления.

4) Проведение предварительных технологических операций по подготовке детали к напылению, а также постоперационные операции по обработке детали сопряжены с использованием специального оборудования, которое не всегда учитывают при планировании автоматизации процесса. Поэтому актуален вопрос о рациональности объединения оборудования в специальные автоматизированные линии для восстановления деталей машин с помощью плазменного напыления [8]. При этом необходимо скоординировать данную автоматизированную линию с другими службами производства.

5) Напыление множества слоев с контролируемой геометрией формообразования возможно при условии точного математического прогноза и проектирования на основе кинематических режимов процесса. Следовательно, необходимы различные средства реализации уточненных кинематических режимов плазменного напыления, что в свою очередь увеличит количество задач по технологической подготовке процесса и проектирования систем реализации процесса. Примеры разнородности видов поверхности детали приведены на рисунке 2.

6) Для анализа плазменного напыления и деталей с нанесенным слоем функционального покрытия необходима лаборатория по подготовке материала покрытия (как правило, это порошковый композитный материал), лаборатория анализа нанесенного покрытия (определение когезии, адгезии, остаточных напряжений и т.д.), лаборатория с оборудованием для испытаний покрытия и т.д.

7) Составление баз данных: по возможным материалам покрытия; их всевозможных комбинаций, учитывая температурные диапазоны и химические взаимодействия; по материалам подложки и их взаимодействия с материалами наносимого покрытия; кинематических режимов напыления и т.д.

Учитывая вышеперечисленные факторы и особенности, влияющие на разработку системы автоматизированного проектирования, разработка САПР должна быть направлена на создание комплекса модулей автоматизированных процессов. Данный вывод обусловлен тем, что на современном этапе развития производственных линий необходимо уходить от вредных условий работы, а также повышать качество получаемых покрытий за счет автоматизации процессов обработки детали.

### **Результаты и их обсуждение**

Основная задача САПР в ремонтных и восстановительных цехах производства при планировании технологии плазменного напыления заключается в: повышении производительности; повышении уровня автоматизации всего производства; повышении уровня интеллектуальной деятельности инженеров-технологов и инженеров-конструкторов и т.д. Решение поставленной задачи обеспечивает поиск новых технологических и конструкторских решений, направленных на повышение качества покрытий, а также на уменьшение времени обработки и стоимости всех технологических процессов.

В связи с этим выделяют следующие этапы автоматизированного проектирования технологии производства деталей машин с функциональными покрытиями

- 1) анализ технического задания (ТЗ);
- 2) поиск аналогов и прототипов, а также готовых решений;
- 3) выбор материалов покрытия в зависимости от заявленной стоимости работ и функциональности заявленного покрытия.

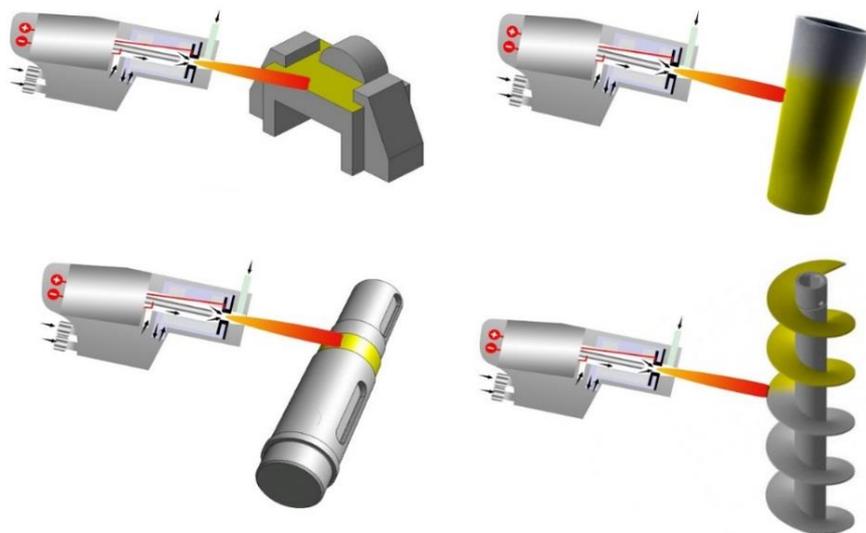


Рисунок 2. Напыление типовых поверхностей деталей машин

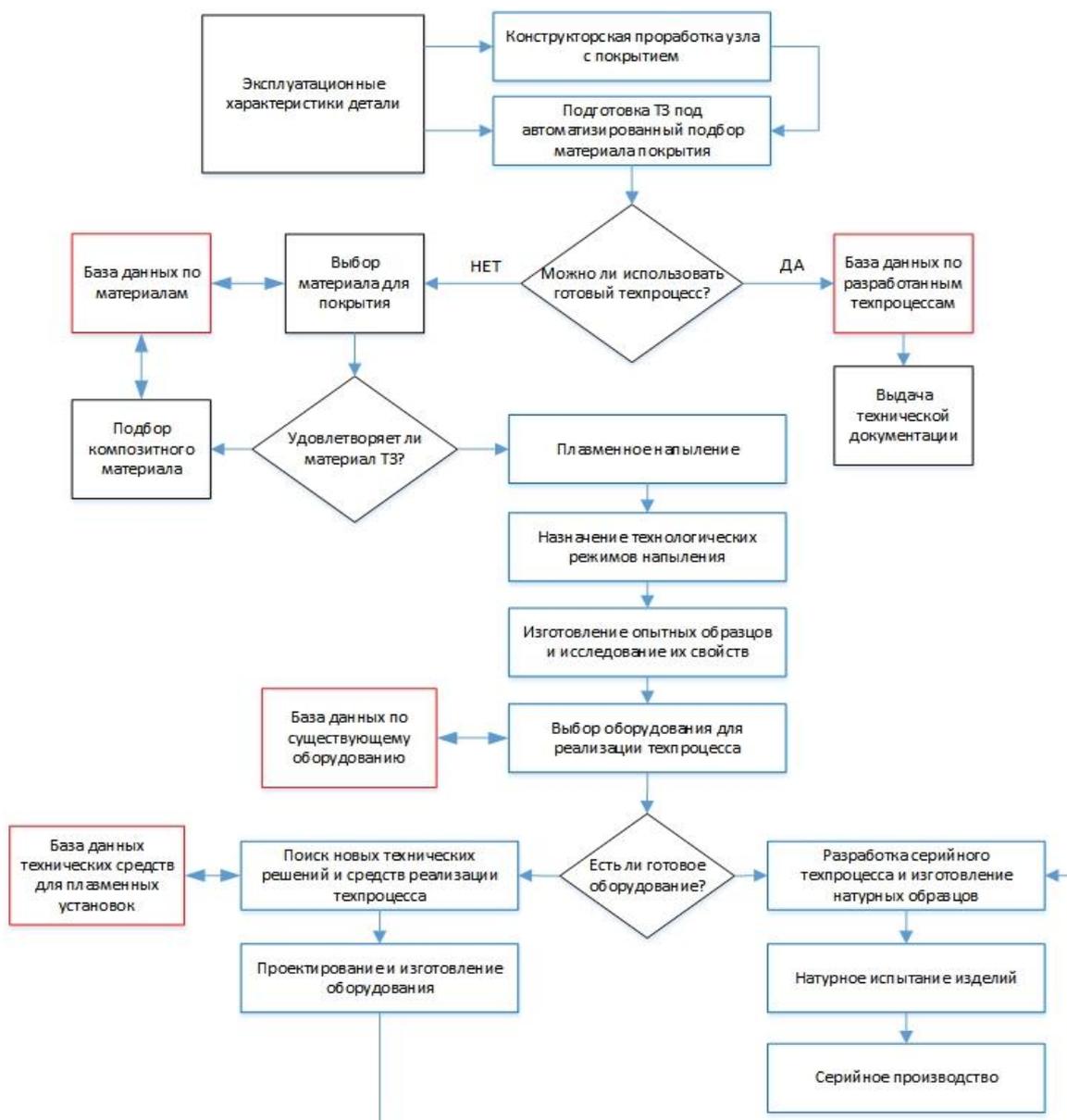


Рисунок 3. Структурная схема САПР для плазменного напыления

На этапе функционального проектирования процесса плазменного напыления производятся следующие работы: подбор материала покрытия (если свойства материала не удовлетворяет заявленным параметрам в ТЗ, то создается новый композитный материал с заданными свойствами) [9], подбор режимов напыления, техническая и технологическая подготовка производства, а также подбор специального оборудования.

Стоит отметить, что при невозможности осуществить необходимый технологический процесс на существующем оборудовании – производится проектирование и разработка новых установок или технологических решений.

Опираясь на проведенный анализ технологии плазменного напыления и факторов, влияющих на её обеспечение, была разработана структурная схема САПР плазменного напыления (рисунок 3).

Стоит отметить, что указанные базы данных, разработанные при проектировании структурной схемы САПР плазменного напыления, находятся под автоматизированным управлением системы управления (рисунок 4).

Беря во внимание разработанную структурную схему САПР для плазменного напыления, в общем виде процесс плазменного напыления (подготовительные операции и проектирование автоматизированных систем) можно разделить на три этапа.

*Первый этап.*

проводятся общие мероприятия по подготовке процесса плазменного напыления;

проводится отбор деталей, для которых будет производиться процесс напыления;

определяются режимы и параметры напыления;

анализируются и назначаются параметры покрытия;

производится оценка технологичности напыления детали;

формируется маршрутная карта (технологический процесс обработки детали), а также проводится оценка загруженности оборудования, которое будет задействовано в данном процессе.

*Второй этап.*

Производится выбор детали-представителя, в которой наиболее близко учтены конструктивно-технологические особенности деталей, заявленных в ТЗ. На данном этапе производится оценка технологичности детали.

*Третий этап.*

Формируется модель гибкой автоматизированной системы (ГАС) и моделирование процесса напыления. Результатом данного этапа является опытный образец ГАС.

Приведенные этапы и рассмотренные задачи в полной мере можно использовать как основу для создания САПР плазменного напыления. Однако на данный момент в современных цехах РФ приведенные задачи, связанные с проектированием деталей с покрытиями созданием полноценной САПР, формализованы не в полной мере [6, 10].



Рисунок 4. Структурная схема управления базами данных

## Выводы

Произведен анализ основных факторов, влияющих на разработку САПР плазменного напыления. Составлены обобщённые структурные схемы САПР нанесения покрытий. Разработаны три этапа по формированию САПР для плазменного напыления.

## Библиографический список

1. Балановский А.Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов. Иркутск. Изд-во ИрГТУ, 2006. 180 с.
2. Плазменное поверхностное упрочнение / Лещинский Л.К., Самотугин С.С., Пирч И.И., Комар В.И. К.: Тэхника, 1990. 109 с.
3. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование / Ильющенко А.Ф., Шевцов А.И., Оковитый В.А., Громыко Г.Ф. Минск: Беларусь. Навука, 2011. 357 с.
4. Трифонов Г.И. Исследование зависимости теплофизических и физико-механических параметров плазменного напыления от скорости перемещения плазмотрона // Журнал «Механическое оборудование металлургических заводов». 2019. №1(12). С. 76–81.
5. Оценка физико-механических параметров покрытий плазменного напыления после восстановления детали трения авиационной промышленности / С.Ю.

