

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Научно-исследовательский центр  
«МашиноСтроение»**



Уральский федеральный университет  
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина

Кыргызско-Российский Славянский университет

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет  
им. С.М. Кирова

Российский государственный аграрный университет – МСХА  
им. К.А. Тимирязева

**ISSN 2587-7577**

# **МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И ПРОЦЕССЫ. ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СОЗДАНИЕ И МОДЕРНИЗАЦИЯ:**

**Материалы международной  
научно-практической конференции**

**№7**

Санкт-Петербург, 2024

УДК 62-1 : 001.8

ББК 30.9

М38

**М38            Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация:** Материалы международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2024. – № 7. – 122 с. – DOI: 10.26160/2587-7577-2024-7.

Представлены материалы VII международной научно-практической конференции «Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация» (26 января 2024г.). Направления работы конференции: 1) Машиностроение и металлообработка; 2) Горные машины и оборудование для добычи полезных ископаемых; 3) Metallургическое производство; 4) Химическая промышленность и нефтегазовая отрасль; 5) Строительство и ЖКХ; 6) Сельскохозяйственное машиностроение и агропромышленный комплекс; 7) Легкая промышленность; 8) Пищевая промышленность.

Материалы могут быть полезными для научных и инженерно-технических работников, докторантов, аспирантов и студентов, занятых исследованием машин и процессов различного технологического назначения.

Учредитель: *Жукова Елена Валерьевна.*

Ответственный редактор:

*Жуков Иван Алексеевич* – директор НИЦ «МашиноСтроение», заведующий кафедрой машиностроения Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, д.т.н., доцент.

Редакционная коллегия:

*Кугаевский Сергей Семенович* – заведующий кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты» УрФУ, к.т.н., доцент.

*Логонов Геннадий Иванович* – профессор кафедры гидротехнического строительства и водных ресурсов КРСУ, д.т.н., доцент;

*Шифрин Борис Маркович* – доцент кафедры автоматизации, метрологии и управления в технических системах СПбГЛТУ, к.т.н., доцент;

*Юсупов Рамазан Хабибрахманович* – профессор кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов РГАУ-МСХА, д.т.н., профессор.

Электронная версия доступна на сайте: <http://srcms.ru/maippsim.html>  
<https://doi.org/10.26160/2587-7577-2024-7>

ISSN 2587-7577

© Авторы, 2024  
© НИЦ МС, 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

**Машиностроение и металлообработка**

<b>Горлов И.В., Полетаева Е.В.</b> Изготовление деталей при ремонте торфяных машин в условиях многономенклатурного производства .....	6
<b>Скрипаленко М.Н., Поляков Ф.А., Скрипаленко М.М.</b> Оценка запаса прочности валка для реализации способа холодной периодической прокатки прутков в стационарной рабочей клетки .....	9
<b>Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Скрипаленко М.Н., Воротников В.А.</b> Оценка деформированного, кинематического и теплового состояния стальной заготовки при двухвалковой винтовой прокатке и их влияние на формирование микроструктуры .....	12
<b>Скрипаленко М.М., Романцев Б.А., Юсупов В.С., Андреев В.А., Скрипаленко М.Н., Гартвиг А.А., Гладков Ю.А., Мыльников Ю.С.</b> Исследование процессов винтовой прокатки заготовок из никелида титана с помощью компьютерного моделирования .....	15
<b>Денисенко А.Ф., Ладыгин Р.В.</b> Выбор и применение нейронных сетей для моделирования эксплуатационных характеристик шпиндельных узлов .....	18
<b>Акинин Д.В., Прохоров В.Ю., Евдокимов Ю.М., Фролов Д.В.</b> Исследование полиамидно-графитовых композиций двухслойных покрытий при восстановлении подшипников скольжения техники .....	21
<b>Кожевников А.В., Кожевникова И.А., Смирнов А.С., Шалаевский Д.Л., Корепина К.П.</b> Исследование влияния разности диаметров бочек верхнего и нижнего рабочих валков клетки на их пробуксовку по поверхности прокатываемой полосы .....	27
<b>Рулин С.П., Петров П.А.</b> Анализ течения металла при прямом выдавливании в сферическую матрицу .....	31
<b>Нгуен В.Д.</b> Криогенная обработка и методы криогенной обработки нержавеющей аустенитных сталей .....	36
<b>Степанов С.С.</b> Разработка современной измерительной системы для операционного контроля прецизионных деталей .....	40
<b>Скрипаленко М.Н., Ерохин А.В., Скрипаленко М.М., Панасюк В.В.</b> Компьютерное моделирование условий работы профилирующего ролика .....	45

<b>Сергеев А.В., Сергеев С.Ф.</b> Применение виртуальных инструментов для управления промышленными роботами .....	48
<b>Ефимова М.В.</b> Современное состояние проблемы обработки кромок деталей летательных аппаратов и перспективы ее решения.....	51
<b>Городинов В.Д., Толстикова А.С., Куц М.С.</b> Тепловой расчет охлаждения редуктора .....	54
<b>Каплюхин А.Э., Бледнова Ж.М.</b> Машинное обучение в процессе проектирования топологически оптимизированной композитной рамы гусеничного движителя.....	59

### **Горные машины и оборудование для добычи полезных ископаемых**

<b>Саиджафаров Ф.А., Холиков М.С., Зоиров Х.А., Курбонов Б.М., Бадалов А.</b> Термодинамические характеристики процесса парообразования технических масел Super V 20W-50 BP и Lumix ATF-IPD-automatic.....	64
<b>Теремецкая В.А.</b> Повышение адаптивности секций крепи очистных комплексов к переменным условиям эксплуатации в угольных шахтах .....	67

### **Металлургическое производство**

<b>Мамедов А.Т., Бабаев А.И., Исмаилов Н.Ш., Гусейнов М.Ч., Мусурзаева Б.Б.</b> Причины разрушения муфт обсадных труб для бурения нефтяных скважин.....	70
<b>Дмитриев Э.А., Карпенко В.А.</b> Численное моделирование процесса перемешивания расплава в кристаллизаторе УНРС при принудительно вращающейся рубашке с вертикальными ребрами .....	75
<b>Зайнуллин А.И., Харитонов В.А.</b> К вопросу выбора деформирующего инструмента для волочения высокоуглеродистой стальной канатной проволоки .....	81
<b>Морозов А.А.</b> Анализ параметров, влияющих на процесс холодной прокатки титановых труб .....	85
<b>Дмитриев Э.А., Намоконов А.Н., Чернышова Д.В., Евстигнеева А.А.</b> Зависимость стойкости сферической керамической оболочковой формы от величины её охвата опорным наполнителем при заливке и кристаллизации отливки.....	88

**Химическая промышленность и нефтегазовая отрасль**

- Солодовников А.Ю.** О некоторых итогах развития химической и нефтехимической промышленности в Тюменской области..... 92
- Седоплатов И.С., Ковалева О.А., Столяров А.А., Ковалев С.В.** Методика определения объема и массы фланца электробаромембранного аппарата плоскокамерного типа ..... 95
- Катин В.Д., Журавлев А.А.** Модернизация и создание новой конструкции малотоксичной горелки для трубчатых печей нефтегазовых предприятий..... 99
- Никифоров А.О., Донова М.Е.** Проведение процессов химической технологии в условиях резонанса в статических смесителях ..... 102
- Чашилов Д.В., Чашилова В.Д.** Вальцовый станок для механической предварительной обработки растительного сырья при выделении волокон для армирования полимерных композиционных материалов..... 105
- Чашилов Д.В., Манухина К.С., Назмутдинов Р.А., Кораблин А.А., Злочевский Л.А., Павлов И.Н.** Экстракционная установка для гидротропного извлечения лигнина из растительного сырья при выделении волокон для армирования полимерных композиционных материалов ..... 108
- Трясцын А.Ю., Ремизова О.А., Томаев В.В.** Влияние факторов внешней среды на измерение импеданса электрохимических сенсорных устройств..... 111

**Сельскохозяйственное машиностроение и агропромышленный комплекс**

- Скобцов И.Г.** Модульная установка для повышения эффективности борьбы с лесными пожарами ..... 115
- Мерчалов С.В., Прядкин В.И.** Расширение технологических возможностей молотковой дробилки ..... 118

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ПРИ РЕМОНТЕ ТОРФЯНЫХ МАШИН В УСЛОВИЯХ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

*Горлов И.В., Поletaева Е.В.*

*Тверской государственный технический университет, Тверь*

**Ключевые слова:** торфяные машины, технология машиностроения, автоматизация, технологическая подготовка производства, групповая технология, гибкие производственные системы.

**Аннотация.** Предлагается новый подход при производстве деталей торфяных машин в условиях непрофильного многономенклатурного производства. В условиях многономенклатурного производства с постоянно изменяющейся загрузкой оборудования высокую эффективность и необходимое качество продукции может быть обеспечено расширением технологических возможностей ГПС (гибких производственных систем), за счет использования для имеющихся станков дополнительных технологических модулей, отвечающих за изготовление проблемных конструкторско-технологических элементов.

## MANUFACTURING PARTS FOR THE REPAIR OF PEAT MACHINES IN MULTI-NOMENCLATURE PRODUCTION CONDITIONS

*Gorlov I.V., Poletaeva E.V.*

*Tver State Technical University, Tver*

**Keywords:** peat machines, mechanical engineering technology, automation, technological preparation of production, structural model, group technology, flexible production systems.

**Abstract.** A new approach is proposed for the production of parts for peat machines in non-core, multi-item production. In conditions of multi-item production with constantly changing equipment load, high efficiency and the required quality of products can be ensured by expanding the technological capabilities of flexible manufacturing systems (flexible production systems), through the use of additional technological modules for existing machines that are responsible for the manufacture of problematic design-technological elements.

Вследствие прекращения серийного производства ряда торфяных машин возникла глобальная проблема – отсутствие необходимого количества качественных запасных частей для ремонта. Это привело к тому, что организации, производящие капитальный и текущий ремонт оборудования для добычи торфа, были вынуждены изготавливать необходимые комплектующие самостоятельно, на базе имеющегося универсального оборудования. В тоже время, большое количество машиностроительных предприятий в области дорожных и строительных машин столкнулось с проблемой сокращения производства.

В таких условиях предприятия, продолжающие свою деятельность, для сохранения производства вынуждены браться за выпуск несвойственных им изделий в условиях малой серийности, что приводит их производственную систему к значительным проблемам, связанным с адаптацией существующих технологических процессов к новым задачам. Решение этой проблемы возможно

за счет использования технологических процессов, обладающих высокой гибкостью.

В настоящее время для достижения высокой эффективности и качества в многономенклатурном производстве существуют несколько подходов. Одним из наиболее перспективных подходов являются групповые технологии, которые основаны на применении ГПС [1]. Однако существующие на предприятиях технологические процессы не всегда отвечают требованиям необходимой гибкости.

При включении в существующую группу новой детали необходимо произвести структурный анализ, для сравнения её КТЭ (конструкторско-технологических элементов) с существующим набором КТЭ группы. Затем выбирается деталь-лидер, которая будет обладать самым большим количеством конструкторско-технологических элементов из деталей группы. На базе выявленной детали-лидера разрабатывается комплексная деталь, путем структурного обогащения её новыми КТЭ.

Для изготовления новых КТЭ в существующей ГПС может не оказаться необходимых технологических возможностей, расширить которые можно различными методами.

Наиболее доступный метод – с помощью специального инструмента с добавлением перехода для соответствующей операции. Например, применение фасонной фрезы при изготовлении сложно-контурной поверхности. В таком случае затраты при изменении группового маршрута будут наименьшие.

Также эту проблему можно решить за счет расширения технологических возможностей станков с ЧПУ с помощью специализированной оснастки. Например, использование дополнительных программируемых поворотных осей для фрезерных станков с ЧПУ. Такие устройства позволяют изготавливать детали, у которых есть сложные поверхности, связанные между собой пространственными связями (зубчатые венцы, шлицы и др.).

Аналогично можно расширить технологические возможности токарных станков с ЧПУ за счет приводных блоков, установленных в револьверную головку. Приводные блоки дополнительно к имеющимся технологическим возможностям станка могут выполнять долбление поверхностей различной формы, фрезерование зубчатых контуров до 8-й степени точности и звездочек методом обката.

Третий путь – выключение в существующий групповой маршрут новой операции. Например, зубофрезерной с использованием зубофрезерного станка с ЧПУ. С помощью его можно изготавливать зубчатые венцы, звездочки, шлицы и др. Данный путь наиболее затратный, но самый производительный при производстве большого таких элементов.

Выбор конкретного решения зависит от большого количества факторов, но самым основным является загрузка оборудования [2, 3]. При использовании групповых технологий в гибком автоматизированном производстве проблема распределения загрузки станков является наиболее сложной.

Проблему изготовления запасных частей для торфяных машин можно решить за счет привлечения к их изготовлению предприятий,

специализирующихся на производстве сельскохозяйственной и строительно-дорожной техники, которые в условиях сокращения основного производства ищут дополнительные заказы. Но традиционный подход при производстве деталей малой серийности с использованием универсального оборудования не может обеспечить необходимое качество продукции при условии приемлемых цен. Одним из возможных путей решения данной проблемы является использование групповых технологий, что позволит с минимальными затратами производить дефицитные детали для торфяных машин в условиях малой серийности, обеспечивая высокую эффективность производства за счёт снижения времени на переналадку ГПС [4].

#### **Список литературы**

1. Аскалонова Т.А., Леонов С.Л., Ситников А.А. Организация групповой технологии в гибких производственных системах // Вестник современных технологий. – 2016. – №1(1). – С. 4-9.
2. Мартынов Р.С. Сокращение времени переналадки оборудования как фактор повышения эффективности использования материальных ресурсов на предприятии // Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета. – 2011. – № 4. – С. 87-90.
3. Полетаева Е.В., Горлов И.В. Оптимизация структуры производственной системы в условиях многономенклатурного машиностроительного производства. // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2022. – №2(14). – С. 77-82.
4. Звягина Е.А., Мимонов А. Оптимизация процесса механической обработки детали на основе применения быстропереналаживаемого технологического оборудования // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях. Сборник научных трудов 4-ой Международной научно-практической конференции: в 3-х томах. Том 1. – Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2014. – С. 224-229.

#### Сведения об авторах:

*Горлов Игорь Васильевич* – д.т.н., доцент;

*Полетаева Елена Валентиновна* – к.т.н., доцент.



УДК 621.771

## ОЦЕНКА ЗАПАСА ПРОЧНОСТИ ВАЛКА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ СПОСОБА ХОЛОДНОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПРОКАТКИ ПРУТКОВ В СТАЦИОНАРНОЙ РАБОЧЕЙ КЛЕТИ

*Скрипаленко М.Н., Поляков Ф.А., Скрипаленко М.М.*

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,  
Москва*

**Ключевые слова:** холодная периодическая прокатка, стационарная рабочая клетка, рабочий валок, компьютерное моделирование, запас прочности.

**Аннотация.** Для определения возможности использования валков мини-стана дуо/кварто – 100/80 при модернизации стана для реализации способа холодной периодической прокатки прутков в стационарной рабочей клетке оценили их запас прочности. Расчет коэффициента запаса прочности провели в вычислительной среде SolidWorks, для чего построили 3D-модель бочки валка с ручьем калибра для холодной прокатки прутка по выбранному маршруту. Модель нагрузили силой 120 кН. Минимальный коэффициент запаса прочности составил 6, что позволяет сделать вывод об обеспечении прочности бочки валка – кольцевого калибра при прокатке прутков из различных металлов и сплавов, если сила прокатки не превышает 120 кН.

## EVALUATION OF ROLL'S SAFETY FACTOR AIMED AT IMPLEMENTATION OF METHOD OF COLD PERIODIC ROLLING OF BARS AT STATIONARY WORKING STAND

*Skripalenko M.N., Polaykov F.A., Skripalenko M.M.*

*National university of science and technology "MISIS", Moscow*

**Keywords:** cold periodic rolling, stationary working stand, work roll, computer modelling, safety factor.

**Abstract.** The safety factor of the rolls was assessed to determine the possibility of utilizing the rolls of the mini-mill duo/quarto – 100/80 in the mill upgrade for implementing the method of cold periodic rolling of bars in a stationary working stand. The safety factor was calculated using SolidWorks Simulation. A 3D model of a roll barrel with a gauge groove (ring gauge) was created for the cold rolling of the bar along the selected route. The model was loaded with a force of 120 kN. The minimum safety factor was found to be 6. The strength of the roll barrel is ensured if bars from various metals and alloys are rolled with loads not exceeding 120 kN.

Способом холодной периодической прокатки получают трубы и прутки из различных металлов и сплавов. Прокатка производится на станах типа ХПТ, ХПТР и КРВ с подвижной рабочей клетью или валковой обоймой, совершающих возвратно-поступательное движение [1]. При этом за счет большой массы возвратно-поступательно движущихся частей возникают высокие динамические нагрузки на привод, снижение которых достигается применением специальных уравновешивающих устройств, что усложняет конструкцию станков, увеличивает металлоемкость оборудования. Кроме того, высокие динамические нагрузки не позволяют повысить скорость прокатки, что сказывается на производительности, особенно станков ХПТ и ХПТР. Поэтому совершенствование и разработка конструкции станков холодной периодической прокатки для снижения

динамических нагрузок, повышения производительности и точности проката является весьма актуальной задачей.

Одним из направлений решения этой задачи является разработка способов и оборудования для холодной периодической прокатки в стационарной рабочей клети. Известен способ и оборудование для производства прутков и труб в стационарной рабочей клети, разработанные ранее в МИСИС (станы ХПТС) [2]. Способ и оборудование позволяют снизить динамические нагрузки, повысить скорость прокатки и точность получаемых изделий. Однако оборудование эксплуатируемых станов ХПТС имеет механизмы возвратно-поступательного перемещения заготовок со сложной кинематической схемой, которые при этом не позволяют полностью согласовать перемещение заготовок механизмом и валками, что снижает устойчивость процесса прокатки.

Построение конструкции стана на исполнительных модулях с использованием современных цифровых устройств позволит не применять жестких механических связей и, таким образом, упростить конструкцию и расширить возможности управления оборудованием. Кафедра ОМД располагает мини-станом холодной продольной прокатки дуо/кварто – 100/80, и использование его рабочей клети с соответствующей модернизацией, а также дооснащением стана необходимыми устройствами, позволит реализовать холодную периодическую прокатку прутков малых типоразмеров в стационарной рабочей клети. На первом этапе модернизации необходимо оценить по критерию запаса прочности возможность применения рабочего валка действующего стана с учетом выполнения в бочке валка ручья калибра для холодной прокатки прутков.

Целью работы являлась оценка запаса прочности рабочего валка для реализации способа холодной периодической прокатки в стационарной рабочей клети путем компьютерного моделирования. Для достижения цели поставлены следующие задачи: рассчитать силу прокатки для выбранного маршрута, построить 3D-модель рабочего валка, провести компьютерное моделирование для расчета коэффициента запаса прочности в вычислительной среде SolidWorks.

В качестве заготовки для холодной прокатки можно использовать горячекатаные прутки, изготовленные способом радиально-сдвиговой прокатки, например, на мине-стане «10-30» НПЦ ОМД НИТУ МИСИС, позволяющим получать готовые прутки, диаметром от 10 мм и выше. Для расчета коэффициента запаса прочности выбрали заготовку из стали 45 диаметром 12 мм, а диаметр прутка – 8 мм, предполагая, что при таком диаметре прутка на валке будет наиболее глубокий ручей, исходя из планируемого сортамента для модернизируемого стана. Величину подачи задали – 4 мм. Для расчета силы прокатки использовали известную формулу Ю.Ф. Шевакина [3]. Рассчитанное значение силы составило 113 кН. Для нагружения валка приняли значение силы в 120 кН.

Рабочий валок стана дуо/кварто – 100/80 составной, включает вал и крепящуюся на нем бочку из стали ШХ15. Диаметр бочки 100 мм, ширина 80 мм. В SolidWorks построили 3D-модель бочки валка с ручьем, профиль которого рассчитали по методике Ю.Ф. Шевакина [3]. Фактически бочка с ручьем

представляют кольцевой калибр, применяемый на станах холодной периодической прокатки.

Расчет коэффициента запаса прочности проводили в вычислительной среде SolidWorks Simulation [4], модель нагрузили силой 120 кН. При этом максимальная упругая деформация бочки составила 2,7 мкм в начале обжимного участка, минимальный коэффициент запаса прочности – 6,01, что превышает принятый на практике коэффициент запаса прочности, равный 5-ти.

Таким образом, при модернизации стана для прокатки прутков возможно применение бочки вала стана дуо/кварто – 100/80 в качестве кольцевого калибра для прокатки прутков, диаметром от 8 мм и ниже из стали 45, и других металлов и сплавов, при силе прокатки в пределах 120 кН.

#### **Список литературы**

1. Романцев Б.А., Гончарук А.В., Вавилкин Н.М., Самусев С.В. Обработка металлов давлением. – М.: Изд. дом МИСиС, 2008. – 960 с.
2. Патент № 936533 СССР. Способ холодной пилигримовой прокатки труб / П.И. Полухин, И.Н. Потапов, Р.П. Джавахян, Г.Д. Стыркин, А.Д. Шейх-Али. – Заявка № 3264426 от 26.12.1980; опубл. 15.07.1991.
3. Орлов Г.А. Холодная прокатка и волочение труб: учебное пособие. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 188 с.
4. Алямовский А.А. COSMOSWorks. Основы расчета конструкций на прочность в среде SolidWorks: справочник. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 784 с.

#### Сведения об авторах:

*Скрипаленко Михаил Николаевич* – к.т.н., доцент, доцент кафедры ОМД;

*Поляков Федор Алексеевич* – аспирант;

*Скрипаленко Михаил Михайлович* – к.т.н., доцент, доцент кафедры ОМД.

## ОЦЕНКА ДЕФОРМИРОВАННОГО, КИНЕМАТИЧЕСКОГО И ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ДВУХВАЛКОВОЙ ВИНТОВОЙ ПРОКАТКЕ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ

*Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Скрипаленко М.Н., Воротников В.А.  
Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,  
Москва*

**Ключевые слова:** винтовая прокатка, двухвалковый стан, микроструктура, накопленная деформация, интенсивность деформации сдвига, температура, полная скорость, компьютерное моделирование.

**Аннотация.** Провели компьютерное двухвалковой винтовой прокатки заготовок из стали 12Х18Н10Т при углах подачи валков 6,12,18 и 24 градуса. По результатам моделирования оценивали изменение следующих параметров: накопленной деформации, интенсивности деформации сдвига, температуры, полной скорости, длину фактического очага деформации. Продемонстрировали влияние накопленной деформации и температуры на изменение размеров мелкозернистой поверхностной, переходной и крупнозернистой центральной зоной при изменении угла подачи валков.

## ESTIMATION OF STRAIN, KINEMATIC AND THERMAL CONDITION AND THEIR INFLUENCE ON MICROSTRUCTURE FORMATION AT TWO-HIGH SCREW ROLLING OF STEEL BILLET

*Romantsev B.A., Skripalenko M.M., Skripalenko M.N., Vorotnikov V.A.  
National university of science and technology «MISIS», Moscow*

**Keywords:** screw rolling, two-high mill, microstructure, accumulated strain, shear strain effective, temperature, total velocity, computer simulation.

**Abstract.** Computer simulation of two-high screw rolling of stainless steel billet at 6,12,18 and 24 degrees feed angles was carried out. The following parameters were estimated as a result of the research: accumulated strain, shear strain effective, temperature, total velocity, actual deformation zone length. Influence of accumulated strain and temperature on the formation of surface fine grain zone, transition zone and axial coarse grain zone was established at the change of rolls feed angle values.

Станы винтовой прокатки используют для получения сплошных и полых заготовок [1]. Важным параметром винтовой прокатки является угол подачи валков. Влияние указанного параметра на формирование микроструктуры исследовалось в [1-3]. При этом углы подачи составляли 6, 12, 18 и 24 градуса. Влияние напряжённо-деформированного состояния на формирование микроструктуры при двухвалковой винтовой прокатке показано в различных работах, например, в [4]. При этом, как правило, это влияние оценивается для одного режима прокатки. Стоит отметить, что, при трёхвалковой прокатке продемонстрировано влияние кинематического состояния на формирование микроструктуры. При двухвалковой прокатке подобных исследований не проводилось. Также стоит отметить практически отсутствие исследований,

связанных с влиянием температурного поля заготовки на формирование микроструктуры при двухвалковой прокатке.

Целью работы являлась оценка деформированного, теплового и кинематического состояний заготовки и их влияние на формирование микроструктуры при двухвалковой прокатке с углами подачи валков 6, 12, 18 и 24 градуса. При этом в ходе исследований применялось конечно-элементное компьютерное моделирование.

Компьютерное моделирование прокатки заготовок из стали 12X18H10T в стане МИСИС-130Д вели при углах подачи валков 6, 12, 18 и 24 градуса. Температуру заготовки перед прокаткой задали равной 1200°C. Исходные заготовки имели диаметр 60 мм и длину 300 мм. Расстояние между валками в пережиме составляло 50 мм, а расстояние между линейками 52 мм. Диаметр валков в пережиме составлял 420 мм.

Рассчитывали изменение накопленной деформации и интенсивности деформации сдвига по радиусу заготовки на установившейся стадии, среднюю температуру в объеме заготовки, изменение полной скорости точек на радиусе заготовки при прохождении очага деформации.