- Жачкин, Г.И. Трифонов // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2019. Вып. 11. С. 77–84.
6. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. Учеб. пособие по курсу «Технология конструкций из металлокомпози́тов». 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Е. Баумана, 2008. 360 с.
  7. Технологические процессы в техническом сервисе машин и оборудования / Кравченко И.Н., Пузряков А.Ф., Корнеев В.М. [и др.]. М.: ИНФРА-М, 2017. 346 с.
  8. Жачкин С.Ю., Трифонов Г.И., Краснова М.Н. Автоматизация расчетных модулей для оценки параметров плазменного напыления // Инновационные технологии и оборудование машиностроительного комплекса. Межвузовский сборник научных трудов. Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет». 2018. Вып. 19. С. 34–40.
  9. Чёсов Ю.С., Зверев Е.А., Трегубчак П.В. Плазменное напыление износостойких покрытий // В мире научных открытий. 2010. № 2–3. С. 100–102.
  10. Притыкин Ф.Н., Шмуленкова Е.А. Основные элементы САПР металлорезающих инструментов при использовании параметрического 3D моделирования // Омский Научный вестник. 2012. № 1 (107). С. 277–283.

---

### *Information about the paper in English*

**G.I. Trifonov**

Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy Military  
Educational and Scientific Center of Air Force  
Voronezh, Russia

E-mail: trifonov\_gi@mail.ru

Received 24.10.2020

---

## DEVELOPMENT OF THE COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEM FOR APPLYING FUNCTIONAL COATINGS

### Abstract

There are current objectives and difficulties related to a technological preparation of plasma spraying and design of technical systems to be the most relevant in industrial areas. This paper presents research on the sequence of processes occurred, when planning a plasma spraying process. The author analyzed plasma spraying factors influencing the development of the computer-aided design (CAD) system. The research resulted in developing a structural diagram of the CAD system for applying coatings and a structural diagram of making decisions, when designing coatings. The author simulated the stages of developing the CAD system for plasma spraying.

**Keywords:** plasma spraying, computer-aided design system, coating, part, diagram, stages.

---



УДК 620.178.3

**В.А. Коструб, А.А. Мирошников**

ГОУ ВО «Луганский государственный университет

имени Владимира Даля»

г. Луганск

E-mail: topalexengineering@gmail.com

Дата поступления 18.12.2020

## РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ НА БАЗЕ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

### Аннотация

Грузоподъемные машины и механизмы играют важную роль в транспортных, промышленных, энергетической, торговой и других отраслях экономики любой страны. При этом, одним из важнейших вопросов их эксплуатации является достоверная оценка надежности и остаточного ресурса таких машин. В работе рассмотрен метод оценки остаточной прочности и остаточного ресурса металлоконструкций грузоподъемных машин, предложено аппаратное решение для измерительного комплекса по его реализации.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние металлоконструкции, мостовой кран, остаточный ресурс, измерительная лаборатория.

### Введение

Количество грузоподъемных машин в мире исчисляется сотнями тысяч единиц. Только мостовые краны в России составляют около 130 тыс. единиц, число башенных кранов превышает 50 тыс. единиц. В то же время, статистические данные показывают, что в промышленности от 60 % до 70 % ПТМ отработали свой нормативный срок и подлежат обследованию или нуждаются в замене. Как известно, стоимость ПТМ и даже их диагностика весьма существенны. В этой связи возникает необходимость разработки научно-обоснованных методов оценки остаточной прочности и остаточного ресурса металлоконструкций ПТМ, сочетающих низкую затратную часть с высокой достоверностью результатов оценки. Создание такого метода позволит путем научно обоснованного увеличения эксплуатационного ресурса существенно уменьшить капитальные затраты на производство новых машин и снизить затраты на их обследование.

Металлоконструкции грузоподъемных машин, отработавших свой нормативный срок, требуют особого контроля. Методы исследования машин и их элементов с использованием электротензометрического

оборудования получили широкое распространение в технике [1-2]. С помощью данной методики можно изучать работу огромного спектра машин, механизмов и оборудования в производственных условиях, исследовать протекающие с разными скоростями такие процессы, как мониторинг во времени деформации и напряжения, скорости, ускорения и т.д. Использование тензометрии при испытаниях машин в реальных условиях эксплуатации дает возможность наглядно регистрировать значения деформаций во времени.

### Основная часть

Целью данной работы является оценка возможности применения измерительного комплекса на базе АЦП для получения данных о напряженно-деформированном состоянии металлоконструкции грузоподъемных машин.

АЦП E14-140M – современное универсальное программно-аппаратное устройство, предназначенное для построения многоканальных измерительных систем ввода, вывода и обработки аналоговой и цифровой информации в составе персональных компьютеров [3], а также имеющее возможность применения в качестве автономного устройства сбора данных и

управления в варианте с внешним питанием +5В для осуществления пользовательских алгоритмов реального времени.

Как известно, в последнее время широкое распространение получили компьютерно-ориентированные средства измерений, часто называемые виртуальными приборами. Основные достоинства таких приборов – относительно низкая стоимость, высокая мобильность, органичная интегрированность в компьютерные технологии, возможность легкой адаптации и развития программного обеспечения под измерительные задачи. Непосредственное и разнообразное использование аппаратно-программных ресурсов управляющего компьютера позволяет ограничиться аппаратной реализацией только измерительно-интерфейсной части прибора. Особую популярность в последние годы приобрели виртуальные приборы, выполненные в виде приставки к компьютеру с интерфейсом USB.

Разработанный измерительный комплекс, на базе АЦП E14-140M (далее – комплекс), работает в режиме USB связи с персональным компьютером или ноутбуком. Компьютер в комплексе с программным обеспечением PowerGraph, реализованным в системе Microsoft Windows, выполняет функции устройства управления, накопления, обработки и отображения измерительной информации [4-5]. Комплекс включает

в себя базовый модуль АЦП, содержащий встроенный источник питания, усилитель сигнала с датчика, блок питания усилителя, а также тензодатчики. Продвинутое режимы синхронизации, позволяют создавать многомодульную систему сбора данных по схеме один датчик – много приемников [6-7]. Независимая настройка каждого канала, позволяющая работать с различными типами датчиков одновременно. Внешний вид комплекса представлен на рис.1.

Характеристики комплекса для измерения напряженно-деформированного состояния с помощью тензодатчиков:

1. E14-140M имеет АЦП 14 бит/ 200 КГц для подключения до 16 дифференциальных каналов или 32 с «общей землей», 16 каналов цифрового ввода и вывода, совместимые с TTL логикой, а также 2 канала ЦАП 12 бит/  $\pm 5$  В.

Выбор диапазонов измерения осуществляется программно. Синхронизация АЦП возможна по внешнему синхросигналу или по уровню входного сигнала, имеется режим межмодульной синхронизации. Применение цифрового сигнального процессора и загрузка прикладных программ позволяют реализовывать различные функциональные алгоритмы и специализированные режимы работы модуля при низкоуровневом программировании [8].

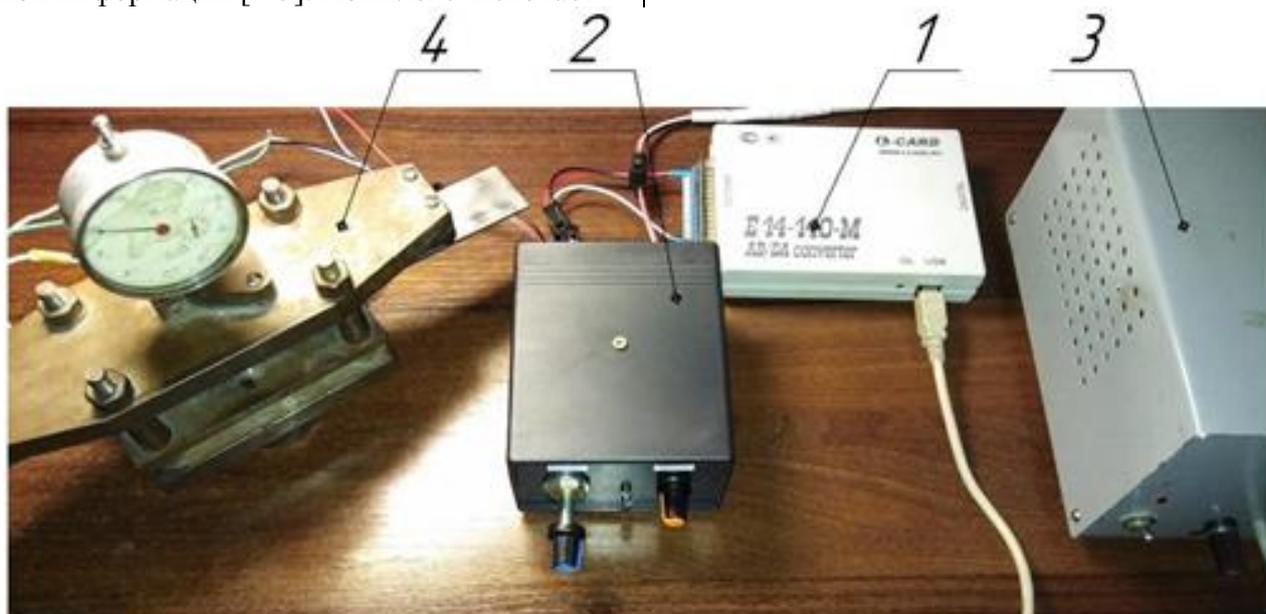


Рисунок 1. Измерительный комплекс напряженно-деформированного состояния в металлоконструкции. 1 – АЦП E14-140M; 2 – усилитель одноканальный; 3 – блок питания; 4 – устройство для тарировки балки.

2. Универсальный одноканальный предварительный усилитель напряжения сигнала полного тензомоста и полумоста, термопары, и т.д., в компактном исполнении. Со стороны разъёма датчика (X1) имеет: питания моста 5/2,5 В, выход «средней точки» для подключения тензометрического полумоста. Выход предусилителя (со стороны разъёма X2) совместим как с дифференциальным входом, так и с входом с общей землёй АЦП общего применения. Ширина полосы частот пропускания предусилителя 50 кГц, что даёт возможность его применения, в частности, в задачах исследования динамических процессов. Имеет регулировку баланса и чувствительности мостовой схемы.

3. Блок питания с преобразованием однополярного напряжения в двухполярное. Схема отличается своей простотой и универсальностью. На вход схемы можно подавать переменное напряжение в широком диапазоне, ограниченном только лишь допустимым напряжением диодов моста, допустимым напряжением конденсаторов питания и напряжением транзисторов [9]. Выходное напряжение каждого из плеч будет равно половине общего напряжения питания, например, при входном переменном напряжении 20В, выходное напряжение одного плеча будет равно  $(20 \cdot 1,41) / 2 = 14В$ . В качестве транзисторов можно применять любые комплементарные транзисторы. Хорошими вариантами замены могут быть MPSA42/92, KSP42/92, BC546/556, KT3102/3107 и так далее.

4. Проволочный тензорезистор массового применения (рисунок 2) представляет собой плоскую петлеобразную проволочную обмотку 2 прямоугольной формы (решетку), к концам 4 которой припаяны или приварены относительно толстые выводы из медной проволоки 5. Проволочная решетка с помощью специального клея 3 закрепляется на тонкой прямоугольной полоске 1 из бумаги, клеевой или лаковой пленки, служащей для решетки подложкой (основой).

Разработанный комплекс является эффективным измерительным инструментом

для решения разнообразных научно-исследовательских и учебных задач. Он позволяет легко перестраивать измерительный эксперимент, трансформируя конфигурацию комплекса, постепенно наращивать его функциональность и производительность путем поэтапного доукомплектования измерительными модулями, в том числе новыми моделями (предполагается развитие модельного ряда измерительных модулей).

Назначение ПО «PowerGraph»:

- сбор данных с различных измерительных устройств и приборов;
- регистрация, визуализация и обработка сигналов в режиме реального времени;
- редактирование, математическая обработка и анализ данных;
- хранение, импорт и экспорт данных.

Функциональные возможности ПО «PowerGraph» [10]:

1. Поддержка различных устройств сбора данных:

- расширяемая библиотека драйверов, включающая платы и модули АЦП, измерительные приборы, виртуальные генераторы сигналов, компьютерные устройства ввода и звукозаписи;
- возможность подключения новых устройств и источников сигналов;
- поддержка управляющих компонентов устройств (цифровые входы/выходы, ЦАП'ы и др.).