Установили, что с ростом угла подачи валков с 6 до 24 градусов снижается среднее значение накопленной деформации в объеме заготовки в 3,1 раза. При этом повышается равномерность распределения значений этого параметра: среднеквадратичное отклонение накопленной деформации в объеме заготовки снижается почти в 5 раз. Качественно схожие результаты получены при расчёте значений интенсивности деформации сдвига. Увеличение угла подачи до 24 градусов уменьшает среднее значение интенсивности деформации сдвига в поперечном сечении заготовки на 30%, при этом размах значений между поверхностью и центром заготовки уменьшается на 12%.

Учитывая, что согласно [5, 6] накопленная деформация и интенсивность деформации сдвига считаются мерами сдвиговой деформации, то можно заключить, что с ростом угла подачи валков при двухвалковой винтовой прокатке наблюдается снижение сдвиговых деформаций при повышении равномерности их распределения вследствие меньшего размаха значений по радиусу заготовки. Показана возможность оценки размеров поверхностной мелкозернистой, центральной крупнозернистой и переходной зон в заготовке на основе изменения накопленной деформации и температуры. Сильная обратная корреляционная зависимость (коэффициент корреляции -0,92) выявлена между толщинами мелкозернистой и переходной зон и размахом накопленной деформации по радиусу заготовки. Сильная прямая корреляционная зависимость (коэффициент корреляции 0,84) выявлена между толщинами мелкозернистой и переходной зон и средней температурой в объеме заготовки.

Увеличение угла подачи с 6 до 24 градусов снижает размах значений полной скорости между поверхностью и центром заготовки с 1041 мм/с до 448 мм/с, то есть в 2,3 раза. Это качественно схоже с уменьшением разброса значений накопленной деформации и интенсивности деформации сдвига. То есть имеет место взаимосвязь между кинематическим и деформированным состоянием при двухвалковой прокатке.

В работе [7] показано, что большая длина фактического очага деформации при трёх- и четырёхвалковой винтовой прокатке снижает неравномерность деформации в объёме заготовки. Используя методику [7], оценили размеры очага деформации при различных углах подачи валков. Рост угла подачи с 6 до 24 градусов приводит к увеличению на 16% длины фактического очага деформации. То есть, учитывая выявленные изменения в параметрах деформированного состояния, можно заключить, что и для двухвалковой винтовой прокатки увеличение длины фактического очага деформации приводит к повышению равномерности деформации в объёме заготовки.

#### Список литературы

1. Романцев Б.А., Гончарук А.В., Вавилкин Н.М., Самусев С.В. Трубное производство. – М.: Изд. дом МИСИС, 2011. – 970 с.
2. Потапов И.Н., Полухин П.И. Технология винтовой прокатки. – М.: Metallurgia, 1990. – 344 с.
3. Романцев Б.А. Полые профилированные заготовки повышенной прочности: Теория, технология и конструкция машин. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – М.: МИСиС, 1993.
4. Скрипаленко М.М., Романцев Б.А., Галкин С.П., Капуткина Л.М., Скрипаленко М.Н. Исследование деформационных и структурных особенностей на разных стадиях двух- и трехвалковой винтовой прокатки // Сталь. – 2019. – №10. – С. 32-38.
5. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. – М.: Metallurgia, 1986. – 688 с.
6. Алюшин Ю.А., Еленев С.А., Кузнецов С.А., Кулик Н.Ю. Энергетическая модель обратимых и необратимых деформаций: Учебное пособие. – М.: Машиностроение, 1995. – 128 с.
7. Скрипаленко М.М., Романцев Б.А., Юсупов В.С., Андреев В.А., Рогачев С.О., Гартвиг А.А., Гладков Ю.А., Куприков М.П. Моделирование очага деформации и напряжённо-деформированного состояния при винтовой прокатке заготовок из труднодеформируемого сплава // Сталь. – 2023. – №9. – С. 16-20.

#### Сведения об авторах:

*Романцев Борис Алексеевич* – д.т.н., профессор, профессор кафедры ОМД;

*Скрипаленко Михаил Михайлович* – к.т.н., доцент, доцент кафедры ОМД;

*Скрипаленко Михаил Николаевич* – к.т.н., доц., доцент кафедры ОМД;

*Воротников Владимир Андреевич* – аспирант.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ ЗАГОТОВОК ИЗ НИКЕЛИДА ТИТАНА С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Скрипаленко М.М.<sup>1,2</sup>, Романцев Б.А.<sup>1,2</sup>, Юсупов В.С.<sup>2</sup>, Андреев В.А.<sup>2</sup>, Скрипаленко М.Н.<sup>1</sup>, Гартвиг А.А.<sup>3</sup>, Гладков Ю.А.<sup>3</sup>, Мыльников Ю.С.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва;*

<sup>2</sup>*Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова РАН, Москва;*

<sup>3</sup>*ООО «КванторФорм», Москва*

**Ключевые слова:** винтовая прокатка, трёхвалковый стан, четырёхвалковый стан, никелид титана, напряжённо-деформированное состояние, компьютерное моделирование.

**Аннотация.** Провели компьютерное моделирование трёх- и четырёхвалковой винтовой прокатки заготовок из никелида титана. Для компьютерного моделирования использовали вычислительную среду конечно-элементного анализа QForm. По результатам исследований провели сравнительную оценку напряжённо-деформированного и кинематического состояний заготовок при обеих схемах, а также рассчитали параметры очага деформации при трёх- и четырёхвалковой прокатках.

## RESEARCH OF SCREW ROLLING OF NICKEL-TITANIUM ALLOY BILLETS USING COMPUTER SIMULATION

*Skripalenko M.M.<sup>1,2</sup>, Romantsev B.A.<sup>1,2</sup>, Yusupov V.S., Andreev V.A., Skripalenko M.N.<sup>1</sup>, Gartvig A.A.<sup>3</sup>, Gladkov Yu.A.<sup>3</sup>, Milnikov Yu.S.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>*National university of science and technology "MISIS", Moscow;*

<sup>2</sup>*Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of Russian Academy of Sciences, Moscow;*

<sup>3</sup>*LLC QuantorForm, Moscow*

**Keywords:** screw rolling, three-high mill, four-high mill, nickel-titanium alloy, stress-strain state, computer simulation.

**Abstract.** Computer simulation of three- and four-high screw rolling of nickel-titanium alloy billet was carried out. QForm Finite Element Method software was used for computer simulation. Based on the results of the research, a comparative assessment of the stress-strain and kinematic states of the workpieces was carried out for both schemes, and the parameters of the deformation focus were calculated for three- and four-roll rolling.

Одним из способов получения прутков круглого сечения из сплавов Ni-Ti является винтовая прокатка в трёхвалковых станах [1]. При этом известно, что для трёхвалковой винтовой прокатки характерно получение в поперечном сечении гибридного структурного состояния: мелкозернистой области вблизи поверхности заготовки, крупнозернистой области в центре заготовки и разделяющая две эти области переходная зона [2]. Это объясняется согласно [3] заметным разбросом значений накопленной деформации между центром и поверхностью заготовки. При этом указанное структурное состояние сказывается

на изменении уровня свойств по сечению заготовки. В работах [4-7] предложена четырёхвалковая схема винтовой прокатки и показаны её потенциальные преимущества по сравнению с трёхвалковой винтовой прокаткой. Учитывая указанное, представляет интерес сравнительная оценка трёх- и четырёхвалковой винтовой прокатки при получении заготовок из труднодеформируемых сплавов, в первую очередь титановых.

Целью работы являлась оценка напряжённо-деформированного и кинематического состояний, а также параметров очага деформации при трёх- и четырёхвалковой прокатке заготовок из эквИАтомного сплава Ni-Ti с помощью компьютерного моделирования в QForm.

Диаметр валков в пережиме для трёхвалкового и основных валков четырёхвалкового стана составлял 50 мм, вспомогательных четырёхвалкового – 36 мм. Частота вращения составляла 60 об/мин для валков трёхвалкового и основных валков четырёхвалкового стана, 83 об/мин – для вспомогательных четырёхвалкового. Заготовка имела диаметр 25 мм, диаметр образуемого валками калибра в пережиме – 22 мм. Углы подачи составляли 15 градусов. Угол раскатки 7 градусов был для валков трёхвалкового и основных четырёхвалкового и -7 градусов для вспомогательных четырёхвалкового. Для оценки напряжённо-деформированного состояния рассчитывали изменение значений нормализованного среднего напряжения [8] и нормализованного угла Лоде [8] в точках на радиусе заготовок на установившейся стадии. Оценку кинематического состояния провели, построив графики изменения полной скорости в этих же точках в пределах очага деформации в зависимости от времени. Определение размеров геометрического очага деформации, фактического очага деформации и внешних зон проводили согласно методике, предложенной в [9].

При обеих схемах прокатки, как показал анализ изменения значений нормализованного среднего напряжения, одинаковое соотношение сжимающих и растягивающих напряжений. При этом при четырёхвалковой прокатке напряжённое состояние предполагает большую однородность, т.к. при этой схеме, по сравнению с трёхвалковой, изменение значений нормализованного угла Лоде между центром и поверхностью заготовки в 5 раз меньше. Кинематическое состояние при обеих схемах одинаково качественно: полная скорость точек на радиусе заготовки при прохождении очага деформации в центральных слоях заготовки растёт, а поверхностных – снижается. При этом значение полной скорости точки на оси заготовки при четырёхвалковой прокатке на 10% выше, чем при трёхвалковой прокатке. Фактический очаг деформации при четырёхвалковой прокатке, по сравнению с трёхвалковой прокаткой, на 57% больше, геометрический – на 85%, внешние зоны на 23% (с входной стороны) и на 28% (с выходной стороны) больше.

**Финансирование.** Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-19-00775, <https://rscf.ru/project/23-19-00775/>

#### Список литературы

1. Андреев В.А., Рогачев С.О., Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Юсупов В.С. Влияние винтовой прокатки на структуру и механические свойства титановых сплавов // Деформация и разрушение материалов. – 2023. – №11. – С. 22-32.



2. Патент № 2293619 РФ. Способ винтовой прокатки / С.П. Галкин. – Заявка №2006110612, от 04.04.2006; опубл. 20.02.2007, Бюл. №5.
3. Skripalenko M.M., Karpov B.V., Rogachev S.O., Kaputkina L.M., Romantsev B.A., Skripalenko M.N., Tran Ba Huy, Fadeev V.A., Danilin A.V., Gladkov Yu.A. Simulation of the kinematic condition of radial shear rolling and estimation of its influence on a titanium billet microstructure // Materials. 2022, vol. 15(22), p. 7980.
4. Чан Ба Хюи. Разработка и исследование процесса винтовой прокатки в четырехвалковом стане на основе физического и компьютерного моделирования: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – М., 2019. – 101 с.
5. Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Юсупов В.С., Андреев В.А. Оценка напряженно-деформированного состояния в процессах прошивки на основе компьютерного моделирования // Тяжёлое машиностроение. – 2020. – № 5-6. – С. 46-49.
6. Юсупов В.С., Скрипаленко М.М., Романцев Б.А., Андреев В.А., Ерохин А.В., Мышечкин А.А., Касумов А.Э. Моделирование особенностей напряженно-деформированного состояния заготовок в процессах винтовой прокатки // Сталь. – 2021. – №6. – С. 17-19.
7. Скрипаленко М.М., Романцев Б.А., Гартвиг А.А., Скрипаленко М.Н., Юсупов В.С., Андреев В.А., Данилин А.В., Gladkov Ю.А. Моделирование процессов винтовой прокатки при постоянном и переменном трении на контакте валков и заготовки // Металлург. – 2023. – №7. – С. 102-107.
8. Власов А.В., Стебунов С.А., Евсюков С.А., Биба Н.В., Шитиков А.А. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объёмной штамповки. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. – 383 с.
9. Кожевников А.В., Скрипаленко М.М., Кожевникова И.А., Скрипаленко М.Н., Сидоров А.А., Семёнов А.А., Романцев Б.А., Юсупов В.С. Оценка параметров очага деформации при симметричной и асимметричной холодной прокатке полосы с помощью компьютерного моделирования // Технология металлов. – 2022. – №12. – С. 43-51.

Сведения об авторах:

*Скрипаленко Михаил Михайлович* – к.т.н., доцент, доцент кафедры ОМД, с.н.с.;

*Романцев Борис Алексеевич* – д.т.н., профессор, профессор кафедры ОМД, с.н.с.;

*Юсупов Владимир Сабитович* – д.т.н., г.н.с., заведующий лабораторией;

*Андреев Владимир Александрович* – к.т.н., в.н.с., помощник заведующего лабораторией;

*Скрипаленко Михаил Николаевич* – к.т.н., доцент, доцент кафедры ОМД;

*Гартвиг Артур Александрович* – технический директор;

*Гладков Юрий Анатольевич* – к.т.н., доцент, директор по продажам;

*Мыльников Юрий Сергеевич* – инженер отдела технической поддержки.

## ВЫБОР И ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ

*Денисенко А.Ф., Ладягин Р.В.*

*Самарский государственный технический университет, Самара*

**Ключевые слова:** металлорежущий станок, шпиндельный узел, шпиндель, режимы работы шпинделя, нейросеть, многослойный перцептрон.

**Аннотация.** Статья содержит сведения об основных типах нейронных сетей, используемых в инженерных расчетах для решения задач промышленности. В ней показан алгоритм выбора наилучшей нейронной сети по критериям ошибки обучения и обобщающей способности на тестовом множестве. Приведен пример её применения для прогнозирования работы шпиндельного узла.

## SELECTION AND APPLICATION OF NEURAL NETWORKS FOR SIMULATION OF OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF SPINDLE ASSEMBLY

*Denisenko A.F., Ladyagin R.V.*

*Samara State Technical University, Samara*

**Keywords:** metal-cutting machine, spindle assembly, spindle, spindle operating modes, neural network, multilayer perceptron.

**Abstract.** The article contains information about the main types of neural networks used in engineering calculations to solve industrial problems. An algorithm for selecting the best neural network based on the criteria of training error and generalization ability on the test set it shows. An example of its application to predict the behavior of a spindle assembly is given.

Нейронные сети (Neural Networks) представляют собой мощный инструмент в машинном обучении и искусственном интеллекте. Они спроектированы по аналогии с биологическими нейронами и способны обучаться и решать разнообразные задачи. Рабочими элементами этих сетей являются искусственные нейроны, которые делятся на нейроны входного слоя с исходными данными, промежуточные нейроны скрытого слоя и нейроны выходного слоя, оценивающие работу сети.

Использование нейронных сетей в инженерии позволяет решать задачи прогнозирования состояния объектов и протекания производственных процессов.

Существует несколько основных типов нейронных сетей [1].

1) Свёрточные нейронные сети являются идеальным выбором для обработки данных, имеющих пространственную структуру, таких как изображения и видео. Такие сети находят свое применение в диагностике станков, получая данные непосредственно с датчиков.

2) Рекуррентные нейронные сети предназначены для работы с последовательными данными. Применение рекуррентных нейронных сетей позволяет снизить трудоемкость работ по технической подготовке производства

конкурентоспособной новой продукции и найти оптимальные решения при разработке комплекта технической документации.

3) Рекуррентные свёрточные нейронные сети объединяют в себе свойства как свёрточных, так и рекуррентных сетей. В машиностроении используются для проектирования и переоснащения производственных цехов.

Для моделирования поведения шпиндельного узла (ШУ) металлорежущего станка при эксплуатации был выбран самый распространенный тип сети, находящий применение в задачах классификации и регрессии – многослойный персептрон (MLP). Это простейшая нейронная сеть прямого распространения сигнала (без обратных связей) [2].

Данные, полученные в ходе проведения эксперимента, были записаны в файл математического пакета Statistica, в котором и проводилась дальнейшая работа.

Выходными переменными вводимыми в программу были:  $T$  – температура,  $\Delta(\text{delta})$  – биение шпинделя,  $E$  – смещение опоры. Входными переменными были:  $n$  – частота вращения шпинделя,  $t_m$  – время работы,  $F$  – сила воздействия на передний конец шпинделя.

Сеть выбиралась так, чтобы ошибка на обучении была минимальной, ошибка на тесте чуть выше ошибки на обучении [3]. Как показал анализ построенных сетей (табл. 1), этим критериям наилучшим образом отвечает сеть с индексом 58 со структурой многослойного персептрона MLP 3-7-3, у которой число нейронов на входном и выходном слоях соответствует числу переменных и 7 нейронов на скрытом слое. В отличие от других, выбранная сеть имеет простую структуру с одной из минимальных ошибок на обучении, вместе с тем она хорошо обобщает данные на тестовом множестве, в то время как по другим сетям этот показатель хуже.

На рисунках 1-3 показаны средние относительные ошибки для трёх выходных переменных. Видно, что построенная нейросеть очень хорошо описывает зависимости: 1,9% для переменной  $T$  – температуры; 7,8% для delta – биения ШУ; и для переменной  $E$  – смещения опоры ШУ ошибка не превышает 11%.

Табл. 1. Сводная таблица построенных нейронных сетей

Summary of active networks (1_ Experiment)								
Index	Net. name	Training perf.	Test perf.	Validation perf.	Training error	Test error	Validation error	Training algorithm
1	MLP 3-6-3	0,868752	0,771035	0,799192	2,411789	4,618358	5,376188	BFGS 67
2	MLP 3-5-3	0,879815	0,744031	0,800608	1,941390	3,506386	3,145342	BFGS 55
3	MLP 3-3-3	0,867959	0,760201	0,802289	2,296315	2,509966	1,798119	BFGS 27
4	MLP 3-9-3	0,908752	0,782638	0,849045	1,588080	1,978250	1,442563	BFGS 108
5	MLP 3-3-3	0,888533	0,780199	0,836448	2,171525	3,146457	2,465434	BFGS 74
8	MLP 3-4-3	0,895361	0,771663	0,829826	1,256167	1,572669	1,673466	BFGS 84
46	MLP 3-4-3	0,851707	0,908601	0,788142	1,468935	1,195453	2,902749	BFGS 24
47	MLP 3-4-3	0,875721	0,770766	0,803762	1,658246	2,299086	1,764992	BFGS 48
48	MLP 3-4-3	0,865268	0,865185	0,830526	1,271088	1,820135	2,187658	BFGS 88
49	MLP 3-4-3	0,836660	0,804133	0,901422	2,863406	2,089011	3,171221	BFGS 25
50	MLP 3-4-3	0,837872	0,883075	0,872208	3,033195	3,757516	2,591107	BFGS 22
51	MLP 3-9-3	0,848216	0,889393	0,787325	2,843312	1,493393	3,455007	BFGS 20
52	MLP 3-9-3	0,862787	0,759059	0,784233	2,604475	3,134663	3,816213	BFGS 22
53	MLP 3-9-3	0,867972	0,864202	0,812525	0,970071	1,226072	1,244643	BFGS 48
54	MLP 3-9-3	0,869270	0,816995	0,892208	0,942641	0,623980	0,932193	BFGS 66
55	MLP 3-9-3	0,855702	0,855046	0,851509	1,030464	1,982470	0,893548	BFGS 30
56	MLP 3-7-3	0,829810	0,896689	0,717710	2,624881	1,816313	3,134286	BFGS 19
57	MLP 3-7-3	0,862109	0,767962	0,785585	1,849517	2,522907	2,095394	BFGS 23
58	MLP 3-7-3	0,876595	0,863295	0,830870	0,664223	0,989306	1,319104	BFGS 72
59	MLP 3-7-3	0,831547	0,791483	0,894101	3,354776	2,577004	4,223475	BFGS 24
60	MLP 3-7-3	0,853527	0,881664	0,835511	1,911172	2,288701	1,594654	BFGS 28

	Predictions spreadsheet for T (1_Experiment)			
	Network: 58.MLP 3-7-3			
	Samples: Test			
	Subset of Predictions spreadsheet for T (1_Experiment)			
	Variables: 4 Include condition: v0=1			
Case name	MAPE			
MEAN case 1-16	0,0187481221			

Рис. 1. Средняя относительная ошибка для температуры

	Predictions spreadsheet for delta (1_Experiment)			
	Network: 58.MLP 3-7-3			
	Samples: Test			
	Subset of Predictions spreadsheet for delta (1_Experiment)			
	Variables: 4 Include condition: v0=1			
Case name	MAPE			
MEAN case 1-16	0,0778062939			

Рис. 2. Средняя относительная ошибка для биения ШУ

	Predictions spreadsheet for E (1_Experiment)			
	Network: 58.MLP 3-7-3			
	Samples: Test			
	Subset of Predictions spreadsheet for E (1_Experiment)			
	Variables: 4 Include condition: v0=1			
Case name	MAPE			
MEAN case 1-16	0,1073914			

Рис. 3. Средняя относительная ошибка для смещения опоры ШУ

В ходе исследования установлено, что применение нейронных сетей со структурой многослойного персептрона позволяет оценивать и прогнозировать эксплуатационные характеристики ШУ.

**Список литературы**

1. Ладягин Р.В. Анализ нейронных сетей для решения задач отраслей промышленности. // Высокие технологии в машиностроении. Материалы XX Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Самара: Изд. СамГТУ, 2023. – С. 140-141.
2. Хайкин, Саймон. Нейронные сети: полный курс. – 2-е изд.: Пер. с англ. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
3. Нейронные сети. Statistica Neural Networks: Методология и технология современного анализа данных / Под редакцией В.П. Боровикова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 392 с.

Сведения об авторах:

*Денисенко Александр Федорович* – д.т.н., профессор;  
*Ладягин Роман Владимирович* – старший преподаватель.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИАМИДНО-ГРАФИТОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ ДВУХСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ТЕХНИКИ

*Акинин Д.В.<sup>1</sup>, Прохоров В.Ю.<sup>2</sup>, Евдокимов Ю.М.<sup>2</sup>, Фролов Д.В.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет), Мытищинский филиал,  
Мытищи;*

<sup>2</sup>*Академия государственной противопожарной службы МЧС России, Москва*

**Ключевые слова:** износ деталей, линейный износ, полиамид, графит.

**Аннотация.** Обеспечение надежной работы деталей, механизмов машин и агрегатов является одним из путей повышения долговечности работы машин и агрегатов. Традиционные материалы и технологии практически подошли к пределу своих возможностей. Нужны новые, более рациональные и более долговечные материалы для эксплуатации оборудования. Авторами предлагается покрытие из полиамида АК-80/20 с добавлением графита. Проведенные исследования показали целесообразность применения 10% (по весу) графита. Восстановление подшипников скольжения возможно в условиях ремонтно-обслуживающей базы предприятия.

## STUDY OF POLYAMIDE-GRAPHITE COMPOSITIONS OF TWO-LAYER COATINGS FOR THE RESTORATION OF SLIDING BEARINGS

*Akinin D.V.<sup>1</sup>, Prokhorov V.Yu.<sup>2</sup>, Evdokimov Yu.M.<sup>2</sup>, Frolov D.V.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Bauman Moscow State Technical University, Mytishi;*

<sup>2</sup>*Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moscow*

**Keywords:** wear of parts, linear wear, polyamide, graphite.

**Abstract.** Ensuring reliable operation of parts, mechanisms of machines and units is one of the ways to increase the durability of machines and units. Traditional materials and technologies have almost reached their limits. We need new, more rational and more durable materials for the operation of equipment. The authors propose a coating made of polyamide АК-80/20 with the addition of graphite. Studies have shown the feasibility of using 10% (by weight) graphite. Restoration of sliding bearings is possible in the conditions of the repair and maintenance base of the enterprise.

Вопросам износостойкости материалов посвящено большое количество научных работ [1-3]. Подшипники скольжения, внутренняя поверхность которых облицована тонким слоем полиамида, за последние годы получили широкое распространение в ремонтной практике. Их работоспособность и долговечность определяются двумя основными эксплуатационными свойствами – повышенной износостойкостью и адгезией полимерного слоя к металлической основе. Полиамиды способны самосмазываться или в течение некоторого времени поддерживать условия граничного трения за счет выделения жидких фракций смол и масла из пор материала.

При длительной работе подшипника без смазки коэффициент трения возрастает, а, следовательно, и резко увеличивается генерирование тепла, что является одним из основных факторов, определяющих работоспособность

облицованного полиамидом подшипника. В условиях эксплуатации возможна работа узла при недостаточной смазке или полном ее отсутствии.

Введение «сухих» смазок (графита, двусернистого молибдена) в полиамидное покрытие создает устойчивую смазочную плёнку на поверхности трения при определенных нагрузочных режимах. В этом случае в процессе трения на поверхности контртела создается и непрерывно поддерживается пленка с низким сопротивлением срезу, что обеспечивает соблюдение необходимого смазочного режима.

В наших исследованиях была выбрана полиамидная смола АК-80/20 марки А (МРТУ-6-05-1021-66) и серебристый графит.

Полиамид АК-80/20 по своим физико-механическим свойствам близок к поликапроамиду. Температура плавления – 219°C. Полиамид АК-80/20 содержит меньше низкомолекулярных соединений, чем поликапроамид, и меньше (примерно вдвое) поглощает влагу. Твердость по Бринеллю данного полиамида в 1,5 раза выше, чем у поликапроамида, несколько выше и его теплостойкость.

Хорошие смазывающие свойства графита объясняются слабыми межслойными связями. Графит обладает высокой термической и химической стабильностью, не растворяется в холодной и горячей воде, не подвергается действию большинства кислот. Теплопроводность и удельная теплоемкость графита уменьшается с понижением температуры. Кроме того, графит не дефицитен и имеет по сравнению с дисульфидом молибдена низкую стоимость.