2. Регистрация данных:

- предварительный мониторинг входных сигналов;
- индивидуальная настройка и калибровка каналов;
- использование любых единиц измерения сигналов;
- выбор произвольного набора каналов для регистрации;
- использование произвольной скорости записи (частоты оцифровки);
- аппаратная и программная синхронизация сбора данных (счет-

чики, таймеры, по уровню сигнала с записью пред- и пост-истории);

- сохранение и отображение параметров сбора данных (тип устройства, дата, время, скорость и длительность регистрации);
- запись серии независимых измерений (блоков данных) в один файл;
- установка текстовых меток (комментариев) на ленте записи;
- ввод и хранение текстовой информации (заметки, примечания,

протокол измерений) для каждого блока данных и для всего файла.

Рассмотрим применение предложенного комплекса.

Проведем калибровку тарированной балки для настройки измерительного комплекса. Установив максимальную чувствительность усилителя запишем показания АЦП в таблицу 1, для десяти этапов нагружения и разгрузки балки.

Используя полученные данные, построим график (рис.3.). Добавим зависимость  $\sigma = F(f)$  полученная ранее в расчетах [11].

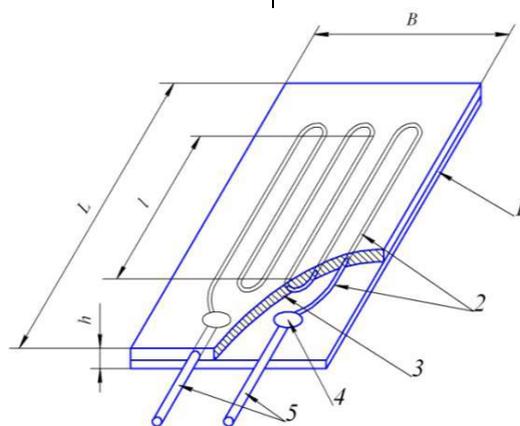


Рисунок 2. Схема используемых тензорезисторов. 1 - тонкая прямоугольная полоска из бумаги; 2 - плоская петлеобразная проволочная обмотка прямоугольной формы (решетка); 3 – специальный клей; 4 - узел перехода; 5 - выводы из медной проволоки

Таблица 1

Значения миллиамперметра при нагрузке тарированной балке

№ экспер.		Показание стрелочного индикатора										
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
		Показание миллиамперметра										
1	Нагр.	0	17	32	49	67	84	99	116	135	157	177
	Разг.	-9	6	25	44	60	81	98	116	134	151	177
2	Нагр.	0	19	38	53	74	94	110	127	145	164	185
	Разг.	-16	6	24	43	65	84	105	121	140	148	185
3	Нагр.	0	22	36	52	72	89	108	123	144	165	181
	Разг.	0	13	31	48	67	87	104	120	138	156	181
4	Нагр.	0	22	37	54	74	92	111	127	147	165	182
	Разг.	-4	11	30	49	68	87	106	123	140	155	182
5	Нагр.	0	24	40	58	77	96	113	130	151	171	191
	Разг.	4	17	34	53	73	92	111	129	145	165	191
6	Нагр.	0	19	36	53	75	98	113	133	152	170	189
	Разг.	1	17	34	56	74	92	111	129	146	164	189
7	Нагр.	0	17	34	51	70	91	106	124	145	164	183
	Разг.	-1	14	29	48	67	85	105	120	139	159	183
8	Нагр.	0	18	36	54	75	98	111	130	149	171	191
	Разг.	2	18	36	57	72	92	110	128	148	166	191
9	Нагр.	0	20	38	57	77	95	113	128	145	167	184
	Разг.	-5	13	33	51	70	88	106	125	142	161	184
10	Нагр.	0	22	38	56	76	96	110	127	145	166	183
	Разг.	-4	13	34	52	69	89	106	123	141	160	183

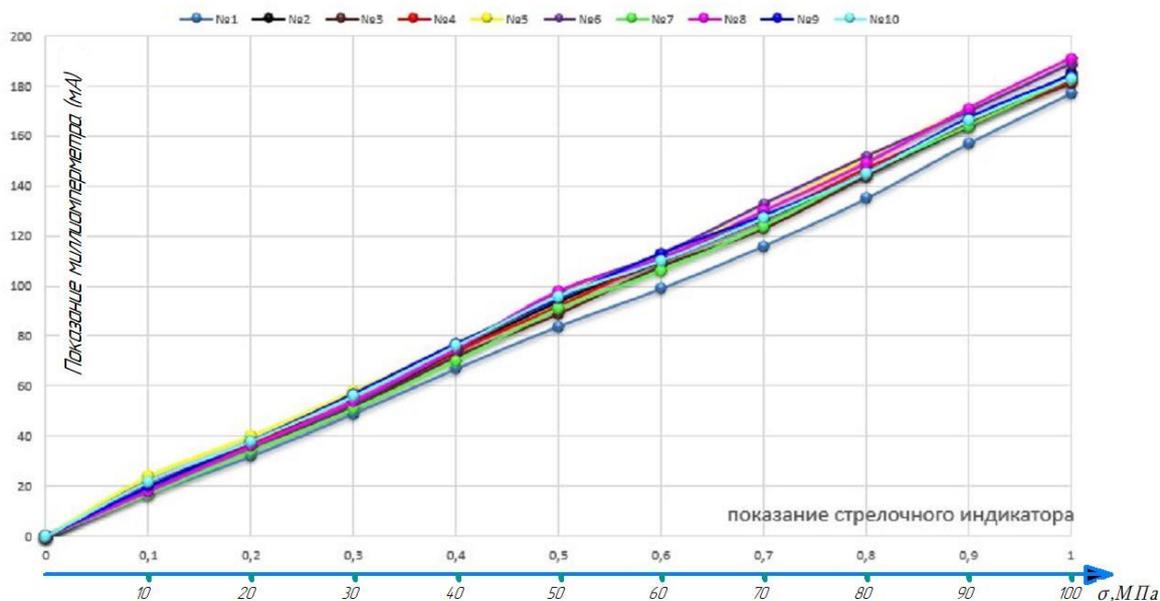


Рисунок 3. График калибровки тарированной балки

Как видно из графика, точность измерения практически одинакова для всех этапов.

Рассмотрим измерение напряженно-деформированного состояния металлоконструкции коробчатой балки с помощью АЦП.

Для измерения напряженно деформированного состояния в центральном сечении нижнего пояса балки по принципу полумостовой схемы наклеены датчики, имеющие сопротивление  $R=100$  Ом. Датчики подключаются к усилителю и блоку питания, а усилитель - к АЦП с последующей

связью через USB с ПК. Общая схема измерительной лаборатории и балки представлена на рисунке 4.

Вторым этапом калибруется баланс моста. После выставления в нулевую точку можно начинать нагружение металлоконструкции с помощью динамометра. По паспорту динамометра с помощью стрелочного индикатора задается требуемая сила нагрузки. Изменения сопротивления тензодатчиков записываются АЦП в программу PowerGraph. Результаты эксперимента представлены на рисунке 5.



Рисунок 4. Общий вид измерительной лаборатории и коробчатой балки

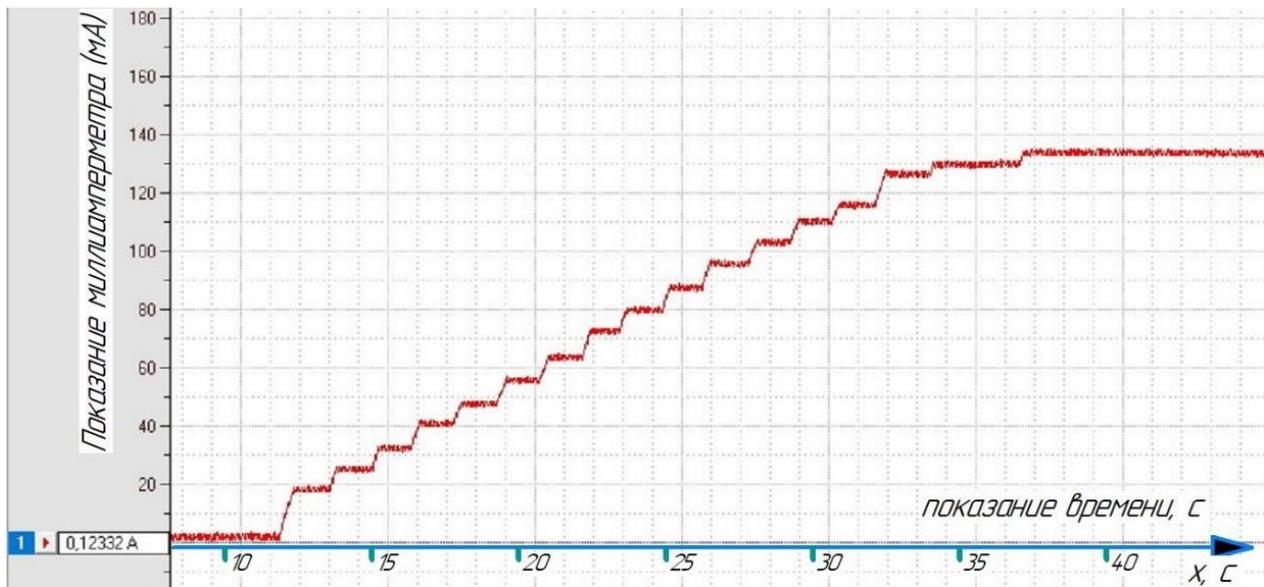


Рисунок 5. Результаты эксперимента

Значение силы тока, полученное в максимальной точке, равно – 136 мА.

Используя ранее записанные данные измерения на тарированной балке [11], переводим полученные результаты в напряжение и получаем – 74 МПа. Проведенный эксперимент показывает, что полученный результат близок к расчетному, выполненному с помощью метода конечных элементов [12]. Это подтверждает достоверность метода, а также правильности построения 3D модели и дальнейшей расчетной модели.

Предложенная методика была также использована при оценке ресурса балок мостового крана-штабелера при нагрузке в 1 тонну. С экономической точки зрения обоснованное продление безопасной эксплуатации грузоподъемной машины является значительным плюсом, для любой отрасли, где используются грузоподъемные машины, отработавшие свой нормативный срок службы. Замена одного или нескольких кранов является дорогостоящей процедурой, что несет экономические убытки, связанные также с простоем технологической линии.

В процессе исследования был выявлен ряд особенностей:

- поскольку полумостовая схема представляет собой одну фазу дифференциальной мостовой схемы, то данный источник сигнала схож по

электрическим свойствам с низкоомным однофазным выходом с общей землёй, у которого роль общего провода выполняют все остальные 2 или 4 провода при трёх- или пятипроводной схеме, соответственно. Для улучшения соотношения сигнал/шум в данной сигнальной цепи, пожалуй, единственно возможной мерой является экранирование;

- в общем случае для достижения желательного малого начального разбаланса моста разброс сопротивлений тензорезисторов, как правило, не должен превышать  $\pm 0,01\%$ , также, имеет значение разброс сопротивлений в парах смежных резисторов в мосте (при любом условном разбиении на смежные пары).

Следует отметить, что измеряемый полномостовым датчиком разбаланс моста, пропорциональный деформации, является безразмерной величиной, равной отношению измеренных напряжений. Положительный знак разбаланса моста соответствует состоянию сжатия-растяжения. Отрицательному знаку разбаланса будет соответствовать противоположные состояния сжатия-растяжения тензорезисторов.

### Выводы

С помощью предложенной измерительной лаборатории можно регистрировать нагрузки, возникающие в металлоконструкции, то есть мониторить реальную

картину работы крана как в прошедшем времени, так и в настоящем. Это позволяет накопить данные о напряженно-деформированном состоянии грузоподъемной машины, что позволит приблизиться к характеристике ее ресурса путем сравнения полученных данных с расчётным компьютерно-инженерным анализом (САЕ).