В связи с тем, что отсутствуют данные об антифрикционных свойствах тонкослойных покрытий из полиамида АК-80/20, нами было проведено исследование антифрикционных свойств этого материала и влияние наполнения его графитом. Кроме того, определялись адгезионные свойства, зависимость толщины покрытий от времени выдержки в вибрирующем слое и от гранулометрического состава полиамидных порошков, оптимальная температура предварительного нагрева деталей перед нанесением покрытия. Все эти параметры сравнивались с аналогичными для поликапроамида марки Б.

Гранулометрический состав и способ получения порошков этих материалов был одинаков (частицы не более 250 мкм). Были получены смеси полиамидов с 10, 20, 30% (по весу) серебристого графита (с размером частиц не более 100 мкм) путем смешивания компонентов при их вибрировании.

Технологический процесс изготовления образцов включал разрезание кольца на 6 равных частей, их обезжиривание, нагрев, нанесение толщины слоя по принципу окунания вибрируемого образца в полиамидный слой и формование.

Антифрикционные свойства тонкослойных покрытий данных материалов определялись в одинаковых условиях на машине трения с возвратно-поступательным движением [4]. Испытания проводились при постоянной скорости скольжения ( $V = 0,39$  м/сек) и удельной нагрузке 0,2942 МПа (3 кгс/см<sup>2</sup>).

Антифрикционные свойства тонкослойных покрытий выбранных материалов оценивались по коэффициенту трения и износостойкости в зависимости от нагрузки и температурного режима трущейся пары. Коэффициент трения определялся на основании диаграммы момента трения, записываемой самопишущим прибором, имеющимся на машине трения; нагрузка при этом

осуществлялась с помощью разгружающего устройства, которое было изготовлено для снижения удельного давления каретки. В ходе испытаний фиксировались также путь трения ролика, работа трения, температура. Температура на поверхности трения измерялась с помощью хромель-копелевой термопары и электронного автоматического потенциометра типа ЭПД-12 (ГОСТ 7164-58), градуировки ХК.

Износ тонкослойных полиамидных покрытий образцов определялся по потере веса на аналитических весах типа АДВ-200М с точностью до 0,0001 г. Взвешивание производилось при строго одинаковых операциях предварительной подготовки. Все образцы после испытаний промывались в чистом ацетоне и протирались. Для исключения ошибки от потери влаги в период испытаний образцы взвешивались через сутки после испытаний. Оценка износостойкости полиамидно-графитовых покрытий производилась по количеству работы, необходимой для получения весового износа в 1 мг, т.е. износостойкость определялась в кгм/мг.

Приводимые ниже величины износостойкости и коэффициенты трения подсчитывались как средние арифметические значения из полученных по трем образцам одного и того же материала. Испытания образцов проводились после предварительной приработки в течение 3 часов. Применение предварительного формования образца по поверхности контакта контртела обеспечило сокращение времени приработки до 0,5 часа.

Результаты износных испытаний представлены на рисунке 1.

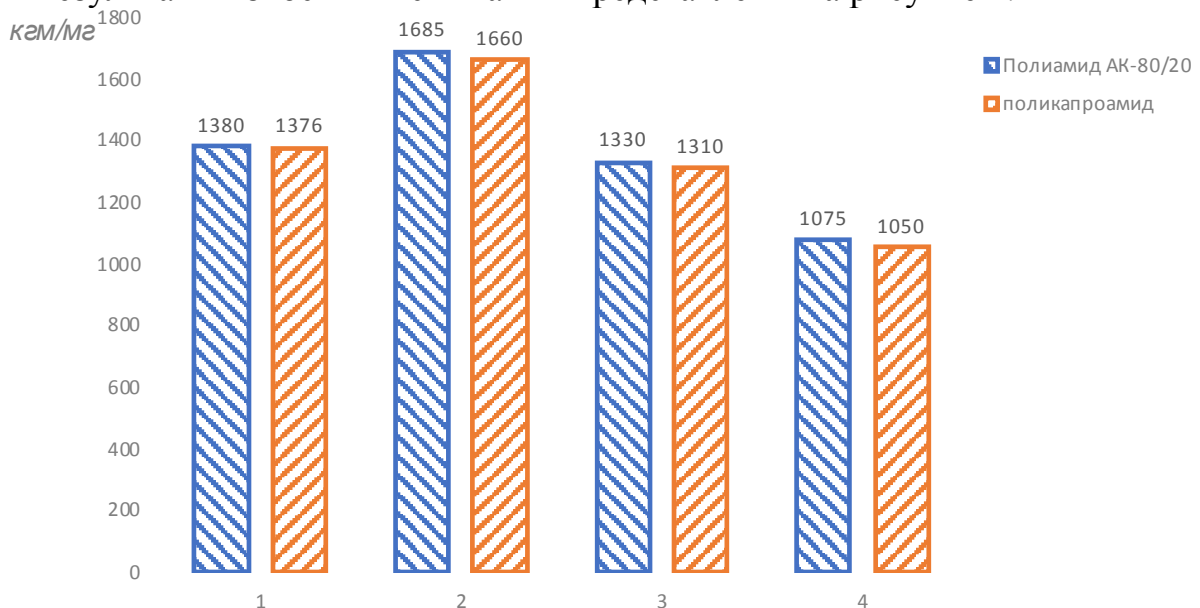


Рис. 1. Износостойкость полиамидных тонкослойных покрытий при  $P_{y\partial} = 0,2942$  МПа ( $3 \text{ кгс/см}^2$ ): 1 – полиамид чистый; 2 – полиамид + 10 % графита; 3 – полиамид + 20 % графита; 4 – полиамид + 30 % графита

Из диаграммы видно, что износостойкость исследуемых материалов практически равна между собой и составляет для ненаполненных образцов 1376-1380 кгм/мг. Увеличение износостойкости (при изнашивании без подачи смазочного материала) может быть получено при наполнении полиамидов до 10% графитом. Как видно из таблицы 1, с увеличением наполнения до 10% графитом исследуемых материалов коэффициент трения уменьшается.

Увеличение наполнения графитом до 30% несколько увеличивает коэффициент трения. Это объясняется уменьшением механической прочности наполненного материала, что приводит его при повышении температуры к намазыванию на контртело. В этом случае трение образца происходит по полимеру.

Табл. 1. Коэффициент трения полиамидов по стали при трении без подачи смазочного материала

Материал	Нагрузка, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	Содержание графита, %			
		0	10	20	30
Полиамид АК-80/20	0,2942 (3)	0,203	0,175	0,195	0,199
Поликапроамид	0,2942 (3)	0,205	0,178	0,197	0,197

Одним из основных факторов, влияющих на адгезию и физико-механические свойства полимерного покрытия, является температура предварительного нагрева покрываемой поверхности. Для сравнительной оценки степени деструкции полимера в зависимости от температуры предварительного нагрева покрываемой детали была принята величина сцепления покрытия с металлической поверхностью. Сцепление покрытия определялось величиной разрывного усилия при чистом отрыве образцов площадью 4 см<sup>2</sup>. Экспериментально было установлено, что при температуре предварительного нагрева образцов в пределах 290-310°С обеспечивается наибольшая адгезия полиамидных покрытий.

Установлено также, что введение графита в материал значительно уменьшает адгезию покрытия к металлическому основанию. Так, например, адгезия чистого поликапроамида к стальной поверхности при чистом отрыве равна 44,326-48,151 МПа (452-491 кгс/см<sup>2</sup>), при введении 10% графита – 27,459-29,419 МПа (280-300 кгс/см<sup>2</sup>) и соответственно для полиамида АК-80/20 – 48,053-49,229 МПа (490-502 кгс/см<sup>2</sup>). Снижение адгезии можно объяснить тем, что при попадании частиц графита на поверхность контакта уменьшается площадь сцепления полиамида с металлической поверхностью.

Для обеспечения высокой адгезии наполненного полиамидного покрытия к металлической поверхности было предложено применять двухслойное покрытие. В этом случае первый слой наносится из чистого полиамида, а на него – слой смеси полиамида с легирующим наполнителем.

Для нанесения 2-слойных полиамидных покрытий целесообразно применять вибрационный способ, который обеспечивает качественную гомогенизацию смеси при нанесении покрытия. На рисунке 2 представлена схема установки для нанесения двухслойных полимерных покрытий.

Установка для нанесения 2-слойных покрытий состоит из: резервуара 1, который перегороден стенкой 10 и имеет два отделения – одно для чистого полимера, другое для смеси. Выход порошка из отделения перекрывается клапаном 9. Клапан плотно прижимается к выходному окну с помощью пружины 8. Рукоятка 7 служит для поворота клапана на 120° и перекрытия им любого из отделений резервуара.



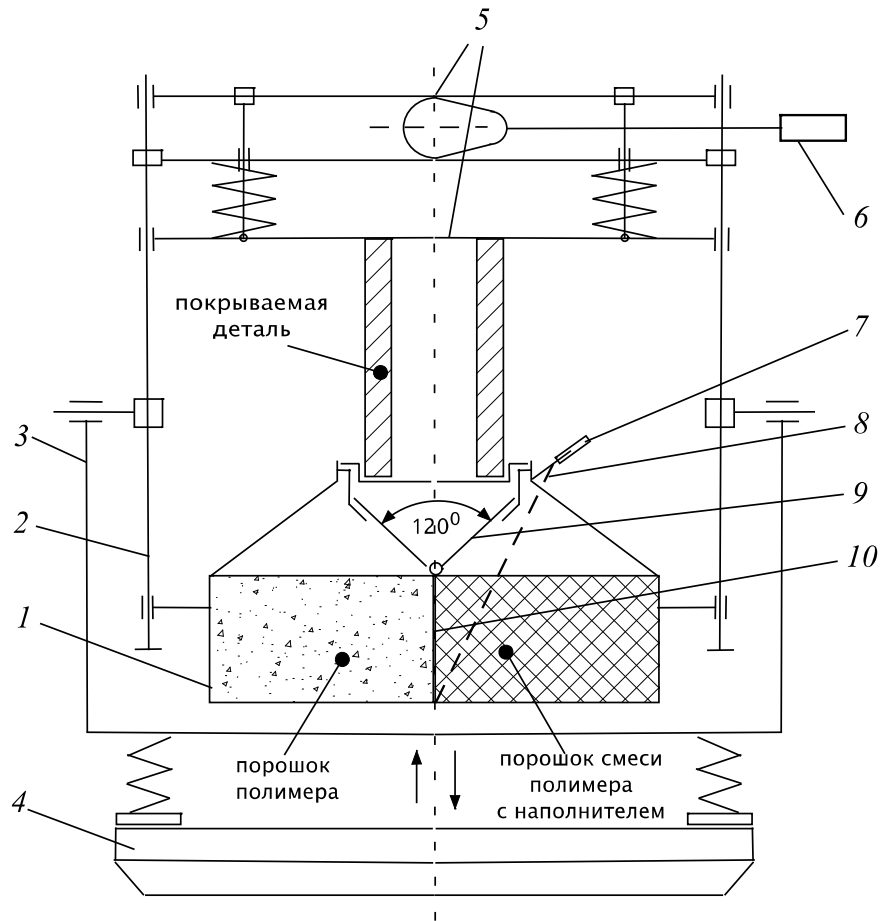


Рис. 2. Схема установки для нанесения двухслойных полимерных покрытий

Резервуар закрепляется на направляющих 2, которые с помощью цапф шарнирно крепятся к основанию 3. Основание закреплено на вибраторе или вибростоле 4. Для закрепления подшипника в установке служит приспособление 5 с рукояткой 6. Рукоятка 6 также служит для поворота резервуара с закрепленной деталью.

Втулка, предварительно обезжиренная и нагретая, устанавливается на горловину резервуара и закрепляется зажимным устройством 5. Положение клапана при этом должно быть таким, чтобы он перекрывал отделение резервуара, которое заполнено смесью. После включения вибратора и поворота резервуара с деталью на  $180^\circ$  вокруг цапф порошок полимера быстро заполняет втулку. После выдержки детали в этом положении (3...5 сек) резервуар с деталью возвращается в первоначальное положение. Порошок полимера «сливается» в свое отделение резервуара. В это время на поверхности втулки образовался 1-й слой из чистого полимера. Затем поворотом клапана (рукояткой 7) перекрывают отделение с чистым полимером, тем самым открывая отделение со смесью. Первый слой из чистого полимера целесообразно наносить минимальной толщины.

Второй слой наносится аналогично первому, но толщина его должна быть больше. Это достигается увеличением времени нахождения смеси в полости втулки.

Эксплуатационные испытания опытных подшипниковых втулок (втулка лебедки, втулка цилиндра гидропривода), облицованных двухслойным полиамидно-графитовым покрытием и установленных на капитально

отремонтированных тракторах «Онежец-300» (ТДТ-55А), показали высокую износостойкость.

Для сравнения работоспособности восстановленных втулок на тракторы устанавливали серийные. Восстановленная втулка лебедки на трелевочном тракторе ТДТ-55А проработала к моменту первой ревизии 895 часов, ко второй ревизии – 1416 часов. Втулка была установлена повторно на другой капитально отремонтированный трактор для продолжения испытаний.

В результате замеров было установлено, что износ полиамидно-графитового покрытия составил в 3,5 раза меньше износа бронзовой втулки. Ось со стороны втулки с опытным покрытием была изношена в 2 раза меньше, чем ось с использованием серийных втулок. Втулка цилиндра гидропривода проработала к последней ревизии более 2000 часов, втулка коромысла двигателя – более 1500 часов.

**Выводы и рекомендации.**

1. Полиамид АК-80/20 по своим антифрикционным свойствам не уступает поликапроамиду (капрону).

2. Для создания легированного полиамидного тонкослойного покрытия в условиях работы с недостаточной смазкой целесообразно его наполнять графитом до 10%.

3. Высокая работоспособность подшипников скольжения, облицованных полиамидно-графитовой композицией, обеспечивается при применении двухслойных покрытий. Оптимальная толщина первого слоя для обеспечения сплошности должна быть не менее 150-200 мкм (для порошков исследуемого гранулометрического состава).

4. Установка для нанесения двухслойных полимерных покрытий конструктивно несложная и может быть изготовлена в условиях ремонтно-обслуживающей базы предприятия.

### **Список литературы**

1. Быков В.В., Прохоров В.Ю. Пути повышения долговечности и износостойкости подшипника скольжения навесного технологического оборудования // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 1. – С. 77-79.
2. Прохоров В.Ю. Пути реализации эффекта безыносности шарнирных сопряжений // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2013. – Т. 1. – С. 43-46.
3. Быков В.В., Прохоров В.Ю., Окладников Л.В. Анализ режимов и условий работы узлов трения навесного оборудования машин лесного комплекса // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 2. – С. 125-129.
4. Прохоров В.Ю., Окладников Л.В., Синюков Н.В. Исследование влияния сочетания конструкционных материалов на противозадирные и противоизносные свойства смазок // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 2. – С. 140-142.

### **Сведения об авторах:**

*Акинин Дмитрий Вячеславович* – к.т.н., доцент, доцент кафедры колесных и гусеничных машин;

*Прохоров Виктор Юрьевич* – к.т.н., доцент, профессор кафедры механики и инженерной графики;

*Евдокимов Юрий Михайлович* – к.х.н., доцент, профессор кафедры процессов горения;

*Фролов Денис Васильевич* – старший преподаватель кафедры механики и инженерной графики.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗНОСТИ ДИАМЕТРОВ БОЧЕК ВЕРХНЕГО И НИЖНЕГО РАБОЧИХ ВАЛКОВ КЛЕТИ НА ИХ ПРОБУКСОВКУ ПО ПОВЕРХНОСТИ ПРОКАТЫВАЕМОЙ ПОЛОСЫ

*Кожевников А.В., Кожевникова И.А., Смирнов А.С., Шалаевский Д.Л.,  
Корепина К.П.*

*Череповецкий государственный университет, Череповец*

**Ключевые слова:** асимметричная прокатка, пробуксовка валков по полосе, время прокатки, режим прокатки, диаметр бочки валка, непрерывный стан 1700.

**Аннотация.** Проведено моделирование процесса асимметричной прокатки стальной полосы в программе Deform. Наличие пробуксовки оценивали увеличением времени прокатки при изменении диаметров бочек одного из валков. Диаметр нижнего валка при исследовании сохраняли неизменным, равным 600 мм (соответствует номинальному диаметру бочки рабочего валка клетки непрерывного стана 1700 холодной прокатки), диаметр бочки верхнего валка при исследовании принимали равным 590, 595 и 600 мм. Установлено закономерности возникновения пробуксовок валков по полосе при асимметричной прокатке.

## STUDY OF THE INFLUENCE OF THE DIFFERENCE IN THE DIAMETERS OF THE BARRELS OF THE UPPER AND LOWER WORKING ROLLS OF THE STAND ON THE POSSIBILITY OF THEIR SLIPPING ON THE SURFACE OF THE ROLLED STRIP

*Kozhevnikov A.V., Kozhevnikova I.A., Smirnov A.S., Shalaevsky D.L.,  
Korepina K.P.*

*Cherepovets State University, Cherepovets*

**Keywords:** asymmetric rolling, roll slippage along the strip, rolling time.

**Abstract.** The process of asymmetric rolling of steel strip was simulated in the Deform program. The presence of slippage was assessed by increasing the rolling time when changing the diameters of the barrels of one of the rolls. The diameter of the lower roll during the study was kept unchanged, equal to 600 mm (corresponding to the nominal diameter of the barrel of the working roll of the continuous mill stand 1700 of cold rilling), the diameter of the barrel of the upper roll during the study was taken equal to 590, 595 and 600 mm. The patterns of occurrence of roll slippage along the strip during asymmetric rolling have been established.

Процесс асимметричной прокатки – технологический процесс, который может возникнуть при холодной прокатке стальных полос [1-3].

В рамках исследования выполнено компьютерное моделирование процессов асимметричной и симметричной холодной продольной прокатки в вычислительной среде Deform. Исследование произведено для трех вариантов сочетаний диаметров бочек рабочих валков, приведенных в таблице 1. Асимметрия при этом оценена параметром:

$$A = \frac{D_n - D_v}{D_n} \cdot 100\% , \quad (1)$$

где  $D_n$  – диаметр бочки нижнего валка,  $D_v$  – диаметр бочки верхнего валка.

Возникновение пробуксовок поверхностей бочек рабочих валков относительно прокатываемой полосы при данном методе моделирования при асимметричной прокатке идентифицировалось путем оценки изменения времени прокатки верхнего и нижнего рабочих валков в зависимости от асимметрии диаметров валков.

Для исследования использовали режим прокатки в 1-й, 2-й и 3-й клетях непрерывного стана 1700, параметры которого показаны в таблице 2.

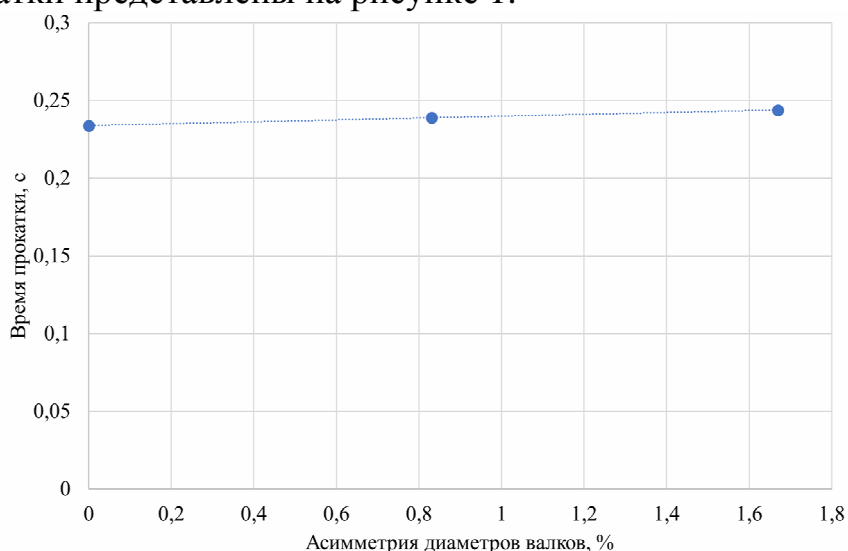
Табл. 1. Варианты сочетаний диаметров рабочих валков

	Диаметр верхнего валка, мм	Диаметр нижнего валка, мм	Параметр асимметрии, %
Вариант №1	600	600	0
Вариант №2	595	600	0,83
Вариант №3	590	600	1,67

Табл. 2. Режим прокатки полосы толщиной 0,5 мм и шириной 1254 мм

Клеть №	№ смоделированного режима	Скорость движения полосы на выходе из кели, м/с	Толщина полосы на входе в клеть, мм	Толщина полосы на выходе из клетки, мм	Обжатие в полосы в клетки, %	Переднее натяжение полосы, кН
1	1	5,04	2,1	1,42	32	128,5
2	2	7,59	1,42	0,965	32,5	224
3	3	11,07	0,965	0,68	29,5	164
4	-	15,1	0,68	0,515	24,5	125
5	-	16,06	0,515	0,5	4	94

Результаты оценки влияния асимметрии диаметров бочек рабочих валков на время прокатки представлены на рисунке 1.



а

Рис. 1. Изменение времени прокатки в зависимости от асимметрии диаметров валков в первом (а) смоделированном режиме

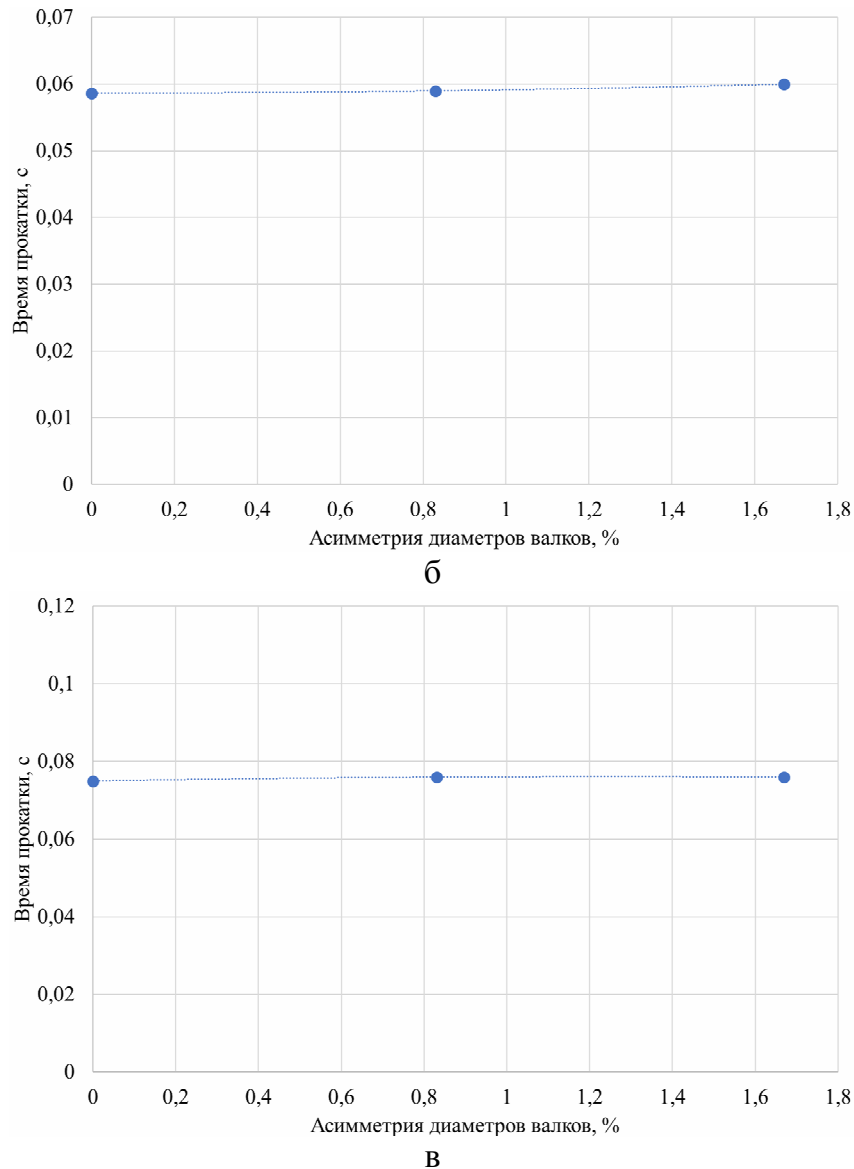


Рис. 1. Изменение времени прокатки в зависимости от асимметрии диаметров валков во втором (б) и третьем (в) смоделированных режимах

Согласно данным рисунка 1 увеличение асимметрии диаметров бочек валков до 1,67% в первом режиме увеличит время прокатки на 4,5 %, во втором – на 18%, в третьем – на 2,4%. При коэффициенте асимметрии 0,83% в первом смоделированном варианте по сравнению с симметричным процессом, время прокатки увеличится на 3%, во втором – на 10%, в третьем – менее, чем на 1%. Прочие параметры, изменявшиеся при исследовании процесса, воздействия на изменение времени прокатки и, следовательно, на возникновение пробуксовок не оказали.

**Финансирование.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00428, <https://rscf.ru/project/23-29-00428/>

#### Список литературы

1. Бельский С.М. Методика оценки уменьшения неравномерности вытяжек по ширине прокатываемой полосы при скоростной асимметрии // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2015. – №9-1. – С. 37-43.

2. Piesin A.M., Salganik V.M., Dyja H., Chikishev D.N., Pustovoitov D.O., Kawalek A. Asymmetric rolling: Theory and technology // *Hutnik Wiadomości Hutnicze*, R LXXIX, maj 2012, Nr 5, pp. 358-362.
3. Песин А.М., Кавалек А., Шинский П., Пустовойтов Д.О. Использование двух факторов асимметрии при толстолистовой прокатке // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2013. – № 4(44). – С. 50-51.

Сведения об авторах:

*Кожевников Александр Вячеславович* – д.т.н., доцент, заведующий кафедрой Электроэнергетики и электротехники;

*Кожевникова Ирина Александровна* – д.т.н., доцент, заведующий кафедрой Metallургии, машиностроения и технологического оборудования;

*Смирнов Анатолий Сергеевич* – старший преподаватель кафедры Электроэнергетики и электротехники;

*Шалаевский Дмитрий Леонидович* – к.т.н., доцент, доцент кафедры Metallургии, машиностроения и технологического оборудования;

*Корепина Кристина Петровна* – младший научный сотрудник кафедры Metallургии, машиностроения и технологического оборудования.

## АНАЛИЗ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПРЯМОМ ВЫДАВЛИВАНИИ В СФЕРИЧЕСКУЮ МАТРИЦУ

*Рулин С.П., Петров П.А.*

*Московский политехнический университет, Москва*

**Ключевые слова:** течение металла в матрице, алюминиевый сплав АД, холодная деформация, сопротивление деформации, компьютерное моделирование, поле Гартфилда, приповерхностные линии, холодная штамповка выдавливанием.

**Аннотация.** В работе проведены вычислительные эксперименты в программном комплексе QForm направленных на анализ течения металла в сферическую матрицу за счет его прямого выдавливания в условиях холодной деформации. Для оценки заполнения матрицы разработана компьютерная модель операции прямого выдавливания. В модели используются приповерхностные линии и поле Гартфилда для анализа заполнения формообразующей полости. Показана взаимосвязь скорости деформации в трассируемых точках с расчетными значениями поля Гартфилда. Полученные результаты позволяют перейти в калибровки компьютерной модели операции прямого выдавливания по результатам натурального эксперимента.

## ANALYSIS OF METAL FLOW DURING DIRECT EXTRACTION INTO A SPHERICAL DIE

*Rulin S.P., Petrov P.A.*

*Moscow Polytechnical University, Moscow*

**Keywords:** metal flow in the die, aluminum alloy AD, cold deformation, flow stress, computer modeling, Gartfield field, near-surface lines, cold extrusion forging.

**Abstract.** The work carried out computational experiments in the QForm software package aimed at analyzing the flow of metal into a spherical die due to its direct extrusion forging under cold deformation conditions. To assess the filling of the die, a computer model of the direct extrusion forging operation has been developed. The model uses near-surface lines and the Gartfield field to analyze the filling of the forming cavity. The relationship between the strain rate at the traced points and the calculated values of the Gartfield field is shown. The results obtained allow us to proceed to the calibration of a computer model of the direct extrusion forging operation based on the results of a full-scale experiment.

Область применения полых осесимметричных штампованных деталей со сферическим дном связана с общим машиностроением, автомобильной промышленностью авиационным, приборостроением [1-4]. Типовой процесс изготовления штампованных деталей включает две формообразующие операции: прямое выдавливание и комбинированное выдавливание. В результате первой операции формируется сферический торец на исходной цилиндрической заготовки; в результате второй операции – выполняется выдавливание осесимметричной детали со сферическим дном и фланцем.

В данной работе анализируется течение материала в первой технологической операции и заполнение формообразующей полости штампового инструмента (матрицы) за счет разработки компьютерной модели в программном комплексе QForm. Исходная заготовка имеет цилиндрическую форму и

следующие размеры: диаметр  $D_0 = 21,0$  мм и высоту 9,7 мм. На рисунке 1 показан эскиз штампованной заготовки после выполнения первой формообразующей операции – прямого выдавливания исходной заготовки.

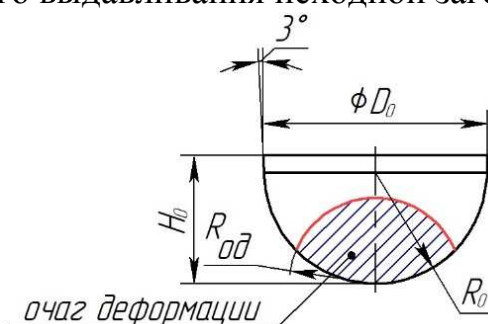


Рис. 1. Эскиз осесимметричной штампованной заготовки со сферическим торцем

Сложность прямого выдавливания заключается в оформлении сферической торцевой поверхности. Очаг деформации в конце рабочего хода верхнего инструмента (пуансона) ограничен поверхностью радиусом  $R_{од}$  след которой на плоскости сечения показан на рисунке 1 красной сплошной линией.

Краевая задача обработки давлением решается численно с применением метода конечных элементов, реализованного в программе QForm. Исходные данные для моделирования: 1) материал – алюминиевый сплав АД; 2) модель сопротивления деформации сплава АД из базы деформируемых материалов программы QForm; 3) температура деформирования –  $20^\circ\text{C}$ ; 4) оборудование – гидравлический пресс с номинальной силой 1 МН и скоростью рабочего хода 2 мм/с; 5) модель трения – модель А.Н. Леванова; при этом коэффициент теплопередачи смазки принимается равным  $30000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К})$ ; 6) тип задачи – трехмерная. Фактора трения в модели трения А.Н. Леванова принимается равным нулю. Тепловой эффект пластической деформации не учитывается.

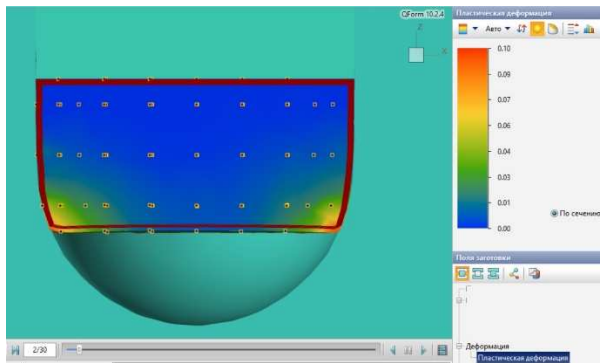
Для оценки заполнения матрицы металлом, формирования деформационных дефектов применен комплекс инструментов, имеющихся в программе QForm: 1) приповерхностные линии; 2) поле Гартфилда, рассчитываемое за счет применения стандартной подпрограммы в системе QForm. Поле Гартфилд [5] определяется в режиме пост-процессора по результатам расчета растягивающих деформаций в направлении нормали к поверхности деформируемой заготовки; чем выше значение поля, тем выше вероятность появления деформационных дефектов. Оценка значений параметров поле Гартфилда и скорости деформации выполнена в трассируемых точках, добавленных в исходную заготовку с учетом параметров настройки: число интервалов по  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz = 7, 3, 3$ , соответственно. Расположение трассируемых точек показано на рисунке 2.

Учет поля Гартфилда позволяет разработать компьютерную модель технологической операции с учетом дефектообразования. Однако для точной диагностики дефекта требуется помимо вычислительного, проведение также и натурального эксперимента для установления диапазонов значений поля Гартфилда в анализируемой операции.

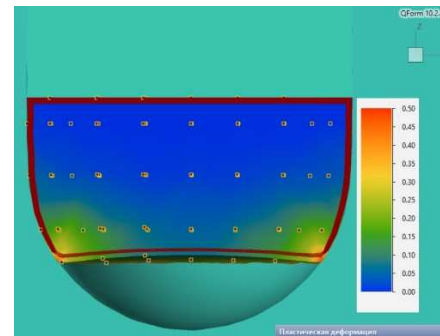
На рисунке 2 показано формирование очага деформации по мере прямого выдавливания заготовки. Центральная часть заготовки – сферический торец –



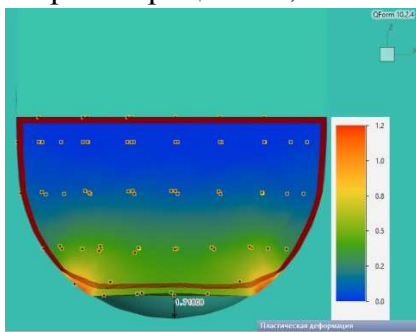
оформляется только к завершению выдавливания. Течение материала неравномерное: скорость скольжения металла по сферической поверхности матрицы выше, чем скорость перемещения металла в центральной части. Вследствие этого приповерхностные линии искривляются в сторону противоположную сферической поверхности радиуса  $R_0$ . По мере заполнения сферической полости искривление приповерхностных линий уменьшается.



время процесса 0,2548 с

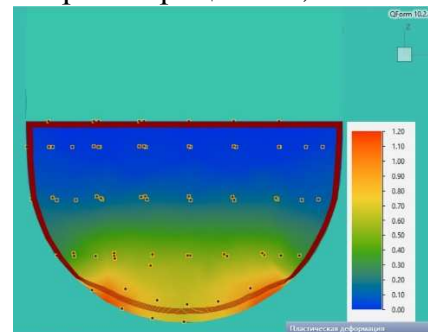


время процесса 0,8465 с



время процесса 1,578 с;

зазор в вершине сферы 1,71808 мм



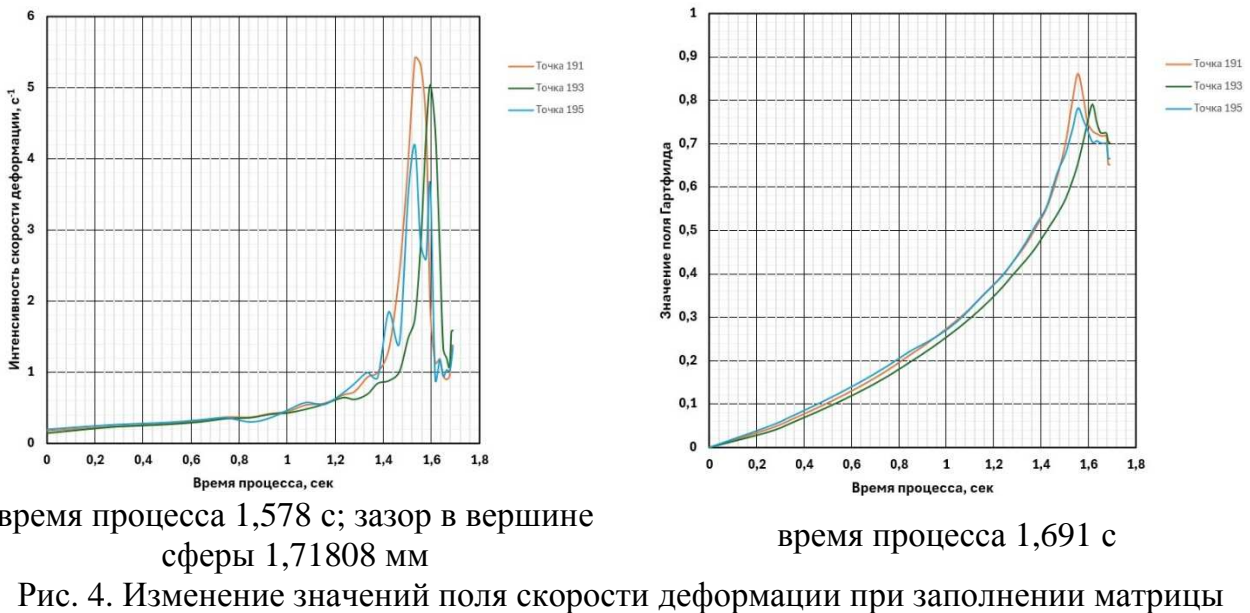
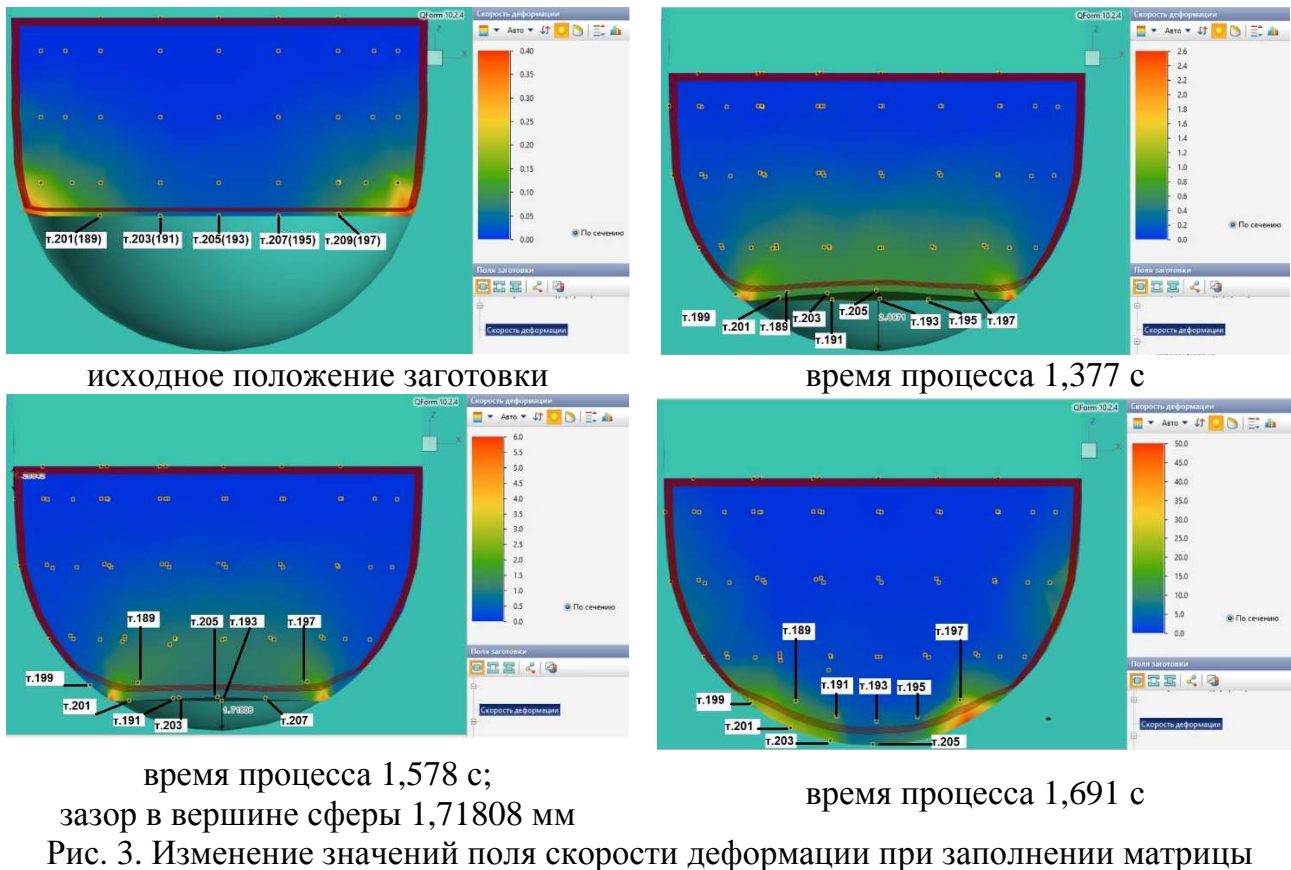
время процесса 1,691 с

Рис. 2. Формирование очага деформации при прямом выдавливании (фактор трения = 0,0)

При величине зазора в центральной части сферической поверхности равном 1,71808 мм, приповерхностные линии расположены практически горизонтально. Далее, начинается их изгиб в противоположном направлении – в сторону сферической поверхности радиуса  $R_0$  (рис. 2).

На рисунке 3 показано движение трассируемых точек от момента входа металла в матрицу до момента оформления сферического торца. В конце рабочего хода металл в точках 191, 193, 195 перемещается в направлении формообразующей поверхности; контакт металла с матрицей происходит в завершении операции прямого выдавливания.

На рисунке 4 показана взаимосвязь между скоростью деформации в трассируемых точках и значениями поля Гартфилда. В точках 191, 193, 195 наблюдается увеличение значения поля Гартфилда на всем протяжении рабочего хода. Достижение максимального значения и последующее уменьшение поля Гартфилда в трех исследуемых точках соответствует перемещению металла в направлении формообразующей поверхности матрицы и ее заполнению (см. рис. 3).



### Вывод и рекомендации

Проведенные вычислительные эксперименты позволяют сделать следующие выводы:

1) в программе QForm разработана компьютерная модель операции прямого выдавливания позволяющая выполнить анализ течения металла при заполнении формообразующей полости матрицы с учетом возможного формирования деформационных дефектов – неполное оформление центральной части штампованного изделия со сферическим торцем;

2) искривление приповерхностных линий в процессе формообразования позволяет оценить неравномерность течения металла, которая наблюдается на всем рабочем ходе пуансона;

3) разработанная компьютерная модель операции прямого выдавливания, учитывающая расчет поля Гартфилда требует калибровки диапазонов его значений по результатам натурального эксперимента, что предполагается выполнить для продолжения данной НИР.

#### **Список литературы**

1. Алиев И.С., Махмудов К.Д., Гамзатов Г.А., Крюгер К. Совершенствование процессов точной объемной штамповки выдавливанием // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2020.– № 9. – С. 10-23.
2. Воронцов А.Л., Лебедева Д.А. Комбинированное выдавливание стаканов с коническим дном. Актуальность исследования // Справочник. Инженерный журнал. – 2021. – №55. – С. 2-6.
3. Гречников Ф.В., Дмитриев А.М., Кухарь В.Д. и др. Прогрессивные технологические процессы холодной штамповки / Под общ. ред. А.Г.Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1985. – 184 с.
4. Кондратенко В.Г., Карачабан П.Н. Исследование технологических процессов холодного комбинированного выдавливания деталей плазмотрона // Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. Сборник научных трудов. – Тула: ТГУ, 2001. – С. 86-96.
5. Власов А.В. и др. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки: учебное пособие / под ред. А.В. Власова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. – 383 с.

#### Сведения об авторах:

*Рулين Сергей Павлович* – аспирант;

*Петров Павел Александрович* – к.т.н., доцент.

## КРИОГЕННАЯ ОБРАБОТКА И МЕТОДЫ КРИОГЕННОЙ ОБРАБОТКИ НЕРЖАВЕЮЩИХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ

*Нгуен В.Д.*

*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,  
Санкт-Петербург*

**Ключевые слова:** аустенитная сталь, криогенная обработка, криогенное охлаждение, методы криогенной обработки, жидкий азот, фазовое структурное превращение, мартенситное превращение, смазочно-охлаждающие жидкости.

**Аннотация.** Рассмотрена эффективность применения криогенного охлаждения при обработке материалов аустенитного класса. При криогенном воздействии в структуре материалов аустенитного класса происходит мартенситное превращение, что изменяют физико-механические свойства материалов. Это приводит к изменению условия резания, следовательно, к повышению качества обработки материалов аустенитного класса. Рассмотрено будущее применение криогенной обработки в современной промышленности.

## CRYOGENIC PROCESSING AND METHODS OF CRYOGENIC PROCESSING OF STAINLESS AUSTENITIC STEEL

*Nguyen V.D.*

*Saint-Petersburg Mining University of Empress Catherine II, Saint-Petersburg*

**Keywords:** austenitic steel, cryogenic processing, cryogenic cooling, cryogenic processing methods, liquid nitrogen, phase structural transformation, martensitic transformation, cutting fluids.

**Abstract.** The effectiveness of using cryogenic cooling in the processing of austenitic materials is considered. During cryogenic exposure, a martensitic transformation occurs in the structure of austenitic materials, which changes the physical and mechanical properties of the materials. This leads to a change in the cutting conditions, consequently, to an increase in the quality of processing of austenitic materials. The future application of cryogenic processing in modern industry is considered.

Криогенная обработка – это новая технология, которая представляет собой термическое воздействие с низкой температурой в процессе обработки материалов. Криогенная обработка способствует улучшить или изменить физико-механических свойств материалов, следовательно, создать новые условия обработки. Криогенная обработка представляет собой применение криогенной среды при обработке резанием материалов. Более используемыми криогенными веществами являются жидкий азот (LN), температура которого может достигать до  $-196^{\circ}\text{C}$  или углекислород ( $\text{CO}_2$ ), температура которого достигает до  $-78^{\circ}\text{C}$ . В настоящее время жидкий азот или углекислород нашли широкое применение в разных современных областях промышленности из-за своих характеристик, таких как низкая стоимость и безвредное воздействие на окружающую среду [1]. Криогенная обработка часто применяет жидкий азот или углекислород в качестве охлаждающей жидкости с целью устранения или уменьшения количества тепла, выделяемого в зоне резания [1]. Для осуществления криогенной обработки необходимо использовать специальное оборудование, обеспечивающее хранение жидкого азота (сосуд Дьюара) или углекислорода. Основываясь на своих

механизмах охлаждения, жидкий азот обеспечивает охлаждающий эффект за счет очень низкой температуры среды, в то время как в  $\text{CO}_2$  охлаждающий эффект обусловлен быстрым расширением газа. Температура кипения жидкого азота ниже, чем у двуокиси углерода, и он может скапливаться на более низких уровнях или на полу при обработке, что может привести к проблемам с дыханием из-за его более высокой плотности; поэтому жидкий азот в большей степени применим, чем жидкость двуокиси углерода для использования в качестве смазочно-охлаждающей жидкости при механической обработке.

При обработке нержавеющей стали аустенитного класса обычно возникают высокие ударные нагрузки и износ инструмента из-за их высокой прочности и высокой пластичности. Обычно заготовки после механической обработки подвергаются последующей термической обработке или процессу механической закалки для повышения твердости поверхностного слоя заготовки. Повышение твердости происходит в результате измельчения зерна, образования двойниковых границ зерен и повышенной плотности дислокаций. Присутствие мартенситной фазы в материале улучшает свойство твердости [2]. Глубокая криогенная обработка обычно применяется при механической обработке для улучшения свойств микроструктуры материала, которые превращают остаточный аустенит в мартенсит, поскольку мартенсит является самой твердой фазой на диаграмме железо-углерод. Чтобы использовать мартенситное превращение, необходимо знать механизм мартенситного превращения, вызванного деформацией, при механической обработке. При криогенном точении метастабильных аустенитных нержавеющей сталей в поверхностном слое заготовки может осуществляться деформационно-индуцированный фазовый переход из  $\gamma$ -аустенита в  $\alpha$ -мартенсит [2], что приводит к повышению микротвердости, а также к повышению усталостной прочности и износостойкости. Деформационному образованию мартенсита способствуют высокие пластические деформации и низкие температуры. Содержание мартенсита в основном падает с ростом пластической деформации при постоянной температуре. При снижении температуры обработки можно добиться мартенситного превращения при температуре  $-196^\circ\text{C}$ .

Температура должна быть достаточно низкой для достижения достаточного мартенситного превращения. Следовательно, этот процесс чистовой обработки позволяет интегрировать упрочнение поверхностного слоя в процесс механической обработки и, таким образом, представляет собой отдельный процесс упрочнения. Содержание  $\alpha$ -мартенсита и получаемые свойства заготовки сильно зависят от параметров процесса и результирующей термомеханической нагрузки при криогенном точении [2].

Существует три метода криогенной обработки: охлаждение зоны резания и/или стружки и не прямое охлаждение режущего инструмента, охлаждение заготовки.

Первый метод заключается в распылении криогенна в зону резания или в зону контакта инструмента со стружкой. Коэффициент трения между режущим инструментом и материалом заготовки является одним из параметров, влияющих на стойкость инструмента, силы резания и поверхность обрабатываемой детали.

При использовании криогенного охлаждения смазочные пленки, образующиеся между поверхностями скольжения, изменяют свойства материала и твердость поверхности, что приводит к снижению коэффициента трения [1]. Этот метод делится на два подхода, в том числе с использованием внешней насадки и модификация режущего инструмента или держателя инструмента. Этот метод помогает рассеивать тепло, удаляя его из точки резания, охлаждая режущий инструмент, улучшая свойства режущего инструмента и изменяя коэффициент трения, предотвращая при этом изменение свойств материала заготовки. В последние годы было исследовано криогенное точение для достижения поверхностного упрочнения, вызванного деформацией. С этой целью углекислород ( $\text{CO}_2$ ) определяется как мощный теплоноситель с хорошими смачивающими свойствами. Дополнительно анализировалось влияние положения сопла. Для обеспечения фазового превращения в поверхностном слое заготовки выбирают пластину со скошенной режущей кромкой. Можно показать, что с помощью этой стратегии криогенного точения эксплуатационные характеристики компонентов могут быть улучшены с точки зрения износостойкости, а также усталостной прочности. Деформационное поверхностное упрочнение при криогенном точении метастабильной аустенитной нержавеющей стали зависит от параметров резания: скорости резания, подачи и глубины резания, а также наклона режущей кромки инструмента [2].

Применение криогенного охлаждения обеспечивает прямое поверхностное упрочнение метастабильных аустенитных сталей во время резания. Метастабильный аустенит может превратиться в мартенсит за счет пластической деформации, если поддерживается достаточно низкая температура. Чтобы использовать этот эффект при резке, необходимо постоянно поддерживать криогенные условия. При таком подходе резку и закалку можно совместить в одном процессе [3, 4].

Второй метод – не прямое охлаждение режущего инструмента, при котором охлаждение происходит без контакта криогенного материала с заготовкой или инструментом. В этом методе тепло, выделяющееся во время обработки, рассеивается за счет проводимости через режущий инструмент. Этот метод заключается в охлаждении режущего инструмента без прямого контакта холода с зоной резания или заготовкой.