#### Библиографический список

1. Мамаева Е.И., Машиностроение. Энциклопедия. Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов. Т. II-1 / «Л.В. Агамиров, М.А. Алимов и др.; под общ. ред. Е.И. Мамаевой.» - М.: Машиностроение, 2010. - 852 с.
2. Бабёр А.И., Электрические измерения : учеб. пособие / А.И. Бабёр, Е.Т. Харевская. - Минск : РИПО, 2019. - 106 с.
3. <https://www.lcard.ru/>
4. Гарманов А.В. Подключение измерительных приборов / Гарманов А.В. – Москва: 2003. – 41с.
5. Измайлов Д.Ю. Виртуальная измерительная лаборатория PowerGraph / Измайлов Д.Ю. // промышленные измерения, контроль, автоматизация, диагностика. – 2007. - №3. – С 42-47.
6. Измайлов Д.Ю. Виртуальная измерительная лаборатория PowerGraph / Измайлов Д.Ю. // промышленные измерения, контроль, автоматизация, диагностика. – 2007. - №3. – С 42-47.
7. PowerGraph. Руководство пользователя. URL: <http://www.powergraph.ru>
8. Парахуда, Р. Н. Автоматизация измерений и контроля: курс лекций / Р. Н. Парахуда, В. И. Шевцов – СПб. : СЗТУ, 2002. – 75 с.
9. Путилин, А. Б. Вычислительная техника и программирование в измерительных информационных системах: учебное пособие для вузов / А. Б. Путилин. – М.: Дрофа, 2006. – 447 с.
10. Девин Л.Н. Применение пакета PowerGraph для исследования процесса резанья / Девин Л.Н., Сулима А.Г. // Промышленные измерения, контроль, автоматизация, диагностика. – 2008. - №3. – С 24-26.
11. Мирошников А.А., Будиков Л.Я., Рекиян П.Н. Анализ напряженно-деформированного состояния металлоконструкции с помощью тензометрии на базе аналого-цифрового преобразователя // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2018, № 2(11), стр. 32-37.
12. Будиков Л.Я., Мирошников А.А. Оценка остаточного ресурса мостовых кранов применением CALS технологий и методов численного анализа / Материалы Международной научно-практической конференции преподавателей, студентов и молодых ученых «Транспортные системы и современные технологии» // Луганск: ГОУ ВПО ЛНР, 2017. - С. 125-131.

---

#### *Information about the paper in English*

V.A. Kostrub, A.A. Miroshnikov

Dal Lugansk State University

Lugansk

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

Received 18.12.2020

#### DEVELOPMENT OF A MOBILE MULTIFUNCTIONAL MEASURING LABORATORY BASED ON AN ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER

#### Abstract

Lifting machines and facilities play an important role in transportation, industrial, power, commercial and other sectors of economy in any country. One of the most important issues of their operation is an accurate assessment of reliability and residual lifetime of such machines. The paper describes a method for assessing residual strength and residual lifetime of steel structures of lifting machines and suggests a hardware solution for the measuring complex for its implementation.

**Keywords:** stress and strain state of steel structures, overhead crane, residual lifetime, measuring laboratory.

---



УДК 621.838.222

**М.П. Шишкарёв**  
ФГБОУ ВО «Донской государственный  
технический университет» (ДГТУ)  
г. Ростов-на-Дону, Россия  
E-mail: shishkarevm@mail.ru  
Дата поступления 23.09.2020

## НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ АДАПТИВНОЙ ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ (БАЗОВЫЙ ВАРИАНТ)

### Аннотация

Показано, что при наличии максимума вращающего момента адаптивная фрикционная муфта второго поколения внутри интервала значений коэффициента трения она обладает более высокой точностью срабатывания. Максимум вращающего момента обеспечивается уменьшением среднего радиуса поверхностей трения неадаптивной фрикционной группы. Установлено, что уменьшение величины отношения среднего радиуса поверхностей трения неадаптивной фрикционной группы к среднему радиусу поверхностей трения адаптивной фрикционной группы снижает значение коэффициента трения, соответствующее максимуму вращающего момента и к повышению точности срабатывания муфты, причем, с учетом конструктивно-компоновочного решения и для повышения точности срабатывания неадаптивная фрикционная группа может иметь только одну пару трения.

**Ключевые слова:** адаптивная фрикционная муфта, надежность, нагрузочная характеристика, точность срабатывания, коэффициент усиления, коэффициент трения.

### Введение

В работах [1, 2, 3] приведены принципиальная и конструктивная схемы и результаты исследования адаптивной фрикционной муфты (АФМ) второго поколения. Отличие данной муфты от АФМ первого поколения (типа муфты Н.Д. Вернера [4]) заключается в том, что передача вращающего момента осуществляется двумя параллельно действующими фрикционными группами 1 и 2 (рисунок 1).

Фрикционная группа 1 является адаптивной, т. е. она охвачена во время работы отрицательной обратной связью благодаря действию распорной силы  $F_p$ , которая возбуждается при помощи управляющего устройства (УУ) 3. Действие на пары трения фрикционной группы 1 распорной силы уменьшает фактическое усилие прижатия их друг к другу в зависимости от значения коэффициента трения и передаваемой нагрузки.

На фрикционную группу 2 распорная сила не действует, поэтому исследуемый

объект к АФМ с комбинированной – отрицательно-нулевой обратной связью, которые входят в состав АФМ второго поколения [5].

Упомянутое конструктивно-компоновочное решение АФМ второго поколения привело к тому, что значение распорной силы  $F_p$  и характер его изменения зависят не только от вращающего момента, передаваемого фрикционной группой 1, но и от вращающего момента, передаваемого фрикционной группой 2.

Значение вращающего момента, передаваемого фрикционной группой 1, является нелинейной функцией коэффициента трения, как и в АФМ первого поколения [4].

Значение вращающего момента, передаваемого фрикционной группой 2, изменяется по линейному закону в функции коэффициента трения [6]. В связи с этим, распорная сила будет изменяться в АФМ второго поколения, по-иному, чем в АФМ первого поколения, закону, что должно повлиять на ее точность срабатывания и форму нагрузочной характеристики.

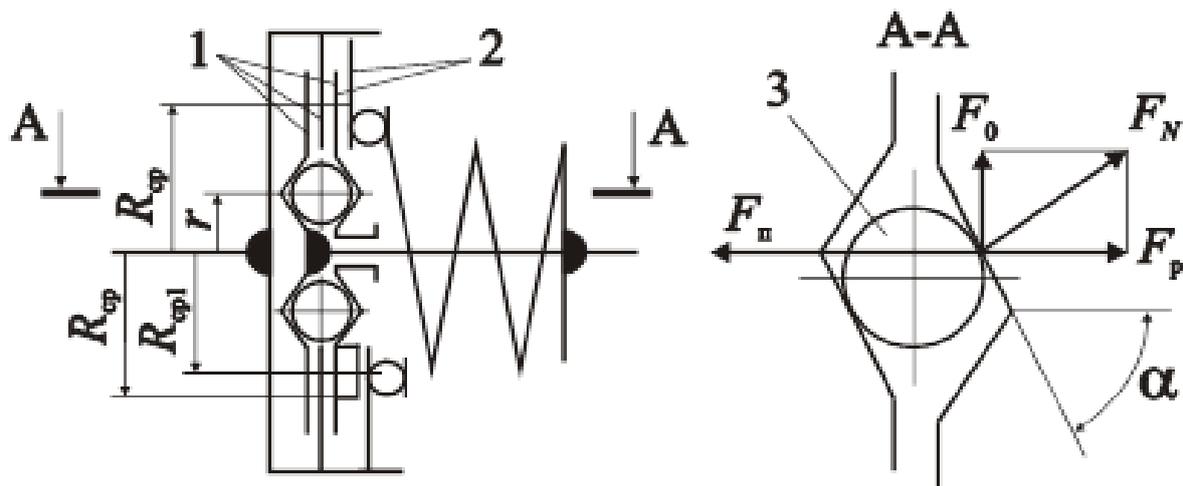


Рисунок 1. Разновидности принципиальной схемы АФМ второго поколения (базовый вариант)

Надежность работы предохранительных муфт, в том числе АФМ, характеризуется стабильностью, передаваемой ими нагрузки, что вполне соответствует определению надежности, приведенному в работе [7].

Результаты исследования базового варианта АФМ второго поколения показали, что при одинаковых значениях среднего радиуса поверхностей трения фрикционных групп (рис. 1, верхняя часть относительно оси вращения муфты) график нагрузочной характеристики  $T_n(f_i)$  (где  $T_n$  – предельный вращающий момент АФМ,  $f_i$  – текущее значение коэффициента трения) представляет собой монотонно возрастающую кривую в интервале значений коэффициента трения  $f_{\min} \dots f_{\max}$  (где  $f_{\min}$ ,  $f_{\max}$  – соответственно минимальное и максимальное значения коэффициента трения), если значение коэффициента усиления (КУ) обратной связи не превышает установленного предела [2, 3].

Упомянутый характер нагрузочной характеристики свидетельствует о невозможности существенного повышения точности срабатывания АФМ второго поколения по сравнению с точностью срабатывания АФМ первого поколения.

На основании изложенного **задачей исследования** является определение параметров АФМ второго поколения с неодинаковыми средними радиусами поверхностей

трения фрикционных групп, позволяющими повысить точность срабатывания муфты.

### Основная часть

В работе [8] приведена принципиальная схема АФМ второго поколения, в которой значение среднего радиуса поверхностей трения фрикционной группы 1 не равно среднему радиусу поверхностей трения фрикционной группы 2 (рис. 1, нижняя часть относительно оси вращения муфты).

В этой же работе показано, что нагрузочная характеристика данной АФМ может иметь точку максимума внутри интервала значений коэффициента трения  $f_{\min} \dots f_{\max}$ , соответствующую значению коэффициента трения, которое определяется по формуле, приведенной в работе [8] и имеющей следующий вид:

$$f_3 = \frac{\sqrt{(z_1 n)^2 + z_1 n(z-1)(z+z_1 n) - z_1 n}}{z_1 n(z-1)C}, \quad (1)$$

где  $z$  – число пар трения фрикционной группы 1;  $z_1$  – число пар трения фрикционной группы 2;  $C$  – КУ обратной связи:

$$C = \frac{R_{cp}}{r} \operatorname{tg} \alpha,$$

$R_{cp}$ ,  $r$ ,  $\alpha$  – см. рис. 1;  $n$  – коэффициент:

$$n = \frac{R_{cp1}}{R_{cp}},$$

$R_{cp1}$  – см. рисунок 1.

Формула (1) получена при условии,

что число пар трения фрикционной группы 1, связанных с упорным диском 4 (рис. 1), равно единице.

В работе [1] показано, что АФМ второго поколения работает в адаптивном режиме, который характеризуется действием на пары трения фрикционной группы 1 отрицательной обратной связи, при всех значениях коэффициента трения, принадлежащих интервалу  $f_{\min} \dots f_{\max}$ , если значение КУ  $C$  удовлетворяет следующему условию:

$$C \leq 1 / (z_1 n f_{\max}). \quad (2)$$

Результаты исследования, изложенные в работе [9] показали, что АФМ второго поколения, выполненная по конструктивно-компоновочной схеме со всеми ведущими парами трения обеих фрикционных групп, обладает такой же, как и АФМ первого поколения, функциональной зависимостью  $T_n(f_i)$ . В связи с этим, далее будем рассматривать только АФМ второго поколения, имеющую дифференцированные пары трения по схеме «ведущие пары трения – ведомые пары трения».