В третьем методе заготовка охлаждается криогенном перед обработкой, чтобы изменить свойства материала заготовки. Этот метод не только изменяет свойства материала заготовки, но и повышает обрабатываемость. Третий метод имеет более простоту применения и эффективности.

### **Заключение**

1) Криогенная обработка существенно решает задачу, предъявляемую для чистовой токарной обработки коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса.

2) Метод локального криогенного воздействия является оптимальным методом в настоящее время для обработки и аустенитной стали и других труднообрабатываемых сталей и сплавов.

**Список литературы**

1. Che Haron S.H., Shalina Sheik Muhamad, Jaharah A. Ghani. A review on future implementation of cryogenic machining in manufacturing industry // Progress in Industrial Ecology An International Journal. 2018, vol. 12(3), pp. 260-283. DOI:10.1504/PIE.2018.10018040.
2. Benjamin Kirsch, Hendrik Hotz, Ralf Müller, Steven Becker, Annika Boemke, Marek Smaga, Tilmann Beck. Generation of deformation-induced martensite when cryogenic turning various batches of the metastable austenitic steel AISI 347 // Production Engineering. 2019, vol. 13(3-4), pp. 343-350. DOI:10.1007/s11740-018-00873-0.
3. Максаров В.В., Нгуен В.Д., Ефимов А.Е., Бригаднов И.А. Технологическое обеспечение качества обработки стальной заготовки аустенитного класса с дроблением стружки // Металлообработка. – 2023. – № 2 (117). – С. 47-55. – DOI: 10.25960/mo.2021.3.57.
4. Maksarov V.V., Efimov A.E., Olt J. Improving the quality of hole processing in welded products made of dissimilar materials with a new boring tool // Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021, no.1, pp. 1-16. DOI: 10.1007/s00170-021-07975-7.

Сведения об авторе:

*Нгуен Ван Дао* – аспирант.

## РАЗРАБОТКА СОВРЕМЕННОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПЕРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ

*Степанов С.С.*

*Санкт-петербургский государственный политехнический университет  
Петра Великого, Санкт-Петербург*

**Ключевые слова:** технологический процесс, концевые меры длины, финишная операция, измерительная система, операционный контроль.

**Аннотация.** В статье рассмотрены особенности технологического процесса изготовления концевых мер длины, сформулированы требования к измерительной системе для операционного контроля. Рассмотрена конструкция предлагаемой измерительной системы и результаты исследований точности измерения на финишных операциях технологического процесса. Графически представлен один из показателей точности (размах), который характеризует точность измерительной системы в диапазоне  $\pm 100$  мкм.

## DEVELOPMENT OF MODERN MEASURING SYSTEM FOR OPERATIONAL CONTROL OF PRECISION PARTS

*Stepanov S.S.*

*Peter the Great Saint-Petersburg State Polytechnic University, Saint-Petersburg*

**Keywords:** technological process, end length measures, finishing operation, measuring system, operational control.

**Abstract.** The article discusses the features of the technological process of manufacturing end length measures, formulates the requirements for the measuring system for operational control. The design of the proposed measuring system and the results of measurement accuracy studies at the finishing operations of the technological process are considered. One of the accuracy indicators (span) is graphically presented, which characterizes the accuracy of the measuring system in the  $\pm 100$  mkm range.

Технология производства плоскопараллельных концевых мер длины отличается от традиционной технологии изготовления машиностроительных деталей наличием большого количества доводочных операций на финишном этапе изготовления. Наличие большого количества доводочных операций обусловлено малыми полями допусков, которые необходимо обеспечить на каждой операции, чтобы на выходе получить деталь с уникальными требованиями по точности размера, формы и взаимного расположения рабочих поверхностей. Так как допуск прецизионных деталей таких как плоскопараллельные концевые меры длины исчисляется сотыми долями микрона то автоматизировать данный технологический процесс используя станки с ЧПУ практически невозможно. Повысить эффективность данного технологического процесса изготовления плоскопараллельных концевых мер длины возможно только, применив более современные средства контроля на каждой операции технологического процесса и при окончательном контроле при комплектации наборов по классам и разрядам [1-2].



Чтобы обеспечить необходимый диапазон измерения от 4,0 до 100 мкм с необходимой точностью измерения на пяти доводочных операциях в цеховых условиях применяют 5 приборов с разной ценой деления.

Применяемые микрометры в зависимости от контролируемого поля допуска имеют цену деления: 0,1; 0,2; 1,0; 2,0; 5,0 мкм. Предел допустимой погрешности этих приборов составляет соответственно  $\pm 0,08$ ;  $\pm 0,1$ ;  $\pm 0,3$ ;  $\pm 0,6$ ;  $\pm 1,5$  мкм при условии соблюдения требований ГОСТ 28798-90. В основном эти требования касаются температурных условий ( $20 \pm 4^\circ\text{C}$ ) и чистоты на рабочем месте.

На основании вышесказанного можно сформулировать требования к измерительной системе для операционного контроля с 1 до 5 доводочных операций работающего в цеховых условиях [3-7].

Измерительная система должна удовлетворять следующим характеристикам и требованиям для обеспечения надежного контроля прецизионных деталей на пяти финишных операциях доводки [4-9]:

- измерительная система должна быть портативной и располагаться на лабораторном столе рядом с технологическим оборудованием;
- измерительная система не должна быть восприимчива к высокочастотным колебаниям от технологического оборудования;
- рабочий диапазон системы не менее 100 мкм;
- погрешность на всем рабочем диапазоне не хуже  $\pm 0,3$  мкм;
- система не должна быть существенно восприимчива к температурным колебаниям в пределах  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ ;
- система должна работать в полуавтоматическом режиме, чтобы исключить человеческий фактор;
- система должна в автоматическом режиме проводить все математические вычисления, по результатам оценивать точность выполнения операции и результаты фиксировать в виде протокола измерений;
- все требования должен обеспечивать одна измерительная система на первых пяти доводочных операциях.

На основании изложенных требований, была разработана измерительная система ПКМ-100-05 (рис. 1) для операционного контроля на пяти финишных операциях.

Данная система предназначена для измерения концевых мер длины в цеховых условиях и представляет из себя компьютеризированное средство измерения, устанавливаемое на столе рядом с технологическим оборудованием.

Система ПКМ-100-05 (рис. 2) состоит из измерительной колонки-1, верхнего кронштейна с измерительным модулем – 2, маховика перемещения измерительного модуля – 3, фиксатора верхнего кронштейна – 4, рукоятки микроподачи измерительного модуля – 5, ручного арретира измерительного модуля – 6, гранитного основания – 7, нижнего кронштейна с опорной пяткой – 8, компьютера – 9.

Гранитное основание выполняет функцию измерительного стола, и плоскости для выравнивания температуры мер, подготовленных к поверке.

Верхний кронштейн передвигается по колонке вращением маховика 3.

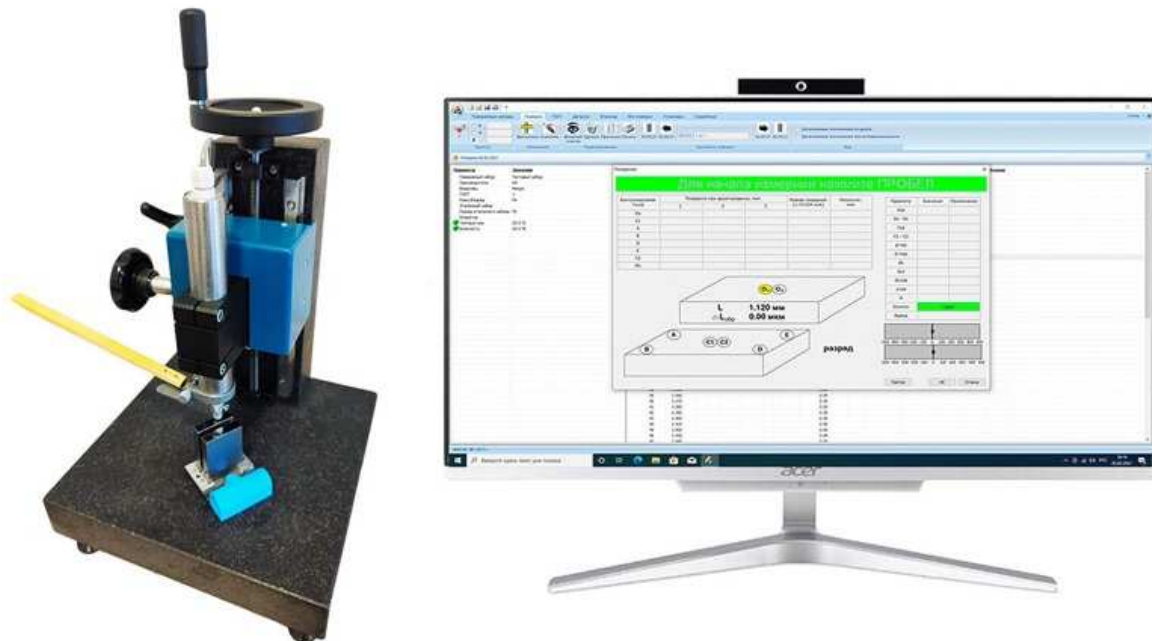


Рис. 1. Разработанная измерительная система ПКМ-100-05

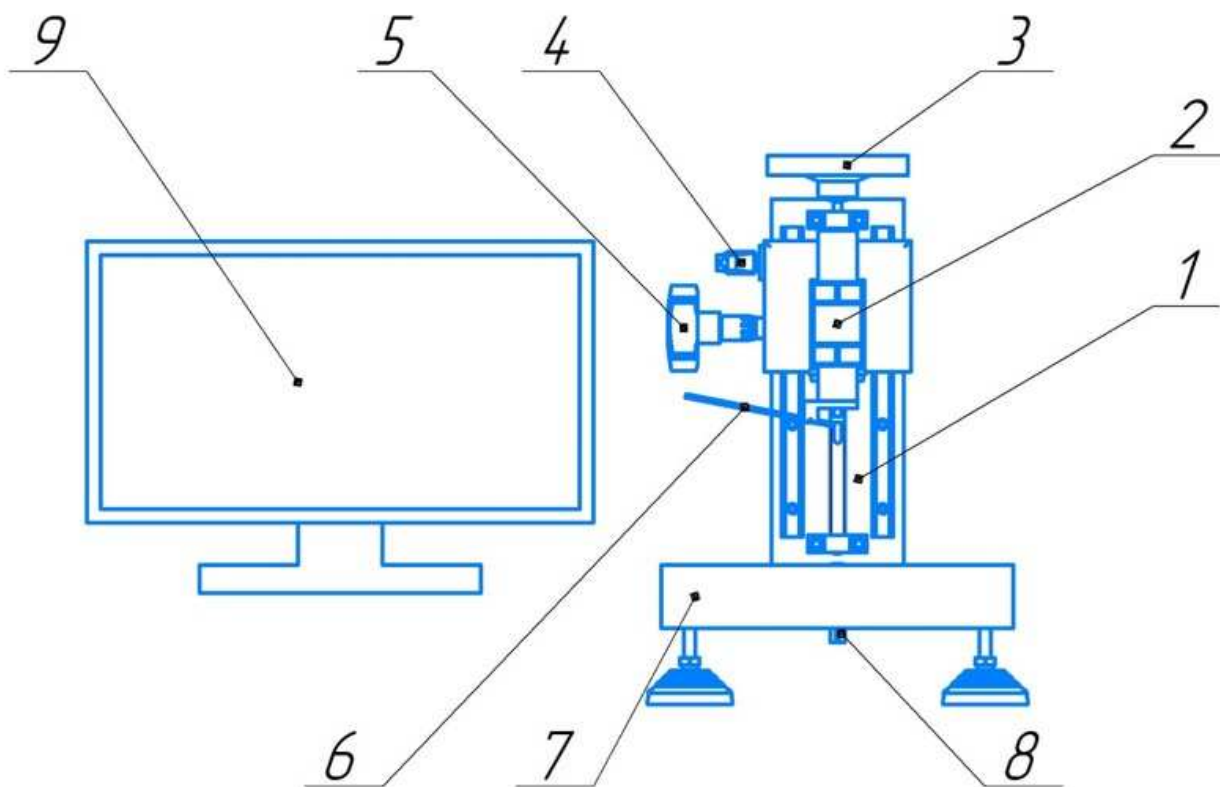


Рис. 2. Состав компаратора модификаций ПКМ-100-05

Верхний кронштейн содержит механизм вертикальной тонкой подачи измерительного модуля. Подача осуществляется вращением рукоятки 5.

Нижний кронштейн жестко крепится к гранитному основанию.

Измерительный модуль состоит из корпуса с присоединительным диаметром 28 мм, в котором закреплен индуктивный датчик с механизмом ручного арретирования 6. Измерительный модуль выполнен неразборным, поэтому при поломке заменяется полностью.

Компаратор выполнен с большим запасом прочности, при условии аккуратного обращения, поломка механической части практически исключена.

Работой оператора измерительной системы управляет компьютерная программа поверки мер через дисплей компьютера. Кассета с мерами выводится на соответствующую позицию вручную. Результаты измерения и обработанные данные выводятся на дисплей и заносятся в память компьютера.

Далее, были выполнены экспериментальные исследования измерительной системы, подтверждающие обеспечение необходимой точности операционного контроля.

Для наибольшей достоверности результатов было произведено по 25 измерений одного из показателей точности измерительной системы-размаха показаний, на семи контрольных точках (рис. 3) и рассчитаны средние значения, по результатам которых была построена точечная диаграмма (рис. 4). Величина достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,8$ , что говорит о высокой точности описания модели и имеющиеся данных.

Контролируемые точки, мкм	Размах показаний Δ, мкм.																									
	Δср.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
+100	0,040	0,05	0,05	0,04	0,05	0,02	0,06	0,05	0,02	0,06	0,04	0,03	0,01	0,06	0,04	0,06	0,05	0,03	0,05	0,06	0,04	0,05	0,01	0,03	0,06	0,04
+50	0,035	0,05	0,03	0,02	0,05	0,03	0,04	0,05	0,06	0,01	0,05	0,04	0,02	0,03	0,01	0,03	0,04	0,03	0,06	0,05	0,02	0,04	0,02	0,04	0,01	0,05
+10	0,033	0,02	0,03	0,05	0,04	0,04	0,05	0,01	0,03	0,01	0,02	0,06	0,04	0,03	0,04	0,02	0,05	0,01	0,03	0,05	0,06	0,02	0,01	0,04	0,05	0,02
0	0,033	0,03	0,01	0,04	0,06	0,02	0,01	0,02	0,04	0,03	0,05	0,04	0,03	0,04	0,01	0,06	0,05	0,03	0,04	0,02	0,05	0,01	0,03	0,05	0,04	0,02
-10	0,033	0,02	0,04	0,02	0,05	0,02	0,06	0,04	0,03	0,02	0,04	0,01	0,06	0,01	0,03	0,05	0,01	0,04	0,03	0,05	0,06	0,01	0,03	0,04	0,02	0,04
-50	0,037	0,06	0,04	0,03	0,03	0,01	0,04	0,03	0,05	0,05	0,02	0,03	0,05	0,02	0,03	0,05	0,06	0,02	0,05	0,04	0,02	0,06	0,01	0,04	0,02	0,06
-100	0,045	0,03	0,05	0,02	0,06	0,05	0,04	0,05	0,03	0,05	0,05	0,05	0,04	0,06	0,05	0,03	0,04	0,04	0,02	0,06	0,05	0,06	0,04	0,06	0,05	0,04

Рис. 3. Определение размаха показаний при арретировании индуктивных преобразователей (допустимое значение 0,07 мкм)

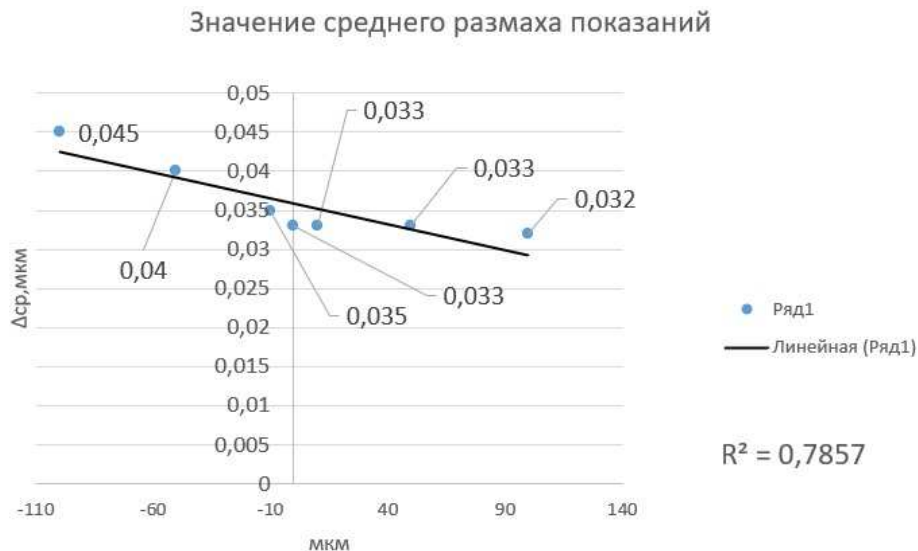


Рис. 4. Графическое изображение значений среднего размаха показаний

По результатам исследований были сделаны следующие выводы:

1) Как видно из результатов экспериментальных исследований разработанная измерительная система удовлетворяет требованиям по точности измерения.

2) После применения автоматизированной измерительной системы производительность на финишных операциях технологического процесса изготовления концевых мер длины возросла в 3 раза.

### Список литературы

1. Гжиров Р.И., Серебряницкий П.П. Программирование обработки на станках с ЧПУ: Справочник. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. – 588 с.
2. Технология машиностроения. Часть 2. Проектирование технологических процессов: Учеб. пособие / Э.Л. Жуков, И.И. Козарь, Б.Я. Розовский, В.В. Дегтярев, А.М. Соловейчик; под ред. С.Л. Мурашкина. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 498 с.
3. ГОСТ 8.207-76 Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 6 с.
4. Catalog 813 Series 130B gage block comparators/ Federal.
5. Catalog Dimensional Metrology. Length, Form, Gear and Surface Texture measuring systems. Rotary Stroke Bearings, Spinning Pumps/ Mahr GmbH Göttingen, 2000.
6. Catalog Die Welt der Metrologie/ Tesa, 2003.
7. Общие требования к методикам поверки плоскопараллельных концевых мер длины МИ 1604-87: методические указания. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 11 с.
8. ГОСТ 9038-90 (СТ СЭВ 720-77). Меры длины концевые плоскопараллельные: технические условия. – М.: Государст. комитет ССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1990. – 15 с.
9. МИ 2079-90. Меры длины концевые плоскопараллельные образцовые 3 и 4-го разрядов и рабочие классов точности 1-5 длиной до 100мм: методика поверки. – М.: Государст. комитет ССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1990. – 17 с.

#### Сведения об авторе:

*Степанов Сергей Сергеевич* – старший преподаватель.

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ПРОФИЛИРУЮЩЕГО РОЛИКА

*Скрипаленко М.Н., Ерохин А.В., Скрипаленко М.М., Панасюк В.В.  
Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,  
Москва*

**Ключевые слова:** утяжина, профилирование, заготовка, профилирующий ролик, угол конусности ролика, температурные условия.

**Аннотация.** При выборе материалов и размеров профилирующего ролика для профилирования пластической деформацией концевых участков заготовок необходимо знать параметры, характеризующие условия работы ролика. Для определения силовых и температурных условий провели компьютерное моделирование в QForm операции профилирования заготовки из титанового сплава ВТ6, диаметром 32 мм, предназначенной для прокатки прутка, диаметром 24 мм. Рассчитаны сила на ролик, температурные значения по боковым поверхностям и по реборде ролика, интенсивности напряжений. Проанализирована возможность применения в качестве материала ролика инструментальной стали Н11.

## COMPUTER SIMULATION OF PROFILING ROLLER WORKING CONDITIONS

*Skripalenko M.N., Erokhin A.V., Skripalenko M.M., Panasyuk V.V.  
National university of science and technology "MISIS", Moscow*

**Keywords:** trough, profiling, workpiece, profiling roller, taper angle of the roller, temperature conditions.

**Abstract.** When choosing materials and sizes of the profiling roller for plastic deformation profiling of the end sections of the workpieces, it is necessary to know the parameters characterizing the working conditions of the roller. To determine the power and temperature conditions, a computer simulation of the profiling operation of a blank made of titanium alloy VT6, with a diameter of 32 mm, intended for rolling a bar with a diameter of 24 mm was performed in QForm. The force on the roller, temperature values along the side surfaces and along the edge of the roller, and stress intensity were calculated. The possibility of using H11 tool steel as a roller material was analyzed.

При винтовой прокатке на концевых участках получаемых прутков образуется утяжина, которая является дефектом и удаляется в обреш. На мини-станах радиально-сдвиговой прокатки (РСП), т.е. винтовой прокатки при больших углах подачи, получают титановые прутки, и в обреш из-за утяжины в зависимости от диаметра получаемого прутка может уходить до 6% от массы партии прутков.

Образование дефекта утяжины, как отмечается в работе [1], обусловлено тем, что процесс РСП включает основную установившуюся стадию, а также две нестационарные стадии деформации переднего и заднего концевых участков. При деформации концевых участков вытяжка периферийных слоев превышает вытяжку центральных, и образуются воронкообразные углубления – утяжины. Концевые участки с утяжиной удаляют резкой или ломкой, что неизбежно приводит к увеличению технологических потерь и снижению выхода годного.

Поэтому задача минимизации утяжины для увеличения выхода годного, является актуальной и имеет важное практическое значение – ресурсосбережение.

Одним из возможных способов уменьшения образования утяжины при винтовой прокатке является профилирование торцов заготовок перед прокаткой. Указанная операция может быть произведена путем пластической деформации концевых участков исходных заготовок для придания конической формы с заданным углом конусности на специальной установке, например, с вращением заготовки и сведением профилирующих роликов [1]. Для реализации такого способа необходимо оборудование, аналогом конструкции которого могут служить устройства резки пластической деформацией прутков роликами [2]. Так авторами работы [2] предложена компактная установка для резки нагретых прутков роликами и проведено компьютерное моделирование процесса резки заготовки диаметром 40 мм из стали марки AISI 1045 в вычислительной среде DEFORM-3D. При разработке конструкции таких устройств нужно выбрать форму и размеры профилирующего инструмента [3], а также произвести выбор материала роликов. Для этого необходимо оценить условия работы профилирующего ролика.

Целью являлось определение силовых и температурных условий работы профилирующего ролика для получения концов заготовок заданного профиля перед прокаткой для минимизации дефекта утяжины на основе компьютерного моделирования. Для достижения цели поставлены следующие задачи: рассчитать углы профилирующего ролика для выбранного размера заготовки, построить 3D-модели ролика и заготовки, провести компьютерное моделирование процесса профилирования.

Для моделирования выбрали заготовку из титанового сплава ВТ6, диаметром 32 мм, из которой получают пруток диаметром 24 мм на мини-стане РСП. Согласно ранее проведенным исследованиям [1, 3] установлено, что глубина утяжины на переднем и заднем конце прутков из титановых сплавов отличается, на заднем конце меньше. Поэтому для расчета углов конусности концов заготовок для профилирования получены уравнения для расчета углов для переднего и заднего концов по критерию нулевой глубины утяжины при заданных значениях диаметра заготовки и прутка [1]. Рассчитали углы, которые составили для переднего и заднего концов  $60,9^\circ$  и  $63,4^\circ$  соответственно. Профилирование концов заготовки можно произвести пластической деформацией непосредственно торцов или резкой-профилированием при раскросе на заданные длины. Второй вариант предполагает, что одной боковой поверхностью ролик формирует профиль переднего конца одной заготовки, а другой боковой поверхностью – заднего конца другой заготовки. Экспериментально показано, что при обоих вариантах можно использовать ролик биконической формы с разными углами конусности боковых поверхностей [3]. Поэтому для моделирования выбрали биконический ролик с углами конусности  $29,1^\circ$  и  $26,6^\circ$  по отношению к вертикальной реборде, разделяющей боковые поверхности. Согласно указанным и рассчитанным геометрическим параметрам в SolidWorks построили 3D-модели заготовки и роликов. При выбранных диаметре

цилиндрической части ролика 30 мм и толщине ролика 30 мм диаметр по реборде составил 120 мм. Затем создали сборку.

Процесс профилирования моделировали в вычислительной среде QForm. Температуру нагрева заготовки задавали  $T = 1050^{\circ}\text{C}$ , частоту вращения – 200 об/мин (задавалась двумя граничными условиями «вращение»), скорость подачи обоих роликов – 2,5 мм/с, во время профилирования ролик вращались в условиях трения о подвижную заготовку. Фактор трения для пары «ролик заготовка» задавали равным 0,5. В качестве материал роликов из базы данных QForm выбрали сталь марки H11 (стандарт ASTM A681), которая используется для лезвий горячей резки металлов. Теплообмен между роликами и заготовкой задавали как «Простой» из меню QForm.