Подставляя правую часть соотношения (2) в формулу (1) и учитывая при этом соотношение (2) в форме равенства (это позволяет достичь наиболее высокую точность срабатывания АФМ [10]), получаем:

$$f_3 = \frac{\sqrt{(z_1 n)^2 + z_1 n (z - 1)(z + z_1 n) - z_1 n}}{z - 1} f_{\max}. \quad (3)$$

Формула (3) показывает, что характер функции  $T_n(f_i)$  зависит от значения коэффициента  $n$ . При этом график указанной функции может иметь следующий вид:

– монотонно возрастающая кривая в интервале значений коэффициента трения  $f_{\min} \dots f_{\max}$ , принимая максимальное значение на его верхней границе;

– монотонно убывающая кривая в указанном интервале с максимальным значением на его нижней границе и с минимальным значением – на нижней границе интервала;

– кривая, имеющая точку максимума, соответствующую значению коэффициента трения  $f_3$ , которое находится внутри интервала значений коэффициента трения

$$f_{\min} \dots f_{\max}.$$

Тот или иной характер функции  $T_n(f_i)$  зависит от соотношения значений коэффициентов трения  $f_{\max}$ ,  $f_3$  и, в частности, от значения сомножителя-дроби в соотношении (3).

В том случае, если:

– сомножитель-дробь в соотношении (3) равен единице, то функция  $T_n(f_i)$  монотонно возрастает в интервале значений коэффициента трения  $f_{\min} \dots f_{\max}$ ;

– сомножитель-дробь в соотношении (3) равен  $1/m$  (где  $m = f_{\max} / f_{\min}$  – относительная ширина интервала изменения коэффициента трения), то функция  $T_n(f_i)$  монотонно убывает в указанном интервале;

– сомножитель-дробь в соотношении (3) равен любому значению, принадлежащему интервалу значений  $1 \dots m$ , то функция  $T_n(f_i)$  имеет точку максимума, соответствующую значению коэффициента трения  $f_3$ , вычисляемому по соотношению (3) при определенном значении коэффициента  $n$ .

Сомножитель-дробь в соотношении (3) равен единице при значении коэффициента  $n$ , которое определяется по следующей формуле:

$$n = \frac{1}{z_1}. \quad (4)$$

При значении  $z_1 = 1$  коэффициент  $n$  также равен единице. Это соответствует варианту АФМ второго поколения с одинаковыми значениями средних радиусов поверхностей трения фрикционных групп 1 и 2 (рис. 1). При значении  $z_1 > 1$  максимальное значение коэффициента  $n$ , согласно соотношению (4), равно 0,5 (при  $z_1 = 2$ ), что практически неосуществимо, исходя их конструктивно-компоновочной схемы АФМ второго поколения (рис. 1).

Из изложенного следует, что при  $n < 1$  функция  $T_n(f_i)$  реально не может иметь максимум в точке, соответствующей значению коэффициента трения  $f_i = f_{\max}$ .

Решая неравенство, в котором сомножитель-дробь в соотношении (3) меньше

единицы, находим, что оно удовлетворяется множеством решений, принадлежащих следующей области значений:

$$n \in \left( \frac{z-1}{-z_1}; \frac{1}{z_1} \right). \quad (5)$$

Множество решений (5) показывает, что при значении  $z=1$  решение неравенства имеет следующий вид:

$$0 < n < \frac{1}{z_1}. \quad (6)$$

В остальных случаях, т. е. при  $z > 1$ , значения коэффициента  $n$ , удовлетворяющие неравенству, с учетом физического смысла данного коэффициента, принадлежат интервалу значений (6).

Верхнее граничное значение коэффициента  $n$ , согласно выражению (5), нельзя считать одним из решений неравенства, поскольку подстановка его в неравенство обращает последнее в равенство. Это означает, что при значениях коэффициента  $n < 1$  выполняется неравенство  $f_s < f_{\max}$ , что соответствует появлению максимума функции  $T_n(f_i)$  внутри интервала значений коэффициента трения  $f_{\min} \dots f_{\max}$ .

Априори невозможно однозначно установить характер влияния коэффициента  $n$  на значение вращающего момента АФМ. Действительно, уменьшение коэффициента  $n$  означает уменьшение вращающего момента, который передает фрикционная группа 2 (см. рис. 1). С другой стороны, уменьшается распорная сила  $F_p$  (рис. 1, сечение А-А) и, соответственно, увеличивается вращающий момент, передаваемый фрикционной группой 1.

Для установления влияния коэффициента  $n$  на полный вращающий момент АФМ исследуем функцию  $T_n(n)$ , которая имеет следующий вид [8]:

$$T_n = \frac{F_n R_{cp} f_i [(z + z_1 n) - z_1 n C f_i]}{1 + (z-1) C f_i},$$

или, с учетом соотношения (2) (в форме равенства):

$$T_n = F_n R_{cp} f_i \frac{z + z_1 n - f_i / f_{\max}}{1 + (z-1) f_i / (z_1 n f_{\max})}. \quad (7)$$

При условии  $f_i = f_{\max}$  запишем равенство (7) в следующем виде:

$$T_{n,\max} = F_n R_{cp} f_{\max} \frac{z + z_1 n - 1}{1 + (z-1) / (z_1 n)} = z_1 n F_n R_{cp} f_{\max} \quad (8)$$

а при значении коэффициента трения  $f_i = f_{\min} = f_{\max} / m$  – как

$$T_{n,\min} = z_1 n F_n R_{cp} \frac{f_{\max}}{m} \times \frac{(z + z_1 n) m - 1}{z + z_1 n m - 1}. \quad (9)$$

Функция (8) убывает при уменьшении коэффициента  $n$ . Для установления характера функции (9) по аргументу  $n$  запишем ее первую производную (без учета постоянных членов и положительного знаменателя производной):

$$D(T_{n,\min})_n = z_1^2 m^2 n^2 + 2 z_1 (z-1) m n + (z-1)(z m - 1).$$

Производная положительна при любых реальных значениях входящих в нее параметров, поэтому функция (9) является возрастающей по аргументу  $n$ . Для дальнейшего исследования необходимо знать скорость изменения функций (8) и (9), в связи с чем сопоставим значения производных этих функций. Предполагая, что

$$D(T_{n,\min})_n < D(T_{n,\max})_n,$$

получаем следующее неравенство:

$$[z_1^2 m^2 n^2 (m-1)] + (z-1) m [2 z_1 n (m-1) - 1] > 0.$$

При установленном выше ограничении  $n > 0,5$ ,  $z_1 = 1$  и  $m = 2$  (минимальное значение изменения коэффициента трения [9]) второе слагаемое в последнем неравенстве положительное, кроме случая, когда  $z=1$ : в последнем случае оно равно нулю.

С учетом указанного ограничения коэффициента  $n$  и минимальных значений параметров  $z_1$  и  $m$  первое слагаемое в последнем неравенстве также положительное и только при  $n=0,5$  оно обращается в нуль.

Следовательно, при изменении коэффициента  $n$  функция (8) изменяется быстрее, чем функция (9).

С целью окончательного формирования исходных данных для проведения дальнейшего исследования установим характер изменения функции (3) по аргументу  $n$ . Для этого вычислим первую производную функции (3):

$$D(f_3)_n = z z_1^3 n [4z(z-1) - n] + z_1^3 n^2 (4z^2 z_1 - 1) + z^2 z_1^2 (1-n) + z^3 z_1^2 (z-2) + z_1^2 n (z + z_1 n). \quad (10)$$

Поскольку на данном этапе исследования предполагается, что число пар трения  $z$  и  $z_1$  может быть произвольным, вид математического выражения производной не позволяет однозначно определить ее знак. В связи с этим воспользуемся следующим приемом.

Анализ функции (10) показывает, что она является возрастающей по аргументу  $z$ , поэтому, рассматривая предельный случай в виде  $z=1$ , преобразуем правую часть производной и запишем ее как

$$D(f_3)_n = z_1^3 n^2 (4z_1 - 1).$$

Очевидно, что в рассматриваемом случае  $D(f_3)_n > 0$ . Данный вывод можно распространить и на все те случаи, когда  $z > 1$ .

Таким образом, при уменьшении значения коэффициента  $n$  происходит следующее:

- смещение максимума функции  $T_n(f_i)$  от значения  $T_{n,max}$  внутрь интервала значений вращающего момента  $T_{n,min} \dots T_{n,max}$  (где  $T_{n,min}$ ,  $T_{n,max}$  – соответственно предельные минимальный и максимальный вращающие моменты АФМ) вследствие уменьшения значения коэффициента трения  $f_3$ ;

- сопутствующее указанному смещению максимума функции  $T_n(f_i)$  уменьшение вращающего момента  $T_{n,max}$ , т. е. вращающего момента, передаваемого муфтой при значении коэффициента трения  $f_i = f_{max}$ ;

- сопутствующее уменьшение значения вращающего момента  $T_{n,min}$ , т. е. вращающего момента, передаваемого муфтой при значении коэффициента трения  $f_i = f_{min}$ .

Попутно заметим, что, как установлено выше, значение вращающего момента  $T_{n,max}$  уменьшается быстрее, чем значение вращающего момента  $T_{n,min}$ . Следовательно, при уменьшении коэффициента  $n$  на определенную величину становится возможным равенство  $T_{n,min} = T_{n,max}$ .

Действительно, приравнивая друг к другу правые части формул (8) и (9), найдем значение коэффициента  $n$ , удовлетворяющее поставленному условию:

$$n = \frac{1}{z_1 m}. \quad (11)$$

Анализ соотношения (11) показывает, что найденное значение коэффициента  $n$  удовлетворяет поставленному условию лишь теоретически. Значение коэффициента  $n$ , вычисляемое по соотношению (11), невелико даже при  $z_1=1$  и не может быть реализовано на практике вследствие особенностей конструктивно-компоновочной схемы рассматриваемого варианта муфты.

Заметим, что соотношение (11) вывод к нему получены при ограничении значения КУ в соответствии с соотношением (2). Абстрагируясь от соотношения (2) и используя равенство  $T_{n,min} = T_{n,max}$ , входящие в которое члены вычисляются по приведенной выше формуле для определения вращающего момента  $T_n$  (с учетом равенств  $f_i = f_{min}$  и  $f_i = f_{max}$  соответственно), найдем значение КУ, удовлетворяющее этому неравенству:

$$C_3 = \frac{\sqrt{[z_1 n (m+1)]^2 + 4z_1 n m (z-1)(z+z_1 n) - z_1 n (m+1)}}{2z_1 n (z-1) f_{max}}. \quad (12)$$

Предельное значение КУ определяется по соотношению (2) (в форме равенства), поэтому, решая неравенство  $C_3 \leq C$ , находим, с учетом соотношения (12), что данное неравенство выполняется в случае следующего множества решений:

$$n \in \left( -\frac{z-1}{z_1}; \frac{1}{z_1 m} \right). \quad (13)$$

Множество решений (13) показывает, что предельное положительное значение коэффициента  $n$  соответствует его значению

нию, которое определяется по соотношению (11). Следовательно, реальное получение равенства вращающих моментов на границах интервала изменения коэффициента трения не представляется возможным по указанной выше причине.

В связи с этим, исследование в дальнейшем будет направлено на установление характера влияния коэффициента  $n$  на точность срабатывания муфты и выявления, на основе этого, его оптимальных значений,

$$K_T = \frac{f_3(z + z_1 n - f_3 / f_{\max})[z + (z-1)f_{\min} / (z_1 n f_{\max})]}{f_{\min}(z + z_1 n - f_{\min} / f_{\max})[z + (z-1)f_3 / (z_1 n f_{\max})]} \quad (14)$$

Формула (14) записана с учетом соотношений (1), (2) и (7). При этом учтено, что, в соответствии с изложенным выше, с уменьшением значения коэффициента  $n$  уменьшаются граничные значения вращающего момента и, поскольку не достигается их равенство, минимальным является вращающий момент, соответствующий коэффициенту трения  $f_{\min}$ .

Исследование влияния коэффициента  $n$  на значение коэффициента точности  $K_T$  в аналитической форме затруднительно, поэтому используем графический способ.

Прежде, чем приступить к построению соответствующих графиков зависимостей  $K_T(n)$  и  $f_3(n)$ , необходимо определить оптимальное число пар трения  $z_1$  фрикционной группы 2 (см. рис. 1). На данной стадии исследования оптимальность параметра  $z_1$  установим в контексте его влияния на появление максимума функции  $T_n(f_i)$  внутри интервала значений коэффициента трения  $f_{\min} \dots f_{\max}$ .

Для попадания значения коэффициента трения  $f_3$  внутрь указанного интервала должно, по меньшей мере, выполняться неравенство  $f_3 < f_{\max}$ . Учитывая решение (5), согласно которому при значениях коэффициента  $n < 1/z_1$  выполняется, в соответствии с соотношением (3), указанное неравенство, и принятое ограничение минимального значения коэффициента  $n$ , равное 0,5, необходимо принять единствен-

приемлемых по соображениям конструктивно-компоновочного решения АФМ.

Учитывая установленный выше характер изменения значения вращающего момента муфты, связанного с изменением значения коэффициента  $n$ , можно предположить, что точность срабатывания АФМ будет повышаться по мере его уменьшения.

В данном случае значение коэффициента точности АФМ определяется по формуле:

ное значение, удовлетворяющее поставленным условиям, а именно  $z_1 = 1$ .

При построении упомянутых выше графиков требуется также оценить нижнюю границу изменения значения коэффициента  $n$ . Для этого воспользуемся следующими рассуждениями.

Согласно данным работы [11], коэффициент ширины поверхности трения фрикционного диска составляет:

$$\psi = b/D_{cp}, \quad (15)$$

где  $b$  – ширина кольцевого участка поверхности контакта фрикционного диска фрикционной группы 1 (см. рис. 1);  $D_{cp}$  – средний диаметр поверхностей трения.

Члены формулы (15) определяются по следующим соотношениям:

$$b = \frac{D_H - D_B}{2}, \quad (16)$$

$$D_{cp} = \frac{D_H + D_B}{2},$$

где  $D_H$  и  $D_B$  – соответственно наружный и внутренний диаметры кольцевого участка фрикционного диска.

Подставляя соотношения (16) в формулу (15), получаем следующее выражение:

$$\psi = \frac{D_H - D_B}{D_H + D_B}. \quad (17)$$

Чаще всего на практике применяют для фрикционных муфт  $\psi = 0,25$  [10], поэтому, используя соотношение (17), устанавливаем связь между размерами  $D_B$  и  $D_H$  в следующей форме:

$$D_b = 0,6 D_n. \quad (18)$$

Для предохранительных фрикционных муфт обычной точности срабатывания соотношение между размером  $D_n$  и наружным диаметром ступицы полумуфты составляет  $D_n / d_{ст} = 1,5 \dots 2$  [12]. В конструкциях АФМ ведущие диски фрикционной группы 1 смонтированы на ступице нажимного диска, который, в свою очередь, размещается на ступице нажимного диска (см. рис. 1). В связи с этим, указанное соотношение для АФМ должно быть увеличено до значений 2,5...3.

В соответствии с этим, внутренний диаметр фрикционного диска можно представить через диаметр ступицы полумуфты в форме следующего соотношения:

$$D_b = 1,8 d_{ст}. \quad (19)$$

При выводе соотношения (19) учитывалось выражение (18).

Диски фрикционной группы 2 (см. рис. 1) расположены с наружной стороны нажимного диска, поэтому их внутренний диаметр лимитируется только диаметром ступицы полумуфты. В связи с этим запишем следующее соотношение:

$$D'_b = 1,1 d_{ст}, \quad (20)$$

где  $D'_b$  – внутренний диаметр диска фрикционной группы 2 (см. рисунок 1).

Наружный диаметр диска фрикционной группы 2 необходимо определять, исходя из условия равенства друг другу значений контактного давления на поверхностях контакта с целью обеспечения одинакового характера изменения коэффициента трения обеих фрикционных групп муфты. Это обуславливает также равенство друг другу площадей контакта элементов фрикционных групп.

Площадь контакта одной пары элементов фрикционной группы 1 определяется по формуле:

$$S = \frac{\pi}{4} (D_n^2 - D_b^2),$$

или, с учетом соотношения (18) –

$$S \approx 0,58 D_n^2 \approx 4,522 d_{ст}^2. \quad (21)$$

Соответственно для пары элементов фрикционной группы 2 имеем:

$$S_1 = \frac{\pi}{4} [(D'_n)^2 - (D'_b)^2],$$

где  $S_1$  – площадь контакта пары элементов фрикционной группы 2;  $D'_n$ ,  $D'_b$  – соответственно наружный и внутренний диаметры диска фрикционной группы 2.

Учитывая соотношение (20), запишем последнюю формулу как

$$S_1 = \frac{\pi}{4} [(D'_n)^2 - (1,21 d_{ст})^2]. \quad (22)$$

Приравнявая друг другу правые части равенств (21) и (22), находим:

$$D'_n \approx 2,64 d_{ст}. \quad (23)$$

Средний радиус поверхностей трения элементов пар фрикционной группы 2, с учетом соотношений (20) и (23), равен:

$$R'_{cp} = \frac{D'_n + D'_b}{4} \approx 0,935 d_{ст}. \quad (24)$$

Средний радиус поверхностей трения фрикционной группы 1 равен:

$$R_{cp} = \frac{D_n + D_b}{4} = 1,2 d_{ст}. \quad (25)$$

С учетом соотношений (24) и (25) значение коэффициента  $n$  равно:

$$n = \frac{R'_{cp}}{R_{cp}} \approx 0,78. \quad (26)$$

Полученное значение коэффициента  $n$ , согласно соотношению (26), представляет собой минимально допустимое значение, по условиям конструктивно-компоновочной схемы АФМ.

С учетом найденного оптимального значения параметра  $z_1$  и нижней границы изменения значения коэффициента  $n$ , а также исходных данных  $z=4$ ,  $f_{min}=0,1$ ,  $f_{max}=0,8$  построен график зависимости  $K_T(n)$ , показанный на рис. 2 (кривая 1). Кривая 2 на этом же рисунке отражает график зависимости  $f_s(n)$ . Кривая 1 построена по формуле (14), кривая 2 – по формуле (3).

Для установления влияния параметра  $z$  на точность срабатывания АФМ и на значение коэффициента трения  $f_s$  на рисунке 2 показан график зависимости  $K_T(n)$  при  $z=6$  (кривая 3). График зависимости  $f_s(n)$  практически может быть отражен кривой 2.

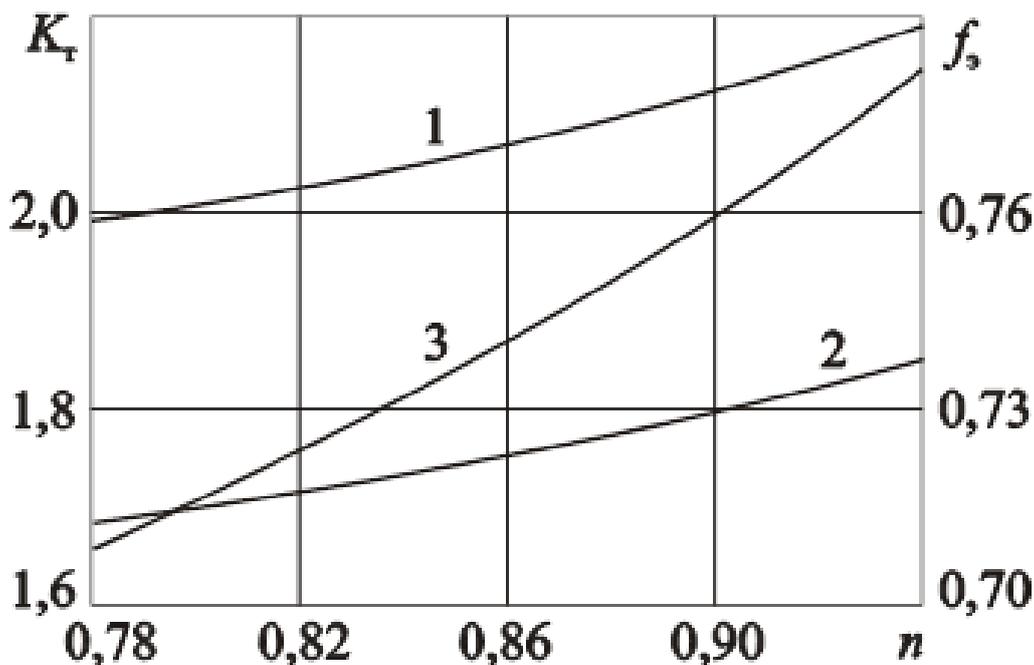


Рисунок 2. Зависимости коэффициента точности АФМ и коэффициента трения  $f$ , от коэффициента  $n$

Графики показывают, что точность срабатывания АФМ уменьшается по мере увеличения значения коэффициента  $n$  и приближения его к единице (кривые 1 и 3). Это указывает на то, что точность срабатывания АФМ при  $n < 1$  выше, чем муфты при  $n = 1$ .

Точность срабатывания исследуемой АФМ повышается с увеличением числа пар трения фрикционной группы 1, что соответствует характеру аналогичной зависимости для АФМ первого поколения (типа муфты Н.Д. Вернера [4]) и объясняется увеличением значения приведенного КУ  $(z-1)C$ .

Выше найдено минимальное значение коэффициента  $n$ , исходя из принятых в практике конструирования предохранительных фрикционных муфт соотношений радиальных размеров их деталей. Данные соотношения представляются оптимальными, поскольку увеличение отношения  $D_n / d_{ст}$  приводит к росту радиальных габаритных размеров и массы муфты без повышения ее точности срабатывания [13, 14].

Исходя из характера влияния коэффициента  $n$  на точность срабатывания АФМ и способа уменьшения его значения за счет увеличения параметра  $R_{ср}$ , можно сделать

вывод о том, что увеличение радиальных габаритных размеров АФМ будет происходить на фоне повышения точности срабатывания муфты.

В работе [15] показано, что увеличение размеров и массы АФМ не имеет решающего значения с точки зрения увеличения массы привода машины, поскольку сопутствующее этому повышение точности срабатывания муфты позволяет уменьшить действующие в узлах и деталях привода механические напряжения и их массу.

В связи с этим, окончательное решение задачи по определению оптимального значения коэффициента  $n$  должно осуществляться с учетом минимизации общей массы привода машины на основе повышения точности срабатывания муфты.

### Обсуждение и результаты

Установление факта повышения точности срабатывания АФМ второго поколения, кривая нагрузочной характеристики которой имеет точку максимума внутри интервала значений коэффициента трения  $f_{min} \dots f_{max}$ , открывает возможности ее более широкого использования в приводах машин для уменьшения их габаритных размеров и массы при высокой эффективности защиты от перегрузок.

Вместе с этим, дальнейшее повышение точности срабатывания базового варианта АФМ второго поколения с неодинаковыми средними радиусами поверхностей трения адаптивной и неадаптивной фрикционных групп принципиально невозможно вследствие конструктивно-компоновочного решения муфты, что требует разработки на основе базового варианта АФМ второго поколения устройств с модернизированными конструктивно-компоновочными решениями.

Результаты исследования могут быть использованы при расчетах и проектировании модернизированного варианта АФМ второго поколения с неодинаковыми значениями средних радиусов поверхностей трения адаптивной и неадаптивной фрикционных групп.

### Заключение

Установление возможности получения максимума кривой нагрузочной характеристики АФМ второго поколения с неодинаковыми средними радиусами поверхностей трения фрикционных групп позволило в результате исследования найти оптимальное соотношение между указанными параметрами, позволяющее повысить точность срабатывания муфты.