По результатам моделирования установлено, что время профилирования составило 6,2 с. При профилировании сила на ролик изменялась практически по параболической кривой, максимальное значение 6,1 кН соответствует моменту времени 2,4 с. Очевидно, что в процессе профилирования ролик разогревается. В момент времени 3,6 с температура по реборде составила  $540^{\circ}\text{C}$ , по боковым поверхностям  $240^{\circ}\text{C}$  и  $276^{\circ}\text{C}$ . Большее значение температуры соответствует боковой поверхности ролика с большим углом конусности. Минимальную температура  $20^{\circ}\text{C}$  имеют нерабочие поверхности ролика. Максимальное значение интенсивности напряжений по боковой поверхности ролика составило 406 МПа, что при пределе прочности выбранной марки стали в 1668 МПа, обеспечивает коэффициент запаса прочности 4,1. По методике проведенного исследования можно оценить возможности применения и других материалов ролика.

Таким образом, полученные результаты и методика моделирования могут быть использованы для выбора материала ролика с учетом также износостойкости и для оптимизации формы и размеров ролика по испытываемым нагрузкам, а также с учетом конструктивных и технологических ограничений при проектировании установки профилирования, одним из материалов может быть сталь марки H11.

### Список литературы

1. Карпов Б.В., Скрипаленко М.М., Галкин С.П., Скрипаленко М.Н., Самусев С.В., Чан Б.Х., Павлов С.А. Исследование нестационарных стадий радиально-сдвиговой прокатки заготовок с профилированными торцами // Металлург. – 2017. – № 4. – С. 18-24.
2. Ying Wang, Rui Wang, Xiaohua Zhang, Pengke Hu, Yang Chen, Quansheng Rong, Xuedao Shu. Study on manufacturing of special-shaped ends blank for cross wedge rolling without stub bar // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020, vol. 109, pp. 2465-2480.
3. Карпов Б.В., Скрипаленко М.Н., Ерохин В.А., Скрипаленко М.М., Романцев Б.А., Панасюк В.В. Выбор формы ролика для профилирования концов заготовок перед прокаткой прутков на мини-станах РСР для минимизации утяжины // Металлург. – 2023. – № 11. – С. 129-133.

### Сведения об авторах:

*Скрипаленко Михаил Николаевич* – к.т.н., доцент, доцент кафедры ОМД;

*Ерохин Александр Валерьевич* – аспирант;

*Скрипаленко Михаил Михайлович* – к.т.н., доцент, доцент кафедры ОМД;

*Панасюк Владислав Валерьевич* – магистрант.

## ПРИМЕНЕНИЕ ВИРТУАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМИ РОБОТАМИ

*Сергеев А.В., Сергеев С.Ф.*

*Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики, Санкт-Петербург*

**Ключевые слова:** промышленный робот, виртуальная реальность, человеко-машинный интерфейс, управление роботами, ситуационная осведомлённость.

**Аннотация.** Дистанционное управление роботами требует от оператора принятия решений на основании знаний о пространственной конфигурации робота, его окружения, объектов взаимодействия, а также прогноза изменений, которые произойдут с течением времени. Человек имеет существенные ограничения по обработке и хранению информации. В статье рассматриваются способы организации интерфейсов виртуальной реальности для управления роботами. Предлагаемое решение апробировано на реальном роботе и включает в себя универсальный решатель обратной задачи кинематики, планировщик траектории и поддерживает работу в траекторном режиме.

## THE USE OF VIRTUAL TOOLS TO CONTROL INDUSTRIAL ROBOTS

*Sergeev A.V., Sergeev S.F.*

*Central Research and Development Institute of Robotics and Technical Cybernetics, Saint-Petersburg*

**Keywords:** industrial robot, virtual reality, human-machine interface, robot control, situational awareness.

**Abstract.** Remote control of robots requires the operator to make decisions based on knowledge about the spatial configuration of the robot, its environment, objects of interaction, as well as forecasting changes that will occur over time. A person has significant limitations on the processing and storage of information. The article discusses ways to organize virtual reality interfaces for controlling robots. The proposed solution has been tested on a real robot and includes a universal solver for the inverse kinematics problem, a trajectory planner and supports operation in trajectory mode.

Эффективность взаимодействия человека и робота существенно повышается с появлением и распространением устройств виртуальной реальности. Расширяются возможности представления информации и способов обеспечения управляющих воздействий со стороны оператора. Однако, человек имеет физиологические ограничения пропускной способности перцептивной системы, которая позволяет ему оперировать не более чем  $7 \pm 2$  объектами («магическое» число Миллера) [1]. Всё, что превышает данный объем, не воспринимается. По нашему опыту мы знаем, что представить конфигурацию манипулятора по данным углов поворота шарниров для человека является очень сложной задачей. Наиболее естественным для человека является восприятие трёхмерного пространства. Для его построения предлагается использовать заранее известные модели объектов, а также модели объектов, построенные системой технического зрения, которые на основании датчиков обратной связи конфигурируются и расставляются по виртуальной сцене. Таким образом,



оператор, не имея возможности присутствовать непосредственно в рабочей зоне может видеть её виртуальную копию, которую он использует для принятия решений. Это позволяет оптимизировать процессы распределения психофизиологических ресурсов человека.

Такая виртуальная среда (индуцированная реальность) может содержать элементы, которые строятся не в виде копии реального мира, а являются понятной для человека метафорой. Например, можно использовать двумерный интерфейс в виде плоской поверхности, висящей в пространстве рядом с управляемым объектом, как показано на рисунке 1. Большинству людей интуитивно понятно, как осуществлять взаимодействие с подобного рода интерфейсами.

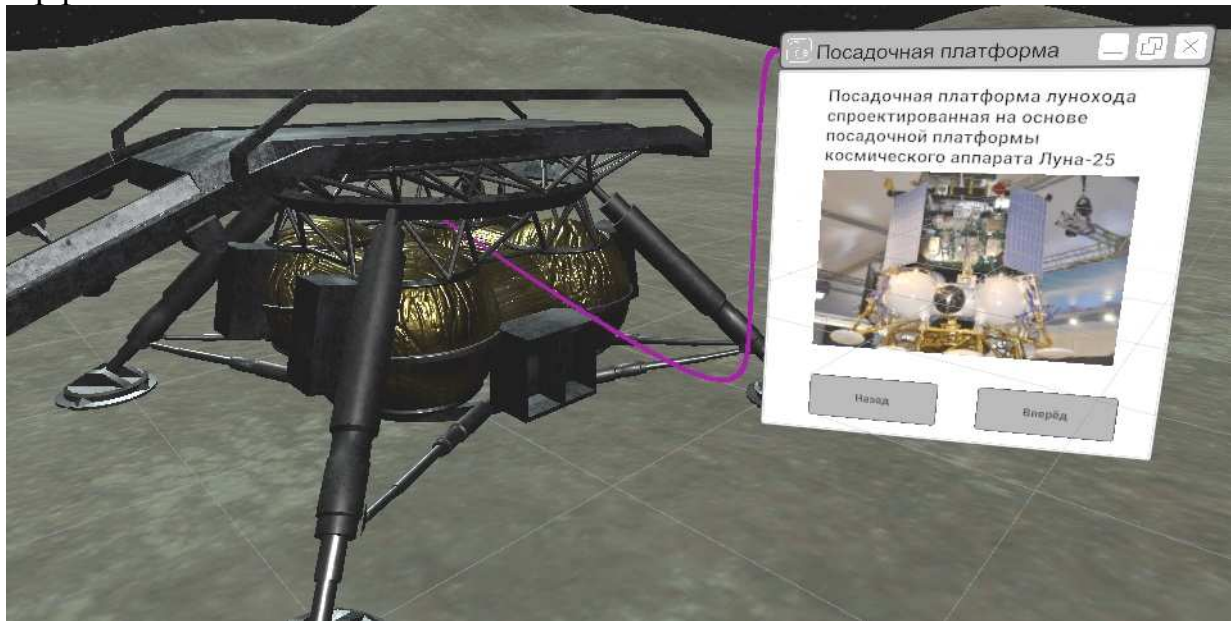


Рис. 1. Интерфейс управления в виртуальном пространстве

В ЦНИИ РТК уже несколько лет ведется разработка и исследования человеко-машинных интерфейсов для управления робототехническими системами, посредством интерфейсов виртуальной реальности [2-5].

Архитектуру системы управления можно условно разделить на несколько частей: оператор, устройства виртуальной реальности, приложение Unity, ROS и физический робот. Сцена Unity содержит цифровую модель робота и объекты окружения, графический пользовательский интерфейс. Джойстики позволяют оператору взаимодействовать с графическим интерфейсом и объектами (маркерами и виртуальными инструментами) на рабочей сцене. Модель робота обновляется по пакетам ROS, которые постоянно циркулируют между Unity и ROS. ROS управляет движениями через контроллеры робота, в которые передаётся управление, и возвращаются данные о текущем состоянии робота. Эти данные затем передаются в Unity, где используются для отображения текущего состояния робота на виртуальной сцене. Оператору кроме обычных двумерных интерфейсов доступны также и виртуальные инструменты, представляющие собой трёхмерные объекты на сцене, которые не имеют соответствующих аналогов в реальном мире.

В протестированной системе реализован режим копирующего управления, когда при нажатии курка оператором связывало заданное положение рабочего органа манипулятора и текущее положение руки оператора, все перемещения копировались в реальном времени. В виртуальном пространстве отображалось два манипулятора, один строился по данным от реального робота, а конфигурацию второго определял решатель обратной задачи кинематики исходя из заданного положения рабочего органа. Оператор может видеть одновременно движения реального робота и задаваемое им самим положение, к которому робот переходит по прямой линии от текущего.

Виртуальный интерфейс был протестирован на двенадцати испытуемых, имеющих различный опыт использования виртуальной реальности. Все участники успешно выполнили тестовое задание, а также высоко оценили простоту и интуитивность разработанного интерфейса управления.

### **Заключение**

Для обеспечения быстрой, точной и безопасной работы робота необходимы пользовательские интерфейсы, обеспечивающие соответствие сложности решаемой задачи с возможностями оператора. VR интерфейсы позволяют компенсировать недостаток в когнитивных возможностях оператора. В этой работе представлена удобная и интуитивно понятная система управления роботом.

### **Список литературы**

1. Miller, George A. The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information // Psychological Review. 1956, vol. 63 (2), pp. 81-97.
2. Сергеев А.В., Сергеев С.Ф. Редукция сложности в интерфейсах робототехнических и эргатических систем // Робототехника и техническая кибернетика. – 2019. – Т. 7, № 2. – С. 109-118. – DOI: 10.31776/RTSJ.7204.
3. Сергеев А.В., Титов В.В., Шардыко И.В. Индуцированная виртуальная среда управления манипулятором, предназначенным для работы с радиоактивными материалами // Робототехника и техническая кибернетика. – 2021. – Т. 9, № 1. – С. 32-41. – DOI: 10.31776/RTSJ.9104.
4. Сергеев А.В., Юсупова А.Ю., Сергеев С.Ф. Мультимерные интерфейсы в активной управляющей индуцированной виртуальной среде // Робототехника и техническая кибернетика. – 2022. – Т. 10, № 4. – С. 261-266. – DOI: 10.31776/RTSJ.10403.
5. Сергеев С.Ф., Сергеев А.В. Опознание объектов с переменными признаками, движущихся в организованных группах в виртуальном 3D пространстве // Сборник тезисов XXIV съезда физиологического общества им. И.П. Павлова, Санкт-Петербург, 11-15 сентября 2023 года. – Санкт-Петербург: ООО «Издательство ВВМ», 2023. – С. 523.

### Сведения об авторах:

*Сергеев Алексей Викторович* – аспирант, начальник отдела;

*Сергеев Сергей Федорович* – д.пс.н., профессор, начальник лаборатории.

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОБРАБОТКИ КРОМОК ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ РЕШЕНИЯ

*Ефимова М.В.*

*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,  
Санкт-Петербург*

**Ключевые слова:** обработка кромок, лазерная резка, обработка кромок из алюминиевых сплавов, финишная обработка, магнитно-абразивная обработка, детали летательных аппаратов, производство летательных аппаратов.

**Аннотация.** Большинство деталей изделий летательных аппаратов выполняется из алюминиевых сплавов, имеющих высокую отражательную способность, которая становится недостатком при раскрое лазерным лучом. Предложен перспективный метод обработки кромок деталей, основанный на разработанном способе с применением двухконтурного магнитно-абразивного воздействия. Приведены снимки материалов после лазерной резки, а также пробные результаты магнитно-абразивной обработки.

## CURRENT STATE OF THE PROBLEM OF EDGE FINISHING OF AIRCRAFT PARTS AND PROSPECTS OF ITS SOLUTION

*Efimova M.V.*

*Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg*

**Keywords:** edge processing, laser cutting, edge processing from aluminum alloys, finishing, magnetic abrasive finishing, aircraft parts, aircraft manufacturing.

**Abstract.** The majority of aircraft parts are made of aluminum alloys with high reflectivity, which becomes a disadvantage during laser beam cutting. A promising method of edge treatment of parts based on the developed method with the use of two-circuit magnetic abrasive impact is proposed. Pictures of materials after laser cutting, as well as trial results of magnetic abrasive processing are presented.

В современном мире достижению точности поверхности уделяется повышенное внимание, что дает основание развитию новых способов обработки и усовершенствованию существующих. Говоря об авиастроении, стоит отметить, что ценность точности имеет особое значение для соответствия всем требованиям неразъемных соединений деталей летательных аппаратов.

Среди существующих методов размерной и упрочняющей обработки в авиастроительной промышленности выделяются гидроабразивная обработка (резка), плазменная резка, лазерная обработка (резка) материалов, электронно-лучевая обработка, импульсные методы поверхностного энергетического воздействия (упрочнение взрывом и магнитно-импульсной обработкой), поверхностное упрочнение концентрированными потоками частиц и излучения [1]. Наиболее распространенным вариантом раскроя листового материала является лазерная резка. Данный метод обладает исключительной скоростью резания, производительностью процесса, способностью обработки различных материалов широкого диапазона толщин. При этом существенно сложнее

применение лазерной резки к материалам с высокой отражательной способностью, к которым относятся алюминий и алюминиевые сплавы, находящие свое применение во многих объектах транспорта, в частности, в объектах авиастроения.

Высокая отражающая способность материала не позволяет лазерному лучу создать ровный срез, что приводит к низкому качеству обработанной поверхности кромок, а как следствие снижению геометрических показателей точности последующих неразъемных соединений и необходимости последующей обработки.



Рис. 1. Кромки материала после лазерной резки

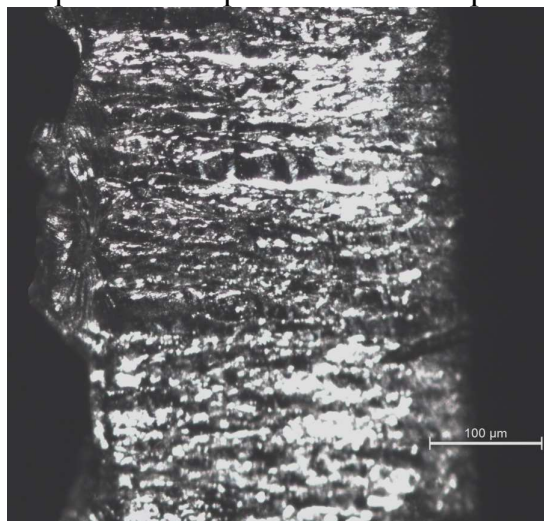


Рис. 2. Кромка листового материала после лазерной резки (снимок с электронного микроскопа)

В качестве перспективного способа обработки деталей из листового материала предлагается применение магнитно-абразивного полирования кромок. Помимо ранее разработанных способов обработки объектов из алюминиевых сплавов [2,3], в 2023 году был разработан способ, позволяющий осуществлять двухконтурное магнитно-абразивное воздействие на обрабатываемые поверхности.

Метод магнитно-абразивного полирование осуществляется на основе воздействия ферроабразивного порошка в магнитном поле на поверхность обрабатываемой детали, при этом большое значение уделяется параметрам технологической среды процесса, подбором которых достигается наилучший

результат обработки [4-6]. В конечном итоге можно добиться не только отсутствия видимых дефектов и следов предшествующей резки материала, но и показателей шероховатости по параметру Ra от 0,2 до 0,3 мкм (рис. 3).

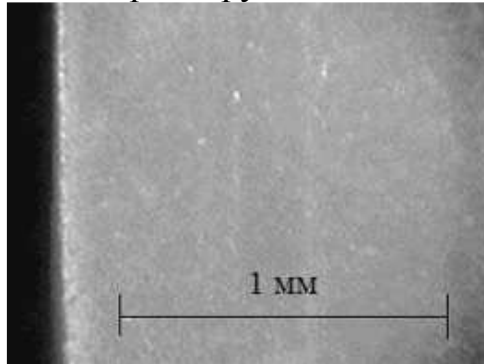


Рис. 3. Кромка листового материала после пробного эксперимента обработкой магнитно-абразивным воздействием

Реализация предложенного метода для кромок деталей летательных аппаратов позволит обеспечить новое качество поверхности и структуры поверхностного слоя обрабатываемых деталей, повышая точность неразъемных соединений аппаратов авиационной промышленности.

#### Список литературы

1. Самохвалов В.Н. Высокоэнергетические методы размерной и упрочняющей обработки: учеб. пособие [Электронный ресурс]. – Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2019.
2. Maksarov V.V., Keksin A.I., Filipenko I.A. Influence of magnetic-abrasive processing on roughness of flat products made of ams grade aluminum alloy // *Chernye Metally*. 2022, no. 7, pp. 82-87. DOI: 10.17580/tsm.2022.07.09.
3. Maksarov V.V., Maksimov D.D., Sinyukov M.S. Quality control of complex contour surfaces in aluminium alloy items during magnetic abrasive finishing // *Tsvetnye Metally*. 2023, no. 4, pp. 96-102. DOI: 10.17580/tsm.2023.04.13.
4. Хомич Н.С. Магнитно-абразивная обработка изделий. – Минск: БНТУ, 2006. – 217 с.
5. Zou Y., Xie H., Zhang Y. Study on surface quality improvement of the plane magnetic abrasive finishing process // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020, vol. 109(7-8), pp. 1825-1839. DOI: 10.1007/s00170-020-05759-z.
6. Акулович Л.М., Сергеев Л.Е., Лебедев В.Я. Основы магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей. – Минск: БГАТУ, 2012. – 316 с.

#### Сведения об авторе:

*Ефимова Мария Владимировна* – аспирант.

## ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ОХЛАЖДЕНИЯ РЕДУКТОРА

*Городинов В.Д., Толстиков А.С., Куц М.С.*

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
Москва*

**Ключевые слова:** редуктор, моделирование радиатора охлаждения, конвективный теплообмен, метод конечных элементов, Gridap.

**Аннотация.** В статье представлен расчет радиатора охлаждения червячного редуктора. В процессе исследования получена зависимость температуры контактной стенки радиатора от его геометрических параметров, в результате чего определена минимально допустимая высота ребер радиатора, при которой температура не превышает критической. Особенностью расчета является использования программного пакета с открытым исходным кодом Gridap, предназначенного для решения краевых задач в слабой постановке методом конечных элементов.

## THERMAL CALCULATION OF GEARBOX COOLING

*Gorodinov V.D., Tolstikov A.S., Kuts M.S.*

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow*

**Keywords:** gearbox, modeling of the cooling radiator, convective heat transfer, finite element method, Gridap.

**Abstract.** The article presents the calculation of the cooling radiator of a worm gearbox. In the process of research, the dependence of the temperature of the contact wall of the radiator on its geometrical parameters is obtained, as a result of which the minimum permissible height of the radiator ribs is determined, at which the temperature does not exceed the critical temperature. The peculiarity of the calculation is the use of the open-source software package Gridap, designed for solving boundary value problems in weak formulation by the finite element method.

### Введение

Во многих инженерных задачах важным аспектом является знание распределения температуры в теле. При нагреве тела расширяются, что приводит к возникновению тепловых напряжений. Если известно количество подводимого и выделяемого телом тепла, то можно определить распределение температуры в его объеме. Данная информация необходима для расчета распределения напряжений, знание которых необходимо при проектировании вращающихся механизмов. Например, реактивных двигателей, паровых генераторов и даже червячных редукторов.

При работе редуктора потери мощности, вызванные трением в зацеплении и в подшипниках, перемешиванием и разбрызгиванием масла, приводят к нагреву деталей редуктора и самой смазывающей жидкости. Если отвод тепла будет недостаточен, механизм передачи и масло перегреется. Так как смазочные свойства масла при нагреве резко ухудшаются, повышается износ механизма, а также возникает опасность заедания передачи и выхода ее из строя. При установленном режиме работы червячного редуктора количество тепла, выделяемого в нем, равно количеству отводимого от него тепла, которое зависит



от площади охлаждаемой поверхности. Однако, в современной технике наблюдается тенденция к уменьшению массы конструкций путем уменьшения металлоемкости и использования более легких материалов, и в то же время все чаще оборудование эксплуатируются на предельных режимах для обеспечения максимальной производительности. В связи с этим внешнюю площадь корпуса редуктора увеличивают за счет радиаторов. В то же время, существующие инженерные зависимости для теплового расчета редукторов в основном представляют собой проверочные расчеты и позволяют лишь качественно оценить допустимость того или иного решения. Проектные же расчеты существуют для каких-то отдельных, не редко, довольно простых случаев.

В общем же случае, тепловые расчеты и профилирование различных систем охлаждения, проводят в специализированных программных комплексах, таких как *ANSYS* или *COMSOL Multyphysics*. Однако, существенным недостатком использования данных пакетов является их высокая стоимость, что делает их доступными лишь малому кругу пользователей, зачастую крупным коммерческим предприятиям. С другой стороны, на данный момент существует большое количество инструментов с открытым исходным кодом [1, 2], позволяющие не только проводить отдельные расчеты, но и разрабатывать на их базе собственные специализированные расчетные модули. Использование таких инструментов требует более глубокого понимания предметной области и навыков программирования, однако позволяет проводить исследования на более глубоком уровне с использованием, в том числе, нестандартных физических моделей. Это делает такого рода инструменты особенно предпочтительными для использования в исследовательских и образовательных целях [3].

В данной работе проводится пример теплового расчета с использованием открытой библиотеки для расчетов методом конечных элементов (МКЭ) *Gridap* [4]. Даная библиотека позволяет объединить расширяемость библиотек типа *Deal.II* [1] с простотой использования и компактным высокоуровневым синтаксисом фреймворков типа *FEniCS* [2] который без ущерба для производительности во время выполнения. Язык программирования *Julia* [5] обеспечивает производительность компилируемых компьютерных языков, таких как *C/C++* или *Fortran*, и производительность интерпретируемых языков, таких как *Python* или *MATLAB*.

Особенностью *Gridap* является то, что формулировка условия решаемой краевой задачи осуществляется в вариационной постановке, по которой в дальнейшем рассчитываются локальные матрицы по методу Бубнова-Галеркина. Это позволяет проводить сложные расчеты широкого спектра задач достаточно быстро и с минимальными навыками программирования.

В качестве примера в данной работе был выполнен расчет радиатора охлаждения червячного редуктора. Исходные данные для расчета приведены в таблице 1. Характерные значения коэффициентов выбраны согласно рекомендациям [6, 7].

Процесс теплопереноса описывается уравнением Фурье-Кирхгофа для стационарного случая:

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla T(\mathbf{X})) = 0, \text{ для } \mathbf{X} \in \Omega, \quad (1)$$

где  $\mathbf{X} = \{x \ y \ z\}^T$  – вектор пространственных координат,  $\Omega$  – область решения задачи, определяемая геометрией рассматриваемого тела,  $\lambda = \{\lambda_{xx} \ \lambda_{yy} \ \lambda_{zz}\}^T$  – вектор коэффициентов теплопроводности в направлениях  $x$ ,  $y$  и  $z$ . В нашем случае для материала радиатора был выбран алюминий и коэффициент теплопроводности считался изотропным, поэтому  $\lambda_{xx} = \lambda_{yy} = \lambda_{zz} = \lambda$ . В уравнении неизвестным и является скалярное поле температур и именно его необходимо определить при решении задачи.

Табл. 1. Исходные данные

Параметр	Ед. измерения	Значения
Мощность, $P$	Вт	1500
КПД	Б.р.	0,7
Коэффициент теплопроводности, $\lambda$	Вт/(м·К)	238
Коэффициент теплоотдачи, $\alpha$	Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	20
Габаритные размеры	мм	150x150x60

На нижней границе радиатора было задано граничное условие II-го рода, т. е. тепловой поток  $q$ , который при данных параметрах редуктора составит 2780 Вт/м<sup>2</sup>:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q, \text{ для } \mathbf{X} \in \partial \dots \Omega_2, \tag{2}$$

где  $\partial \Omega_2$  – нижняя граница области  $\Omega$  и  $n$  – вектор нормали, ориентированный в сторону от области.

На верхней границе радиатора было задано граничное условие III-го рода.

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T_c - T_a), \text{ для } \mathbf{X} \in \partial \dots \Omega_{\dots 1}, \tag{3}$$

где  $T_c$  и  $T_a$  – температура стенки и окружающей среды соответственно,  $T_a = 299$  К,  $\partial \Omega_1$  – верхняя граница области  $\Omega$ .