Результаты исследования позволяют заключить следующее:

– при наличии максимума вращающего момента АФМ второго поколения внутри интервала значений коэффициента трения  $f_{\min} \dots f_{\max}$  она обладает более высокой точностью срабатывания по сравнению с муфтой, имеющей максимум на верхней границе упомянутого интервала;

– наличие максимума вращающего момента внутри упомянутого интервала обеспечивается в АФМ второго поколения уменьшением среднего радиуса поверхностей трения неадаптивной фрикционной группы;

– уменьшение величины отношения среднего радиуса поверхностей трения неадаптивной фрикционной группы к среднему радиусу поверхностей трения адаптивной фрикционной группы уменьшает значение коэффициента трения, соответ-

ствующее максимуму вращающего момента и к повышению точности срабатывания АФМ;

– с учетом конструктивно-компоновочного решения и для повышения точности срабатывания АФМ неадаптивная фрикционная группа может иметь только одну пару трения;

– базовый вариант АФМ второго поколения с неодинаковыми значениями средних радиусов поверхностей трения адаптивной и неадаптивной фрикционных групп по условию конструктивно-компоновочного решения не обеспечивает равенство друг другу вращающих моментов на границах интервала изменения коэффициента трения.

### Библиографический список

1. Шишкарёв М.П. Оптимизация компоновочного решения базового варианта адаптивной фрикционной муфты второго поколения // Вестн. машиностроения. – 2006. – № 6. – С. 7–10.
2. Шишкарёв М.П., Лущик А.А., Угленко А.Ю. Точность срабатывания адаптивной фрикционной муфты второго поколения (модифицированной) / Материалы 6-й научно-практической конференции «Инновационные технологии в машиностроении и металлургии» 10-12 сент. 2014, Ростов н/Д, 2014. – С. 118–130.
3. Шишкарёв М.П. Уровень перегрузки при срабатывании адаптивных фрикционных муфт // Тракторы и сельхозмашины. – 2010. – № 2. – С. 42–44.
4. Шишкарёв М.П. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик адаптивных фрикционных муфт // Вестн. машиностроения. – 2006. – № 4. – С. 29–30.
5. Шишкарёв М.П. Вопросы теории адаптивного фрикционного контакта твердых тел // Изв. вузов. Машиностроение. – 1994. – № 4–6. – С. 43–47.
6. Шишкарёв М.П. Исследование режима перегрузки АФМ второго поколения (базовый вариант). В сборнике: Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: Сборник статей 8-й международной научно-

- практической конференции в рамках 18-й международной агропромышленной выставки «Интерагромаш-2015». – 2015. – С. 182–185
7. Шишкарёв М.П., Чан Ван Дык. Обоснование наибольшей точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2015. – № 11. – С. 20–26.
  8. А. с. 1730488 СССР, МПК<sup>5</sup> F 16 D 7/02. Предохранительная фрикционная муфта / М.П. Шишкарёв (СССР). – № 4776309/27; Заявлено 29.12.89; Опубл. 30.04.92. Бюл. № 16. – 5 с.: ил.
  9. Шишкарёв М.П. Теоретические основы стабилизации выходного параметра адаптивного фрикционного контакта твердых тел // Изв. вузов. Машиностроение. – 2001. – № 2–3. – С. 17–23.
  10. Шишкарёв М.П. Анализ переходного периода адаптивных фрикционных контактов в условиях положительного прироста коэффициента трения // Изв. вузов. Машиностроение. – 2000. – № 3. – С. 14–17.
  11. Шишкарёв М.П., Чан Ван Дык. Исследование вариантов адаптивных фрикционных муфт второго поколения // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 9. – С. 42–45.
  12. Шишкарёв М.П. Математические модели адаптивного фрикционного контакта твердых тел 2-го поколения // Математические методы в технике и технологиях: Сб. тр. XVIII междунар. науч. конф. В 10 т. Т. 5. Секция 5 «Компьютерная поддержка производственных процессов» / Под общ. ред. В.С. Балакирева – Казань: изд-во Казанского гос. технол. ун-та, 2005. – С. 72–76.
  13. Шишкарёв М.П. Улучшение эксплуатационных показателей адаптивных фрикционных муфт. – Ростов н/Д: Изд-во РГАСХМ, 2008. – 148 с.
  14. Шишкарёв М.П., Чан Ван Дык. Анализ точности срабатывания адаптивной фрикционной муфты второго поколения // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2016. – № 5. – С. 33–38.
  15. Шишкарёв М.П. Оптимизация коэффициента усиления адаптивных фрикционных муфт первого поколения с дифференцированными парами трения // Тракторы и сельхозмашины. – 2010. – № 4. – С. 36–39.

---

*Information about the paper in English*

**M.P. Shishkarev**  
Don State Technical University  
Rostov-on-Don, Russia  
E-mail: shishkarevm@mail.ru  
Received 23.09.2020

PERFORMANCE RELIABILITY OF AN ADAPTIVE FRICTION CLUTCH  
OF THE SECOND GENERATION (A BASIC VERSION)

**Abstract**

It is shown that at maximum torque an adaptive friction clutch of the second generation within the range of values of the friction factor has higher clutch operation accuracy. Maximum torque is ensured by decreasing the average radius of the friction surfaces of the non-adaptive friction group. It is found that a decrease in the ratio of the average radius of the friction surfaces of the non-adaptive friction group to the average radius of the friction surfaces of the adaptive friction group reduces the value of the friction factor corresponding to maximum torque and increases clutch operation accuracy. Factoring into the structural and layout solution and increasing clutch operation accuracy, a non-adaptive friction group can have only one friction pair.

**Keywords:** adaptive friction clutch, reliability, load characteristics, clutch operation accuracy, amplification factor, friction factor.

---



УДК 004.94

**Е.С. Решетникова, Ю.В. Гайворонская, Ю.А. Гудаева**  
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова»  
г. Магнитогорск, Россия  
E-mail: elenresh74@gmail.com  
Дата поступления 21.12.2020

## ТЕОРИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В КОМПЕТЕНЦИИ ИНЖЕНЕРНЫЙ ДИЗАЙН CAD

### Аннотация

Чемпионаты WorldSkills сегодня - это эффективный инструмент повышения престижа рабочих специальностей и подготовки высококвалифицированных кадров в соответствии с мировыми стандартами и потребностями современных высокотехнологичных производств. Промышленности требуются опытные специалисты, способные разрабатывать инновационные технологии и продукцию, быстро адаптироваться к новым требованиям времени. Поэтому одна из главных задач технических ВУЗов — научить будущих инженеров основным навыкам работы в современных системах автоматизированного проектирования, обеспечив при этом высокий уровень практической подготовки.

**Ключевые слова:** WorldSkills, Молодые профессионалы, чемпионат, «Инженерный дизайн CAD», система автоматизированного проектирования, конкурсное задание.

### Введение

Вузовские чемпионаты «Молодые профессионалы» проводятся в России с 2017 года и направлены на повышение уровня практической ориентированности программ вузов и формирование единой системы оценки инженерных специальностей в стране. Основная цель – повышение востребованности профессионального образования, в соответствии с реальными запросами работодателей. Система вузовских чемпионатов включает 3 уровня: вузовские чемпионаты, межвузовские отборочные чемпионаты и финал национального межвузовского чемпионата.

Финал IV Национального межвузовского чемпионата «Молодые профессионалы» (Ворлдскиллс Россия) прошел с 1 по 7 декабря 2020 года в дистанционно-очном формате. Организаторы: Департамент предпринимательства и инновационного развития города Москвы, АНО «Агентство стратегических инициатив по продвижению новых проектов» (АСИ) и Союз «Молодые профессионалы (Ворлдскиллс Россия)». В 2020 году увеличилось количество участников чемпионата (с 497 человек в

2019 году до 738 человек в 2020 году) и образовательных организаций страны (в 2019 году – 72, в 2020 году - 77) из 39 субъектов страны. Также увеличилось количество компетенций - 63 компетенции (в 2019 - 52 компетенции). Более чем в 3 раза выросла география стран-участниц: в 2019 принимали участие 32 иностранных студента из 9 стран, в 2020 - 130 иностранных конкурсантов из 30 стран соревновались по 15 компетенциям.

### Описание компетенции «Инженерный дизайн CAD»

В компетенции «Инженерный дизайн CAD» (05 Mechanical Engineering Design – CAD, WorldSkills International) проверяются практические навыки проектирования изделий машиностроительной области. По мнению сертифицированного эксперта с большим опытом в данной компетенции Петрова Е.Е. название компетенции переводится на русский язык не совсем точно. Более верным переводом Mechanical Engineering было бы «Машиностроение» или «Машиностроительное проектирование» [1]. Название компетенции «Машиностроительное проектирование САПР» для

специалистов отечественных предприятий, являющихся потенциальными работодателями для выпускников ВУЗов, было бы более информативным.

В отличие от таких компетенций как Поварское дело или Сварочное дело отнести данную компетенцию в одной специальности подготовки в системе среднего профессионального и высшего образования крайне затруднительно. На основании списка ТОП-50 [2] и технического описания компетенции «Инженерный дизайн CAD (САПР)» автором [1] определен перечень специальностей, формирующих у студентов среднего профессионального образования навыки, схожие с навыками необходимыми для успешного выполнения работ в данной компетенции:

- 40.052 Специалист по проектированию оснастки и специального инструмента;
- 40.031 Специалист по технологиям материалобработывающего производства;
- 31.019 Специалист металлообрабатывающего производства в автомобилестроении;
- 30.002 Специалист по проектированию и конструированию авиационной техники;
- 31.010 Конструктор в автомобилестроении;
- 25.023 Специалист по проектированию и конструированию систем жизнеобеспечения, терморегулирования, агрегатов пневмогидравлических систем пилотируемых космических кораблей, станций и комплексов.
- 15.02.15 Технология металлообрабатывающего производства
- 15.02.08 Технология машиностроения и профессии
- 15.01.22 Чертежник-конструктор.

Для системы высшего образования перечень направлений подготовки (специалитета) для отбора на чемпионат в данной компетенции гораздо шире, что говорит о высокой востребованности студентов, добивающихся высоких результатов, не только в области машиностроения, но и в

ряде смежных отраслей. В МГТУ им. Носова хорошие результаты в данной компетенции ежегодно показывают студенты, обучающиеся по программе специалитета 15.05.01 Проектирование технологических машин и комплексов [3].

В конкурсных заданиях компетенции проверяются следующие области знаний:

- детали из листового металла;
- рамные конструкции и узлы;
- сварные детали и узлы;
- механические детали и узлы;
- чертежи деталей и сборок;
- функциональное моделирование и фотореалистичный рендеринг;
- обратное конструирование по физической модели;
- изменение конструкции изделия согласно заданию на проектирование.

В конкурсном задании может быть включена проверка навыков, связанных с силовым расчетом конструкций - расчетом силовых характеристик (прочность, жесткость, устойчивость) с использованием конечно-элементного анализа. Кроме того, участник должен быть готов рассчитать характеристики конструкции и внести изменения для оптимизации. Так же могут оцениваться навыки, связанные с изменением геометрии объекта для оптимального распределения материала, могут использоваться функции параметризации. На финале IV Национального межвузовского чемпионата «Молодые профессионалы» было добавлено задание по моделированию недостающей детали в конструкции.



Рисунок .1 Фотореалистичный рендеринг конкурсного задания компетенции «Инженерный дизайн CAD»

Качественный уровень выполнения конкурсных работ в связи с последними требованиями в компетенции «Инженерный дизайн CAD» возможен только при изучении целого комплекса дисциплин, входящих в базовую и вариативную части

образовательных программ высшего образования. Для студентов специальности 15.05.01 Проектирование технологических машин и комплексов перечень дисциплин, формирующих соответствующие навыки, представлен в таблице 1.

Таблица 1  
Дисциплины, формирующие навыки для выполнения модулей конкурсного задания «Инженерный дизайн CAD» по стандартам Ворлдскиллс

Модуль конкурсного задания	Критерии оценки	Дисциплины
Модуль А Механическая сборка и чертежи для производства	Моделирование деталей Моделирование сборок Проектирование новой детали Создание чертежа новой детали Выполнение расчета размерной цепи Выполнение расчета крепежного соединения Создание анимации разборки	Инженерная графика Метрология, стандартизация, сертификация и основы взаимозаменяемости Теоретическая механика Сопротивление материалов Теория механизмов и машин Детали машин
Модуль В Машиностроительное производство	Моделирование деталей Моделирование сборок Создание чертежей деталей и сборочных единиц Создание фотореалистичного изображения Создание анимации Рамные конструкции Создание детали из листового материала	Материаловедение Моделирование в машиностроении
Модуль С Внесение изменений в конструкцию изделия	Внесение изменений в конструкцию для установки элементов Внесение изменений по расчётам	

Таким образом, студент, обучающийся по программе специалитета 15.05.01, будет обладать полным объемом соответствующих знаний и навыков на третьем курсе обучения в ВУЗе. Однако выявлять талантливых студентов возможно уже на первом курсе обучения на занятиях по инженерной графике, так как пространственное мышление, необходимое для создания геометрических моделей в САПР, разработки и чтения чертежей формируется именно в процессе геометро-графической подготовки [4].

Стоит отметить, что в соревнованиях по компетенции Инженерный дизайн CAD

проверка знаний осуществляется посредством оценки только практической работы, а спецификация стандартов WorldSkills (WSSS) разделена на разделы, каждому из которых назначен процент относительной важности, из которых:

- организация и управление работой - 15 %;
- материалы, материальное обеспечение и техническое обеспечение - 15 %;
- трехмерное моделирование и создание анимации - 30 %;
- создание тонированных изображений фотографий (2D) - 5 %;

- восстановление конструкции (реверсивный инжиниринг) - 10 %;
- технические чертежи и замеры - 25%.

В результате такой оценки формируется общее представление об инженерных навыках конкурсанта и способности организации работы.

### **Опыт подготовки конкурсантов компетенции «Инженерный дизайн САД» в Китае**

Учитывая тот факт, что задания, согласно правилам чемпионатов, являются сложными даже для профессионалов, участник должен иметь значительную скорость выполнения работы. Для приобретения высокой скорости без потери качества обучения проведение только аудиторных занятий недостаточно. Поэтому стоит обратить внимание на проведение занятий в кружках как внеучебной деятельности студентов. В работе [5] показана методика подготовки участников в данной компетенции в Китае, представители которого показывают высочайший уровень на мировых чемпионатах.

Автор статьи [5] во время визита в Колледж промышленности и торговли в городе Гуанчжоу (Guangzhou Industrial and Trade Technical College, GZITTC) изучил устройство тренировочной базы, а также ознакомился с принципами отбора в кружок геометро-графической подготовки. Посетить колледж удалось во время международной тренировки в рамках подготовки к чемпионату Европы Euroskills-2016».

Занятия в кружке проводят тренеры, в числе которых: преподаватель начертательной геометрии, инженерной и компьютерной графики, преподаватель САПР, тренер национальной сборной с опытом участия в чемпионатах мира, а также участники и победители чемпионатов разных уровней. Зачисление в кружок для китайских студентов считается очень престижным, выделяет их из общего потока обучающихся и дает ряд преимуществ перед остальными учащимися. Дополнительные занятия проводятся ежедневно в течение двух академических часов и предполагают обязательное

выполнение домашних заданий. Выполнение домашних заданий является обязательным условием нахождения в кружке. С периодичностью один раз в три месяца производится отбор между обучающимися, по результатам которого часть из них возвращается в обычные классы. Проведение регулярных отборов создает высокую конкуренцию в кружке и мотивирует студентов на достижение высоких результатов. Занятия в кружке геометро-графической подготовки дают студентам возможность попасть в национальную сборную КНР.

Как показал опыт Китая, занятия в кружке способствуют качественному усвоению получаемых знаний, совершенствованию навыков работы в современных САПР и достижению высоких результатов на международных чемпионатах. Кроме того, системы кружков позволяют отбирать одаренных студентов для участия в чемпионатах, создают преемственность поколений и передачу опыта между студентами старших курсов – участников чемпионатов и первокурсниками. Внедрение и совершенствование передовых практик подготовки обучающихся позволит поднять уровень практической подготовки выпускников университетов и готовить для промышленности и экономики страны высококвалифицированные кадры.

### **Заключение**

Студенты кафедры ПиЭММО, обучающиеся по программе специалитета 15.05.01 Проектирование технологических машин и комплексов ежегодно проходят отборочные соревнования на финал национального чемпионата Ворлдскиллс Россия в компетенции «Инженерный дизайн САД», показывают уверенное владение современными системами автоматизированного проектирования при обучении на старших курсах и востребованы по профилю специальности после завершения обучения. На финале IV Национального межвузовского чемпионата «Молодые профессионалы» (Ворлдскиллс Россия) студент 3 курса группы МПТ-17 Максим Филатов получил медальон за профессионализм в компетенции «Инженерный дизайн САД», чем

подтвердил свою профессиональную классификацию.

### Библиографический список

1. Петров Е. Е. Подготовка результативного участника финала национального чемпионата по методике Worldskills // Профессиональное образование и рынок труда. 2018. № 3. С. 49–56.
2. Приказ Минтруда России №831 от 2 ноября 2015 г. «Об утверждении списка 50 наиболее востребованных на рынке труда, новых и перспективных профессий, требующих среднего профессионального образования» [Электронный ресурс] // Минтруд России. Официальный сайт. URL: <https://rosmintrud.ru/docs/mintrud/orders/436>
3. Решетникова Е.С., Свистунова Е.А., Широков В.О., Гудаева Ю.А. История и перспективы развития компетенции инженерный дизайн CAD (САПР) по стандартам WORLDSKILLS в МГТУ им. Г.И. НОСОВА // Механическое оборудование металлургических заводов. 2019. № 1 (12). С. 103-112.
4. Петров Е. Е. Конкурсные задания для соревнований по профессиональному мастерству по компетенции «Инженерный дизайн CAD (САПР)» как инструмент повышения качества подготовки студентов в области геометрического моделирования // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Педагогика. 2019. № 1. С. 79–89. DOI: 10.18384/2310-7219-2019-1-79-8
5. Петров Е. Е. Опыт обмена практиками подготовки участников конкурсов в сфере профессионального образования с представителями Китайской Народной Республики // Отечественная и зарубежная педагогика. 2019. Т. 1, № 1 (57). С. 84–101.

---

---

### *Information about the paper in English*

**E.S. Reshetnikova, Yu.V. Gaivoronskaya, Yu.A. Gudaeva**  
Nosov Magnitogorsk State Technical University  
Magnitogorsk, Russia  
E-mail: [elenresh74@gmail.com](mailto:elenresh74@gmail.com)  
Received 21.12.2020

### IMAGE THEORY AND PRACTICAL METHODS OF ITS IMPLEMENTATION, WHEN BUILDING GEOMETRICAL MODELS IN THE COMPETENCE “ENGINEERING DESIGN - CAD”

#### Abstract

The WorldSkills championships now are an efficient tool of enhancing prestige of vocational jobs and training highly skilled personnel in compliance with world standards and demands of modern high-technology facilities. The industry needs experienced specialists capable of developing innovative technologies and products, quickly adaptable to new challenges of times. Therefore, one of main objectives of technical universities is to teach basic skills of working in currently existing computer-aided design systems to future engineers and ensure a high level of their practical training.

**Keywords:** WorldSkills, Young Professionals, championship, Engineering design – CAD, computer-aided design system, competition task.

---

---

## ТРЕБОВАНИЯ

к оформлению материалов представляемых для публикации

1. Материалы предоставляются в электронном виде, оформленные в программе MS Word 97-2003.
2. Объем представленных материалов должен быть не менее 6-ти страниц (в режиме оформления одной колонкой на листах формата А4), включая рисунки и таблицы.
3. Формат листа: А4 (210x297 мм).
4. Межстрочный интервал: одинарный.
5. Размер полей слева, справа и сверху страницы 18 мм, снизу 20 мм.
6. Нумерация страниц осуществляется внизу по центру страницы.
7. Шрифт текста: Times New Roman, размер 12 пт.
8. Отступ перед каждым абзацем (красная строка) – 10 мм.
9. Формулы должны быть набраны в тексте, вписывание формул от руки не допускается, размер базового шрифта в формулах – 12 пунктов.
10. Рисунки должны быть вставлены в текст и обязательно представлены в виде отдельного файла в формате jpeg, tiff, bmp с разрешением не менее 300 dpi. Наличие подрисовочной надписи обязательно.
11. Не допускается разрыв таблиц, рисунков, заголовков при переходе со страницы на страницу.
12. Структура текста.
  - 12.1. Индекс УДК.
  - 12.2. Имя, отчество и фамилия авторов, жирный шрифт – Times New Roman, размер – 12 пт.
  - 12.3. Наименование организации.
  - 12.4. Город, страна.
  - 12.5. Контактный адрес электронной почты (E-mail).
  - 12.6. Название (должно быть набрано прописными буквами не в режиме CAPS LOCK (SHIFT)).
  - 12.7. Аннотация (объем не менее 100 слов).
  - 12.8. Ключевые слова (не менее 8 слов).
  - 12.9. Введение.
  - 12.10. Основная часть.
  - 12.11. Заключение (Выводы).
  - 12.12. Библиографический список.
13. Библиографический список составляется в последовательности ссылок в тексте. В тексте статьи ссылки на литературный источник заключаются в квадратные скобки. Библиографическое описание регламентировано ГОСТ 7.05-2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления».

Материалы для публикации направлять по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова, кафедра «Проектирование и эксплуатация металлургических машин и оборудования».

Контактные телефоны: (3519) 29-85-07, 29-84-51.

E-mail: momz-magtu@yandex.ru, momz-magtu@mail.ru с указанием темы электронного письма «Журнал МОМЗ».

Сайт журнала: www.momz.magtu.ru

Контактное лицо, отв. редактор к.т.н. Слободянский Михаил Геннадьевич.

## ПРАЙС-ЛИСТ

на размещение рекламы в журнале  
«Механическое оборудование металлургических заводов»

№ п/п	Цветная реклама на обложке издания		Черно-белые внутренние полосы	
	Объем	Цена, руб	Объем	Цена, руб
1	2-ая полоса (формат А4)	8000	1 полоса	6000
2	3-ая полоса (формат А4)	8000	½ полосы	4000
3	4-ая полоса (формат А4)	10000	¼ полосы	2000

Статья рекламного содержания		Реклама на сайте издания			
Объем	Цена, руб	Место расположения рекламного контента	Объем / размер	Срок размещения	Цена, руб
1 полоса	3000	Слайдер на главной странице (изображение)	700 x 380 pixels	1-6 месяцев	4000
				6-12 месяцев	6000

### Пример оформления рекламного изображения в слайдере на главной странице сайта издания



- Главная
- О журнале
- Автору
- Архив
- Редакция
- Партнеры
- Контакты

Журнал "Механическое оборудование металлургических заводов"

*Журнал "Механическое оборудование металлургических заводов" является бесплатным изданием открытого доступа.*



**700 x 380 pixels**

Журнал "Механическое оборудование металлургических заводов" является информационным партнером XIV-го международного конгресса сталеплавильщиков

Научно-технический журнал MOM3

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» приглашает Вас опубликовать результаты Ваших научных исследований в журнале «Механическое оборудование металлургических заводов». Журнал «МOM3» включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) и ему присвоен международный стандартный номер сериального издания ISSN 2311-1364. Сведения о журнале