Для формулировки вариационной постановки требуется домножить уравнения (1)-(3) на функции формы  $v$  и проинтегрировать по соответствующим областям. В этом случае будут получены билинейная  $a(u,v)$  и линейная  $b(v)$  формы, которые в итоге примут вид:

$$a(u,v) = \int_{\Omega} \lambda(\nabla(u) \cdot \nabla(v)) + \int_{\partial \Omega_{\dots 1}} \alpha \dots u \dots v, \tag{4}$$

$$b(v) = \int_{\partial \Omega_{\dots 1}} v \alpha \dots T_a + \int_{\partial \Omega_{\dots 2}} v q. \tag{5}$$

Расчет проводился для трех случаев. Во всех случаях ширина радиатора составляла 40 мм, количество ребер 3, толщина ребра 4 мм, высота составляла от 20 до 60 с шагом 5 мм. На рисунке 1 представлено приме распределения температурного поля в радиаторе для радиатора высотой 20 мм. Визуализация проводилась через открытый графический кроссплатформенный пакет *ParaView*. Зависимость температуры на монтажной границе радиатора от его высоты представлена на рисунке 2. Из полученной зависимости видно, что высота радиатора должна составлять не менее 30, чтобы не допустить перегрев масла.



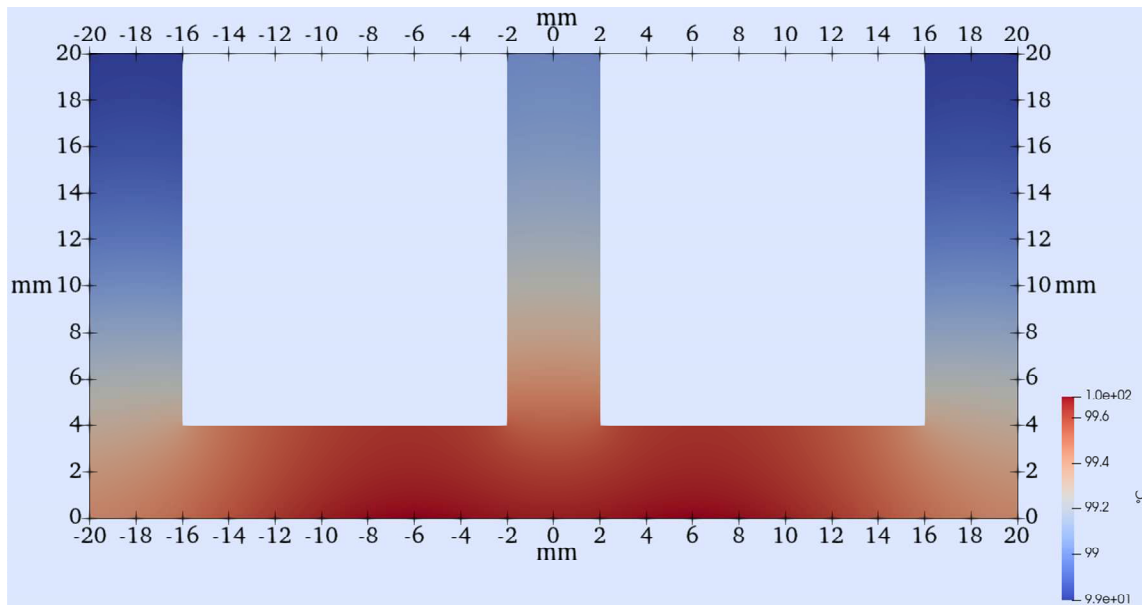


Рис. 1. Распределение температурного поля в радиаторе с высотой 20 мм

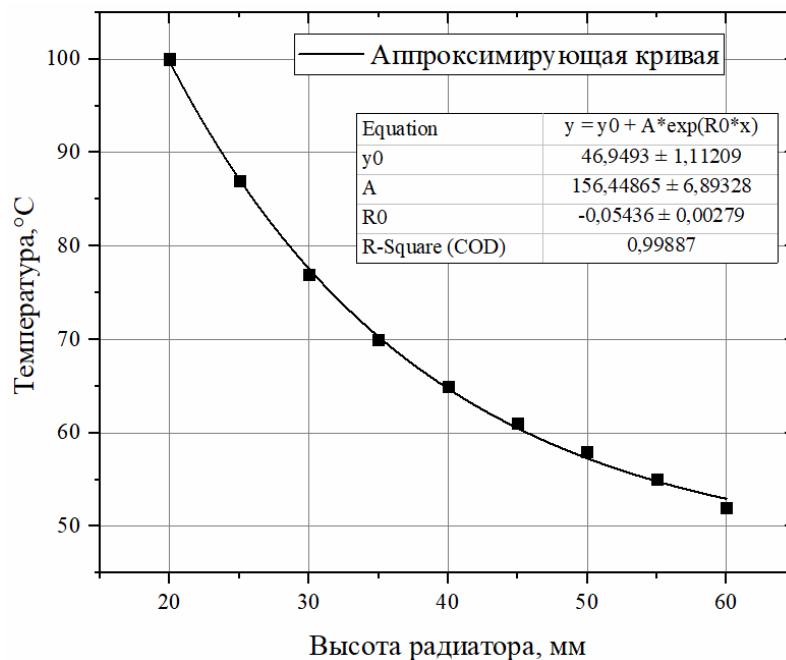


Рис. 2. Зависимость температуры нижней границы радиатора от его высоты

### Выводы

В работе представлен тепловой расчет радиатора охлаждения червячного редуктора. Расчет осуществлялся при помощи библиотеки с открытым исходным кодом *Gridap*, реализованной на языке *Julia*. Визуализация результатов расчета проводилась при помощи открытого графического пакет *ParaView*. В ходе расчета было получено, что температура нижней стенки радиатора составляет от 100 до 52 градуса при высоте ребер от 20 до 60 мм соответственно. На основании этих данных с применением аппроксимации экспоненциальной функцией было выяснено, что минимальная высота ребер радиатора в данном случае должна составлять 28 мм. Данная работа так же показывает применимость библиотеки *Gridap* для расчета методом конечных элементов без применения дорогостоящих многоцелевых пакетов программ.

### Список литературы

1. Bangerth W., Hartmann R., Kanschat G. deal. II—a general-purpose object-oriented finite element library // ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS). 2007, vol. 33, no. 4, p. 24-es.
2. Logg A., Wells G. N. DOLFIN: Automated finite element computing // ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS). 2010, vol. 37, no. 2, pp. 1-28.
3. Kuts M., Walker J., Newell P. Computational homogenization of linear elastic properties in porous non-woven fibrous materials // Mechanics of Materials. 2024, vol. 189, p. 104868.
4. Verdugo F., Badia S. The software design of Gridap: a finite element package based on the Julia JIT compiler // Computer Physics Communications. 2022, vol. 276, p. 108341.
5. Bezanson J., Edelman A., Karpinski S., Shah V.B. Julia: A fresh approach to numerical computing // SIAM review. 2017, vol. 59, no. 1, pp. 65-98.
6. Кикоин И.К. Таблицы физических величин. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
7. Ряховский О.А., Дунаев П.Ф., Леликов О.П. Конструирование узлов и деталей машин. – 13-е изд. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 564 с.

### Сведения об авторах:

*Городинов Владимир Дмитриевич* – студент;

*Толстиков Алексей Сергеевич* – студент;

*Куц Михаил Сергеевич* – к.т.н., доцент.

## МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ В ПРОЦЕССЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТОПОЛОГИЧЕСКИ ОПТИМИЗИРОВАННОЙ КОМПОЗИТНОЙ РАМЫ ГУСЕНИЧНОГО ДВИЖИТЕЛЯ

*Каплюхин А.Э., Бледнова Ж.М.*

*Кубанский государственный технологический университет, Краснодар*

**Ключевые слова:** гусеничный движитель, топологическая оптимизация, динамика, имитационная модель, податливая рама, машинное обучение.

**Аннотация.** Приведен результат исследования возможности применения методов и алгоритмов машинного обучения для проектируемой генерации топологически оптимизированных композитных конструкций, выполненных с использованием функциональных материалов с памятью формы, обеспечивающих адаптивность к эксплуатационным воздействиям, повышенным значениям напряжений и деформаций в их элементах. Для нивелирования эффекта динамического изменения схемы нагружения при генерировании топологически оптимизированных структур предложен способ выполнения расчетов путем интеграции в процессе генерирования модуля машинного обучения с алгоритмом вознаграждения функции оптимизации топологии в зависимости от расположения объекта в пространстве и относительно схемы его нагружения.

## MACHINE LEARNING IN THE DESIGN PROCESS OF A TOPOLOGICALLY OPTIMIZED COMPOSITE CRAWLER FRAME

*Kaplyukhin A.E., Blednova Zh.M.*

*Kuban State Technological University, Krasnodar*

**Keywords:** crawler propulsion, topological optimization, dynamics, simulation model, malleable frame, machine learning.

**Abstract.** The result of the study of the possibility of using machine learning methods and algorithms for the projected generation of topologically optimized composite structures made using functional materials with shape memory, providing adaptability to operational impacts, increased stress and strain values in their elements. To offset the effect of dynamic changes in the loading scheme when generating topologically optimized structures, a method for performing calculations is proposed by integrating a machine learning module with an algorithm for rewarding the topology optimization function depending on the location of the object in space and relative to its loading scheme.

**Введение.** Движители машин классифицируются по многим показателям, включающим их конструктивные различия. Типовая конструкция шасси с металлической гусеничной лентой обладает аналогичной конструкцией и принципами функционирования механизмов, что и гусеничные системы на резиноармированных гусеницах. В настоящее время рост потребности в увеличении производительности машин и, как следствие, их собственной массы привел индустрию к выводу, что гусеничные модули являются следующим этапом в эволюции приводных систем машин тяжелого класса, в частности зерноуборочных комбайнов [1]. В отличие от колесного шасси, гусеничные системы в процессе работы подвержены большим динамическим нагрузкам из-за отсутствия физического демпфера возмущений дорожного покрытия [2], в качестве которого выступает сжатый воздух. Для нивелирования этого фактора

авторами разработана новая конструкция гусенично-модульного устройства (ГМУ) [3], содержащая в конструкции упругий элемент, представляющий топологически оптимизированную раму.

С целью оптимизации массы рамы на этапе математического моделирования при статическом нагружении средствами современных пакетных приложений инженерного анализа выполнена топологическая оптимизация (ТО) конструкции, позволившая сократить массу рамы на 40% и сохранением участков, непосредственно влияющих на передачу силовых потоков в конструкции при обеспечении требуемой прочности. Этапы ТО приведены на (рис. 1).

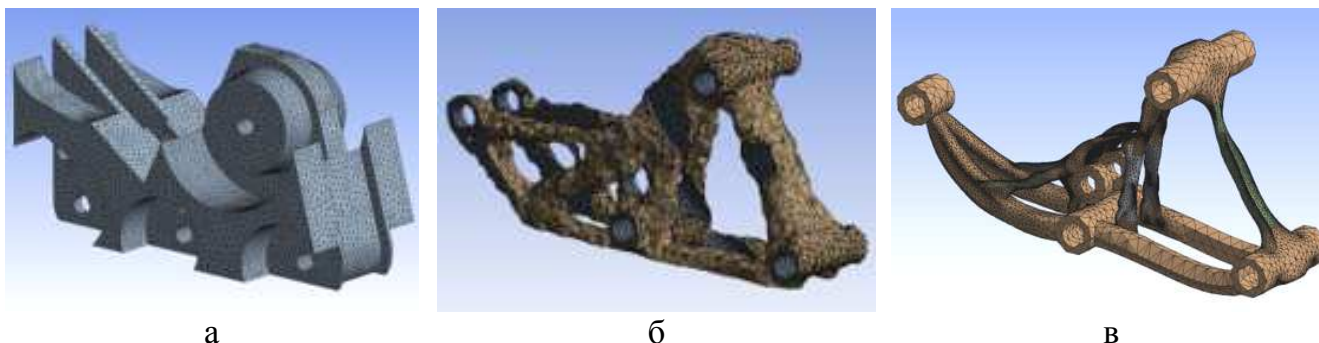


Рис. 1. Этапы топологической оптимизации рамы ГМУ: а) проектный объем рамы в устройстве, б) промежуточное решение задачи оптимизации топологии без учета применения специальных материалов, в) окончательный вид рамы с учетом применения специальных материалов

Полученная оптимизированная конструкция отражает решение задачи оптимизации для статической схемы нагружения, что в реально действующей конструкции может привести к разрушению при возникновении дополнительной динамической нагрузки или изменения пространственного положения изделия в процессе движения машины. Для учета возможных динамических нагрузок или компенсации изменения положения в пространстве предложен способ генерации ТО структуры посредством интеграции модуля машинного обучения (МО) в процесс проведения ТО. При этом, алгоритм МО в процессе расчета силовых потоков в материале использует нагрузки, регистрируемые при проведении симуляции движения объекта в режиме валидационных испытаний реальных машин.

Следующей задачей в работе, стал учет поведения структур композитов [4-6] при ТО, так как конструкционные материалы не способны обеспечивать надежность рамы при полученных в процессе симуляции значениях сил. Чтобы решить две эти задачи, потребовалось, во-первых, интегрировать в расчетный комплекс характеристики материала-композита, в свою очередь, полученных расчетом пакета прикладных программ инженерного анализа. Во-вторых, было предложено воспользоваться методами МО, а именно методом глубоко детерминированного градиента политики, в котором в качестве агента выступил элемент фиксации рамы, а условием оптимизации выступила функция стремления значений усилий на опорах друг к другу (к более равномерному

распределению усилий на опорах), имитационное моделирование производилось в пакете Matlab (рис. 2).

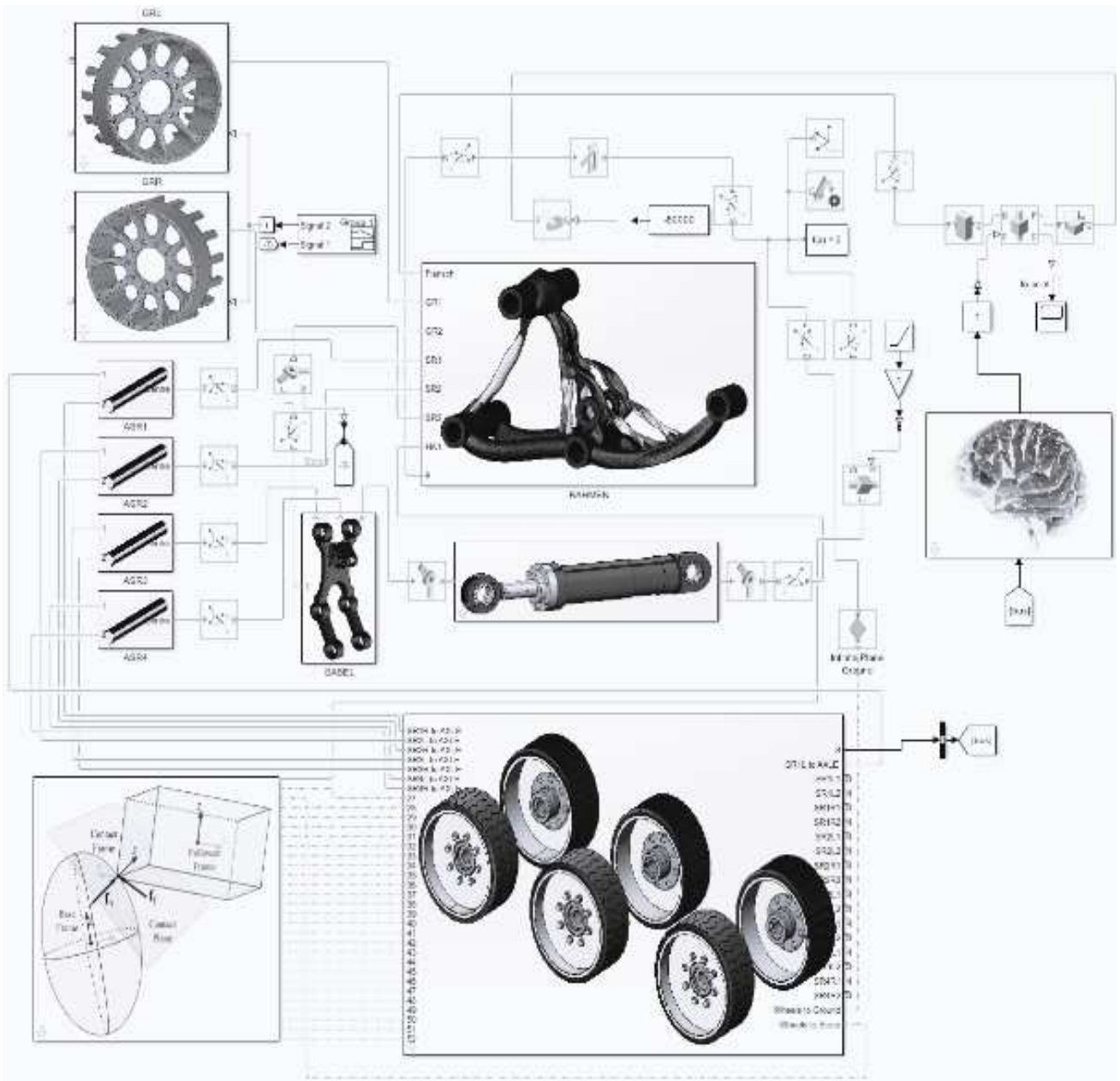


Рис. 2. Имитационное моделирование в Matlab, расчетная блок-схема имитационной модели ГМУ

Применение функционального материала-композита позволило сократить пиковые значения усилий на 10-15% относительно недеформируемой рамы (рис. 3), а алгоритм определения суперпозиции фланца рамы относительно его опор позволил произвести корректировки исходной структурной схемы устройства и её математической модели в области уточнения геометрического расположения деталей устройства.



Рис. 3. Имитационное моделирование в Matlab, значения динамических усилий в опорах устройства

**Вывод.** Реализация интеграции МО раскрывает широту в потребности исследования актуальной задачи разработки гусенично-модульного устройства в разных её аспектах, начиная от синтеза расчетных и структурных схем, завершая имитационным моделированием процесса движения ГМУ. Каждый из реализованных этапов моделирования подразумевает итерационный подход с целью уточнения параметров математической модели и ранее произведенных расчетов. По результатам работы были решены следующие задачи:

- произведен синтез топологически оптимальной конструкции рамы устройства с помощью пакетов прикладных программ инженерного анализа, учитывающий применение современных композиционных материалов;
- получены аналитические зависимости распределения нагрузки на катки и внесены поправки в исходные данные для моделирования на предыдущих этапах исследования;
- для уточнения топологически оптимизированной конструкции внедрен модуль машинного обучения в процесс генерации топологически оптимизированных структур.

#### Список литературы

1. Каплюхин А.Э. Пути развития альтернативных почвошарящих приводов машин тяжёлого класса // Сборник тезисов докладов участников пула научно-практических конференций. – Сочи: ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», 2020. – С. 30-32.
2. Димитриенко Ю.И. Механика сплошной среды: учеб. пособие: в 4 т. Т. 4: Основы механики твердых сред. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 623 с.

3. Патент №2773146 РФ. Гусенично-модульное устройство с регулировкой площади контакта гусеницы / А.Э. Каплюхин, Ж.М. Бледнова. – Заявка № 2021139964 от 30.12.2021; опубл. 31.05.2022.
4. Blednova Zh.M., Makhutov N.A., Rusinov P.O., Dmitrenko D.V., Balaev E.Yu. Analysis of the Efficiency of Functionally Oriented Composite Coatings Made of Materials with Thermoelastic Martensitic Transformations // Russian Metallurgy (Metally). 2021, no. 10, pp. 1224-1232. doi.org/10.1134/S0036029521100050 6.
5. Guida M., Sellitto A., Marulo F., Riccio A. Analysis of the impact dynamics of shape memory alloy hybrid composites for advanced applications // Materials. 2019, vol. 12, no. 1, p. 153. doi.org/10.3390/ma12010153.
6. Бледнова Ж.М. Каплюхин А.Э. Повышение ресурсоэффективности топологически оптимизированных элементов конструкции привода машин тяжелого класса формированием функционально ориентированных поверхностных композиций из сплавов с памятью формы // Материалы V Международной конференции «Сплавы с памятью формы» (СПФ-2023). – Санкт-Петербург: ООО «Издательство ВВМ», 2023. – С. 42.

Сведения об авторах:

*Каплюхин Антон Эдуардович* – аспирант;

*Бледнова Жесфина Михайловна* – д.т.н., профессор.



## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ПАРООБРАЗОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ МАСЕЛ SUPER V 20W-50 BP И LUMIX ATF-III-AVTOMATIC

*Саиджафаров Ф.А., Холиков М.С., Зоиров Х.А., Курбонов Б.М., Бадалов А.  
Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, Душанбе*

**Ключевые слова:** технические масла, парообразование, равновесие, барограмма, термодинамические характеристики.

**Аннотация.** Методом тензиметрии с мембранным нуль-манометром изучен процесс парообразования технических масел Super V 20W-50 bp и Lumix ATF-III-avtomatic в интервале температур 300-600 К в равновесных условиях. Равновесия в системе достигнуто при изотермической выдержки фигуративной точки в барограммах в течение 20-24 часов. Установлен многоступенчатый характер процесса, температурный интервал отдельных ступеней и определены их термодинамические брутто-характеристики.

## THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE PROCESS OF VAPORIZATION OF TECHNICAL OILS SUPER V 20W-50 BP AND LUMIX ATF-III-AUTOMATIC

*Saidjafarov F.A., Kholikov M.S., Zoirov H.A., Kurbonov B.M, Badalov A.  
Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, Dushanbe*

**Keywords:** technical oils, vaporization, equilibrium, barogram, thermodynamic characteristics.

**Abstract.** The process of vaporization of Super V 20W-50 bp and Lumix ATF-III-automatic industrial oils in the temperature range of 300-600 K under equilibrium conditions has been studied by tensimetry with a membrane zero-gauge. Equilibrium in the system was achieved by isothermal exposure of the figurative point in barograms for 20-24 hours. The multi-stage nature of the process, the temperature range of individual stages is established and their thermodynamic gross characteristics are determined.

В условиях высокогорий (свыше 800 до 3000 метров) эффективная эксплуатация дорогостоящей техники и механизмов затрудняется и подвергается интенсивному воздействию многочисленных отрицательных факторов, приводящих к потере их мощностей. К таким факторам можно отнести – загрязнение рабочих частей механизмов и машин, перегрев рабочих жидкостей, технических масел, смазочных материалов и насыщение их воздухом. В совокупности аритмичности режима работы и воздействия отрицательных факторов приводят к значительной пертурбации технических масел – от механического загрязнения вредными примесями до значительных химических изменений состава и строения в условиях высокогорий [1, 2].

В продолжение исследований [3-5], посвящённых процессу парообразования технических масел (ТМ) в данной работе приведены результаты исследования процесса парообразования технического масла марки Super V 20W-50 bp и Lumix ATF-III-avtomatic. Исследование проведено методом тензиметрии в интервале температур 300-600 К в равновесных условиях. Для достижения равновесия в системе каждая изотермическая точка на кривой зависимости



давления пара от температуры (барограмма) выдержана в течение 20-24 часов до достижения неизменности давления в течение двух часов. Барограммы процесса парообразования масел, полученные при прямом (нагреве) и обратном (охлаждение) ходах опыта не совпадают, даже при многократном увеличении времени выдержки, которое составляет более 70 часов.

Барограмма процесса парообразования ТМ имеет многоступенчатый характер в изученном температурном интервале. Барограмма процесса парообразования ТМ марки Super V 20W-50 br состоит из четырёх ступеней (рис. 1,а). Первая ступень протекает в интервале температур (300-370) К, вторая – (395-440) К, третья – (460-475) К и четвёртая – (483-515) К. Барограмма процесса парообразования ТМ марки Lumix ATF-ИД-автоматичес состоит из трёх ступеней (рис. 1,б). Первая ступень протекает в интервале температур (325-350) К, вторая – (430-470) К и третья – (478-525) К.

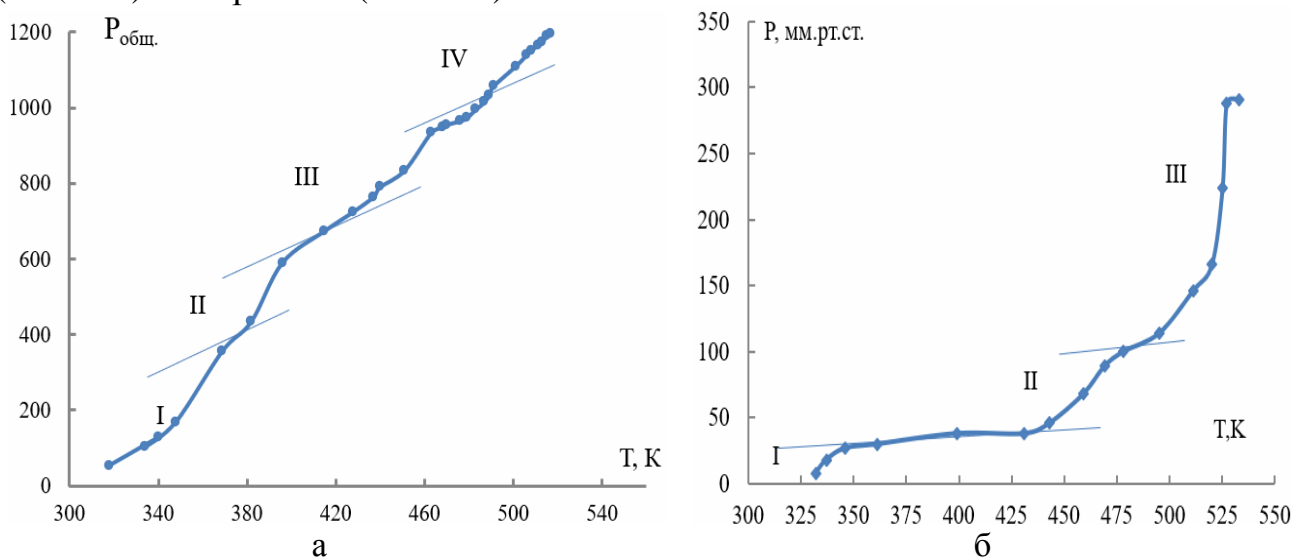


Рис. 1. Барограммы процесса парообразования ТМ марки Super V 20W-50 br (а) и Lumix ATF-ИД-автоматичес (б)

Экспериментальные данные, приведённые в виде зависимости  $LgP$  от обратной температуры ( $1/T \cdot 10^3$ ) (рис. 2) в изученном интервале температур 500-600 К состоит из прямых линий, которые соответствуют ступеням процесса парообразования масла. Давление пара последующих ступеней определено путём вычета из общего давления давлению предыдущих ступеней. Обработка данных для каждой ступени произведена по методу наименьших квадратов с использованием значения  $t$  – коэффициента Стьюдента при свыше 95% доверительном интервале по стандартной программе Microsoft Excel.

Полученные уравнения прямых линий позволили рассчитать термодинамические брутто-характеристики – энтальпию ( $\Delta H$ , кДж/моль), энтропию ( $\Delta S$ , Дж/моль·К) и энергию Гиббса ( $\Delta G_{298}^0$ ) всех ступеней процесса парообразования масел, которые приведены в таблице. При расчётах использовано значение давление пара, приведённое в атмосферах путём вычисления  $B = B' - 2,881$ .

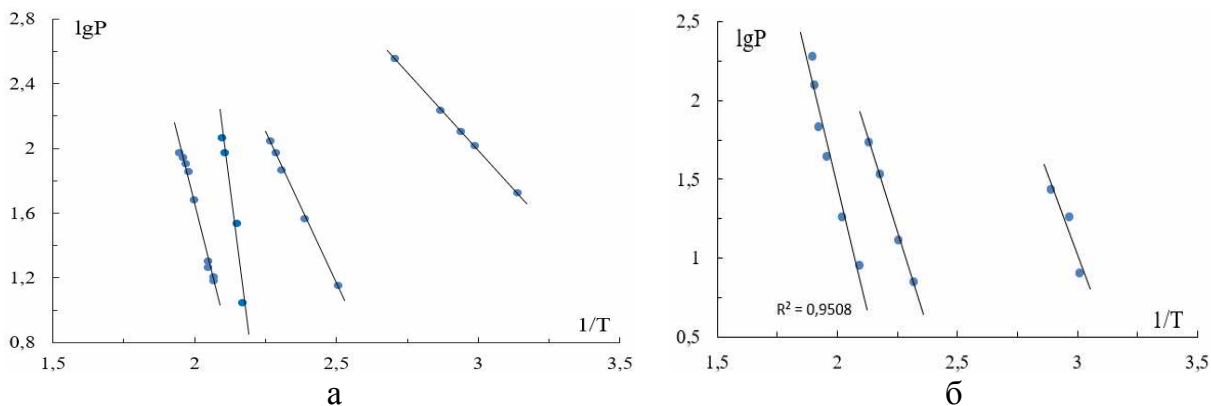


Рис. 2. Прямые линии зависимости  $LgP=f(1/T \cdot 10^3)$  ступеней процесса парообразования технических масел Super V 20W-50 bp (а) и Lumix ATF-III-automatic (б)

Табл. Коэффициенты уравнений барограмм и термодинамические брутто-характеристики ступеней процесса парообразования ТМ

ТМ	№ ступени	$\Delta T, K$	Уравнение барограммы $LgP_{(am)} = B - A \cdot 10^3/T$			Термодинамические брутто-характеристики		
			$A \pm 0,05$	$B \pm 0,09$	$R^2$	$\Delta H_T^o,$ кДж/моль	$\Delta S_T^o,$ Дж/моль К	$\Delta G^o,$ кДж/моль
Super V 20W-50 bp	I	300-370	1,65	4,09	1,00	$7,56 \pm 0,15$	$18,70 \pm 0,37$	$2,00 \pm 0,2$
	II	395-440	3,69	7,52	1,00	$17,50 \pm 0,19$	$47,60 \pm 0,41$	$3,3 \pm 0,2$
	III	460-475	13,80	28,30	0,96	$63,10 \pm 0,14$	$148,0 \pm 0,39$	$18,0 \pm 0,25$
	IV	485-510	$6,93 \pm 0,06$	$12,60 \pm 0,13$	0,99	$31,70 \pm 0,18$	$70,09 \pm 0,54$	$19,8 \pm 0,15$
Lumix ATFIII	I	325-350	4,11	10,46	0,89	$18,80 \pm 0,15$	$47,87 \pm 0,37$	$4,44 \pm 0,2$
	II	430-470	4,81	9,10	1,00	$21,98 \pm 0,19$	$41,64 \pm 0,41$	$9,49 \pm 0,2$
	III	478-525	6,41	11,40	0,95	$29,32 \pm 0,14$	$52,14 \pm 0,39$	$13,68 \pm 0,3$

**Список литературы**

1. Квагинидзе В.С., Квагинидзе В.С., Петров В.Ф., Корецкий В.Б. Эксплуатация карьерного оборудования. – М.: Мир горной техники, Изд. МГГУ «Горная книга», 2007. – 587 с.
2. Шарифов Д.А., Халилов И.Х., Юнусов М.Ю., Нажмутдинов Ш.З., Тошев М.А., Бадалов А. Исследование процесса парообразования моторного масла дизельных двигателей // Горные науки и технологии, сер. Горные машины, транспорт и машиностроение. – 2018. – №1. – С. 99-107.
3. Шарифов Д.А., Халилов И.Х., Юнусов М.Ю., Бадалов А. Термодинамические характеристики процесса испарения трансмиссионного масла марки ТЭП-15 // Политехнический Вестник: сер. Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2018. – №1(41). – С. 54-60.

Сведения об авторах:

Саиджафаров Фазлиддин Абдурозикович – соискатель;  
 Холиков Муслихиддин Салохиддинович – соискатель;  
 Зоиров Хусайн Абдурахмонович – к.х.н., доцент кафедры ОиНХ;  
 Курбонов Бадриддин Махмаджанович – соискатель;  
 Бадалов Абдулхайр – д.х.н., профессор кафедры ОиНХ.

УДК 622.685.001.7

## ПОВЫШЕНИЕ АДАПТИВНОСТИ СЕКЦИЙ КРЕПИ ОЧИСТНЫХ КОМПЛЕКСОВ К ПЕРЕМЕННЫМ УСЛОВИЯМ ЭКСПЛУАТАЦИИ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

*Теремецкая В.А.*

*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,  
Санкт-Петербург*

**Ключевые слова:** уголь, шахта, забой, горное давление, очистной комплекс, механизированная крепь, секция крепи, адаптивность.

**Аннотация.** Одним из основных способов подземной добычи угля является выемка очистными забоями с использованием механизированных комплексов. В состав комплекса входят выемочная машина, забойный конвейер и комплект секций передвижной механизированной крепи. Секции обеспечивают условия для эффективной и безопасной добычи угля в комплексно-механизированных очистных забоях. Из-за недостаточной приспособляемости секций к изменяющимся горно-геологическим условиям потенциальные возможности комплексов существенно выше фактических. Поэтому исследования состояния и развития свойств адаптивности секций механизированной крепи являются актуальными.

## INCREASING THE ADAPTABILITY OF THE SUPPORT SECTIONS OF TREATMENT PLANTS TO VARIABLE OPERATING CONDITIONS IN COAL MINES

*Teremetskaya V.A.*

*Saint-Petersburg Mining University of Empress Catherine II, Saint-Petersburg*

**Keywords:** coal, mine, face, rock pressure, treatment complex, mechanized support, support section, adaptability.

**Abstract.** One of the main methods of underground coal mining is excavation by treatment faces using mechanized complexes. The complex includes a dredging machine, a downhole conveyor and a set of sections of mobile mechanized support. The sections provide conditions for efficient and safe coal mining in complex mechanized treatment faces. Due to the insufficient adaptability of the sections to changing mining and geological conditions, the potential capabilities of the complexes are significantly higher than the actual ones. Therefore, studies of the state and development of the adaptability properties of sections of mechanized support are relevant.

Секции механизированной крепи поддерживают породы кровли, управляют горным давлением и ограждают рабочее пространство очистного забоя [1]. Эффективность работы секции и комплекса зависит от качественного выполнения данных операций. Но следует выделить и вспомогательные операции, выполняемые за один цикл. В них входят перемещение и позиционирование оборудования в очистном забое по мере подвигания забоя (рис. 1).

Для того, чтобы процесс взаимодействия секции крепи с кровлей был более качественный, необходимо развивать секции и снабжать их дополнительными устройствами для более устойчивого выполнения основных и вспомогательных операций [2].



Рис. 1. Структура выполняемых операций СМК за цикл

Основными факторами, определяющими диапазон изменений горно-геологических условий, влияющих на эффективность использования секции механизированной крепи и механизированных очистных комплексов в целом, являются [3]:

- отработка пластов в зонах повышенного горного давления и в зонах геологических нарушений;
- изменение толщины пласта в зонах геологических эрозий;
- зоны изменения состояния пород кровли, в частности её трещиноватости;
- изменения в структуре слоев: расщепление, линзовидные включения горных пород;
- изменения в структуре и характере пород непосредственной кровли;
- высокое содержание метана;
- образование куполов (сводов) в породах кровли и пр.

Из-за того, что горно-геологические условия могут изменяться в широком диапазоне, то необходимо, для сохранения номинальных возможностей очистного механизированного комплекса и их секций механизированной крепи, изменять их структуру и параметры, то есть приспособлять секции механизированной крепи к этим условиям. Степень развития данной приспособляемости характеризует уровень контактной адаптации секции механизированной крепи к этим условиям.

Рассматривая способы повышения адаптивности секции механизированной крепи, необходимо проанализировать их влияние по отдельности (контактное, кинематическое и динамическое), поскольку каждый конкретный метод может решать какую-то конкретную задачу, и их совместное действие, и комплексное проявление адаптивности [4].

Следовательно, адаптивность секций должна рассматриваться в нескольких ее типах: технологическая или функциональная, геометрическая, силовая (динамическая или статическая), кинематическая, контактная (рис. 2).



Рис. 2. Классификация адаптивностей

Наибольший эффект достигается за счет скоординированного повышения адаптивности различных видов.

#### Список литературы

1. Мешков А.А., Казанин О.И., Сидоренко А.А. Повышение эффективности технологии и организации монтажно-демонтажных работ при интенсивной разработке пологих угольных пластов на шахтах Кузбасса // Записки Горного института. – 2021. – Т. 249. – С. 342-350. – DOI: 10.31897/PMI.2021.3.3.
2. Коровкин Ю.А. Механизированные крепи очистных забоев / Под. ред. Ю.Л. Худина. – М.: Недра, 1990. – 412 с.
3. Gil J. Analiza Przepływów w Układach Ograniczających Ciśnienie Przestrzeni Roboczej Stojaka Hydraulicznego w Zmechanizowanej Obudowie Ścianowej. Ph.D. Thesis, AGH University of Science and Technology, Kraków, Poland, 2014.
4. Titov N.V., Turuk Yu.V., Vasiliev S.D. The influence of production processes on the condition of the roof in the treatment face // Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2010, no. 4, pp. 215-219.

#### Сведения об авторе:

*Теремецкая Василиса Александровна* – аспирант.

## ПРИЧИНЫ РАЗРУШЕНИЯ МУФТ ОБСАДНЫХ ТРУБ ДЛЯ БУРЕНИЯ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН

*Мамедов А.Т.<sup>1</sup>, Бабаев А.И.<sup>1</sup>, Исмаилов Н.Ш.<sup>2</sup>, Гусейнов М.Ч.<sup>1</sup>,  
Мусурзаева Б.Б.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Азербайджанский Технический Университет, Баку;*

<sup>2</sup>*Азербайджанская Государственная Морская Академия, Баку*

**Ключевые слова:** бурение, обсадная труба, скважина, дефекты, причина разрушения.

**Аннотация.** Рассматриваются причины разрушения обсадных труб из марки стали 50 в процессе бурения нефтяных скважин, меры и рекомендации для его предотвращения. Для выявления причин разрушения муфты обсадной трубы определены химический состав, твердость, исследована микроструктура, осуществлен визуально-измерительный контроль объектов исследований. Приведены виды дефектов, их характер и распространения в теле муфты. С помощью фрактограммы излома образцов установлено, что трещина на муфте продольная, имеет хрупкую природу металлургического характера, то есть закат глубиной ~3 мм. От края продольной трещины, обнаружено несколько закатов, расположенных под острым углом к наружной поверхности муфты.

## CAUSES OF DESTRUCTION OF CASING COUPLINGS FOR OIL DRILLING

*Mammadov A.T.<sup>1</sup>, Babaev A.I.<sup>1</sup>, Ismailov N.Sh.<sup>2</sup>, Guseinov M.Ch.<sup>1</sup>,  
Musurzaeva B.B.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Azerbaijan Technical University, Baku;*

<sup>2</sup>*Azerbaijan State Maritime Academy, Baku*

**Keywords:** drilling, casing, well, defects, cause of destruction.

**Abstract.** The reasons for the destruction of casing pipes made of steel grade 50 during the drilling of oil wells, measures and recommendations for its prevention are considered. To identify the causes of destruction of the casing coupling, the chemical composition was determined, the hardness and microstructure were studied, and visual measurement control of the research objects was carried out. The types of defects, their nature and distribution in the coupling are given. Using a fractogram of the samples' fracture, it was established that the crack on the coupling is longitudinal, has a brittle nature, of a metallurgical nature, that is, a slope with a depth of ~3 mm. From the edge of the longitudinal crack, several sunsets were discovered, located at an acute angle to the outer surface of the coupling.

В работе рассматривается природа дефектов на стальных трубах. Трубы были получены в реальных условиях «Baku Steel Company» выплавкой стали в электродуговой печи с непрерывной разливкой трубных заготовок на машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) и последующей контролируемой прокаткой.

**Целью данной работы** является анализ дефектов на муфтовых трубных сталях, предназначенных для бурения нефтяных скважин.

В качестве материала для обсадной трубы была использована сталь 50, которая по заводским данным содержала следующие элементы, масс. %: С 0,52; Si 0,28; Mn 0,77; Cr 0,13; Ni 0,115; Al < 0,05. Твердость образцов труб определяли на твердомере Роквелла по ГОСТУ 9013-59. Результаты замеров твердости муфты приведены в таблице 1.

Табл. 1. Результаты замеров твердости муфты

Марка стали	Место замера		HRB
Сталь 50	Торец заводской	Наружная сторона	96,7
		Середина	95,7
		Внутренняя сторона	94,8
	Середина	Наружная сторона	94,8
		Середина	95,8
		Внутренняя сторона	95,3
	Торец рабочий	Наружная сторона	96,0
		Середина	95,5
		Внутренняя сторона	95,2

Полученные результаты замеров твердости 95-97 HRB стали муфты условно соответствуют уровню прочности 690-750 МПа.

Исследование микроструктуры материала муфты проводилось на поперечном шлифе, вырезанном через предполагаемый очаг разрушения (рис. 1) и продольном микрошлифе на расстоянии ~ 10 мм от края продольной трещины.

Визуально-измерительный контроль объектов исследования проводился в помещении на лабораторном столе в соответствии с требованиями ГОСТ РЕН 13018-2014 и РД 03-606-03 с расстояния 200-600 мм под углом 45°-90°. Обзорный контроль осуществляли при освещенности 200 лк, местный – при 500-600 лк. Общее освещение обеспечивалось разрядными лампами, местное – лампами накаливания и разрядными лампами.

Непрямой визуальный контроль внешнего вида исследуемого объекта проводился с применением цифровых фотоаппаратов Canon EOS и Macro Lens, оснащенных объективом EF-S 60 мм 1:2:8 USM.

Измерение размеров исследуемых объектов и их элементов производилось с помощью линейки измерительной металлической 1000 мм и штангенциркуля цифрового 150-0,1 мм.

**Дефекты на муфте обсадной трубы.** На наружной поверхности муфты ( $\varnothing 168 \times 8,9$  мм) длиной 190 мм имеется сквозная трещина. Она представляет собой извилистый характер и распространяется в продольном направлении (рис. 1). Края трещины по всей длине разошлись ~5 мм, вследствие этого наружный диаметр разрушенной муфты составил – 190 мм.

Шевронный рисунок на поверхности излома указывает, что хрупкая продольная трещина распространялась со стороны рабочего соединения, от торца противоположного маркировке. В области предполагаемого очага зарождения хрупкой трещины обнаружен раскрывшейся дефект металлургического характера – закат глубиной ~ 3 мм (рис. 2).

**Результаты металлографического исследования.** Рассматривая микроструктуру муфты обсадной трубы можно видеть, что материал имеет крупнозернистую структуру с размером зерна до 250 мкм, что соответствует 1 номеру ГОСТ 5639-82 со сплошной ферритной сеткой по границам зерен.

Предполагаемые очаги разрушения на поперечном и продольном микрошлифах представлены соответственно на рисунке 3 при разных



увеличениях. Следовательно, материал с такой структурой склонен к хрупкому разрушению под воздействием динамических нагрузок [1, 2].



Рис. 1. Разрушенная муфта обсадной трубы  $\varnothing 168 \times 8,9$  мм со сквозной продольной трещиной

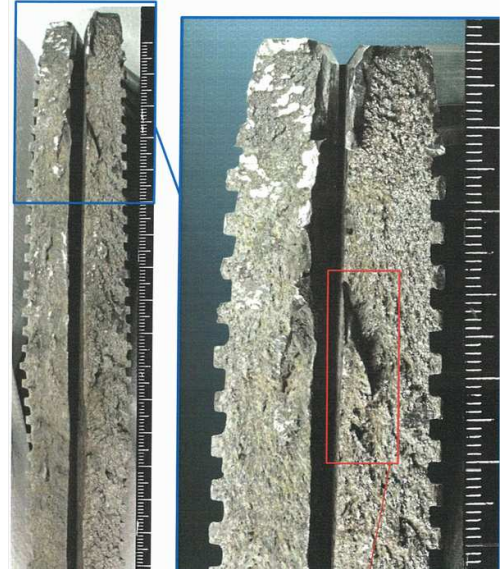
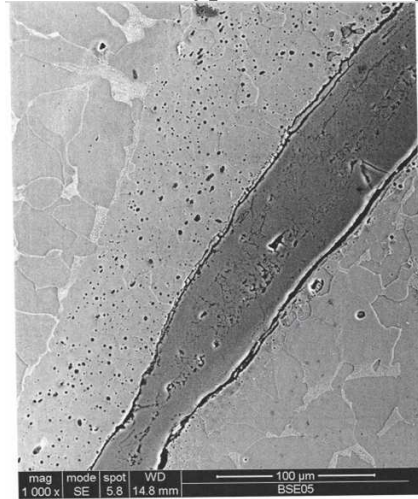


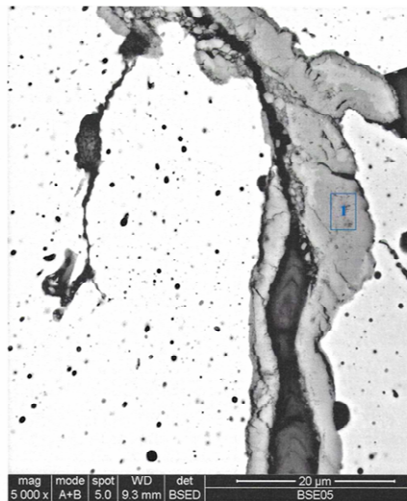
Рис. 2. Вид раскрывшегося дефекта металлургического характера



а



б



Точка замера	Element Wt%		
	СК	ОК	FeK
1	03,43	21,56	75,01

в

Рис. 3. Микроструктура материала муфты: а – в области заката; б – прокатная окалина между краями заката; в – состав прокатной окислы



Поверхность дефекта, раскрывшегося по краю хрупкой трещиной, имеет сглаженный вид и покрыта тонким слоем хрупких высокотемпературных оксидов, что характерно для металлургических закатов, образующихся в процессе горячей прокатки.

Исходя из анализа дефекты разрушенной при работе муфты можно заключить что материал муфты обсадной трубы  $\varnothing 168 \times 8,9$  мм класса «Е» ОТТМ соответствует марки стали 50 ГОСТ 1050-2013, а по содержанию серы и фосфора отвечает требованиям ГОСТ 632-80, шаг резьбы, высота угол профиля резьбы, соответствует требованиям ГОСТ 632-80. Со стороны рабочего соединения в области предполагаемого очага разрушения продольной сквозной хрупкой трещины обнаружен не допустимый ГОСТ 632-80 металлургический дефект «закат» глубиной до 3 мм. На наружной поверхности муфты со стороны рабочей части обнаружено еще несколько не допустимых ГОСТ 632-80 металлургических дефектов «закаты» глубиной до 3 мм.

### **Меры для предотвращения аналогичных дефектов**

При производстве стали для труб ответственного назначения, в которой должно быть низкое содержание оксидных включений и серы, раскисление необходимо осуществить в присутствии восстановительного шлака. Этот период надо начинать созданием известкового шлака после скачивания шлака окислительного периода [3, 4].

Для окислительного раскисления металла при выпуске в ковш нужно вводить алюминий в количестве до 1 кг на 1 т стали. Весьма важное значение имеет внепечная обработка стали, так как операции раскисления и легирования металла также, чаще осуществляют в ковше при выпуске металла из печи или на установках внепечной обработки [5]. Однако ковшовая обработка предусматривает наличие необходимого свободного пространства ковша.

Во всех случаях внепечной обработки необходимо предусмотреть интенсивные перемешивание металла либо инертным газом (аргон), либо электромагнитом.

**Выводы.** Проведенные исследования позволили установить причины образования дефектов сталеплавильной природы, а также предложить рекомендации по их минимизации или полному устранению.

**Финансирование.** Данная работа выполнена при финансовой поддержке фонда Науки Азербайджана – Грант № АЕФ-МСГ- 2023-1(43)-13/01/1-М-01.

### **Список литературы**

1. Мамедов А.Т., Бабаев А.И., Исмаилов Н.Ш., Гусейнов М.Ч., Гулиев Ф.Т. Освоение производство горячедеформированных обсадных труб из марки стали 32Г2 в условиях ООО “Baku Steel Company” // Вестник Азербайджанской Инженерной Академии. – 2022. – Cild 14. – №4. – С. 48-55.
2. Мамедов А.Т., Исмаилов Н.Ш., Гусейнов М.Ч., Гулиев Ф.Т. Опыт производства горячекатанных труб для нефтегазовой промышленности с применением операции нормализации. // Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация: Материалы международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2022. – №6. – С. 43-47.

3. Мамедов А.Т., Исмаилов Н.Ш., Гусейнов М.Ч., Гулиев Ф.Т. Основные виды дефектов при термической обработке труб для нефтегазовой промышленности и способы их устранения // Сборник статей XV Всероссийской научно-практической конференции. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2022. – С. 26-29.
4. Мамедов А.Т., Исмаилов Н.Ш., Гусейнов М.Ч., Гулиев Ф.Т. Особенности получения труб с заданными свойствами для нефтегазовой промышленности // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2022. – Т. 78, №3. – С. 257-263.
5. Величко А.Г., Рахманов С.Р., Бабанлы М.Б., Мамедов А.Т., Байрамов А.Т. Внепечная обработка при производстве высококачественных сталей. Монография. – Баку: НМетАУ и АГУНП, 2021. – 467 с.

Сведения об авторах:

*Мамедов Ариф Тандыг оглы* – д.т.н., профессор профессор-советник кафедры «Металлургия и технология материалов»;

*Бабаев Агиль Иса оглы* – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Металлургия и технология материалов»;

*Исмаилов Низами Шайы оглы* – д.т.н., профессор кафедры «Судостроение и судоремонт»;

*Гусейнов Мухтар Черкез оглы* – к.т.н., доцент кафедры «Металлургия и технология материалов»;

*Мусурзаева Батура Бейбала кызы* – старший преподаватель кафедры «Металлургия и технология материалов».

УДК 519.677

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕШИВАНИЯ РАСПЛАВА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ УНРС ПРИ ПРИНУДИТЕЛЬНО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ РУБАШКЕ С ВЕРТИКАЛЬНЫМИ РЕБРАМИ

*Дмитриев Э.А., Карпенко В.А.*

*Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре*

**Ключевые слова:** кристаллизатор, жидкий металл, потоки расплава, математическая модель, численная схема, скорость течения.

**Аннотация.** Предложена новая технология процесса заполнения кристаллизатора установки непрерывной разливки стали жидким металлом и его перемешивания. В работе применяется математическое моделирование численным методом. Представлены основные результаты исследований течения расплава в объеме кристаллизатора. Для моделирования процессов, протекающих при течении металла в кристаллизаторе, авторы используют специально созданный программный комплекс. В основе теоретических расчетов лежат основополагающие уравнения гидродинамики, уравнения математической физики и апробированный численный метод. Результат решения – поля скоростей и температур потока металла в объеме кристаллизатора. По разработанным численным схемам и алгоритмам составлена программа расчета.

## NUMERICAL SIMULATION OF THE MELT MIXING PROCESS IN THE UNRS CRYSTALLIZER WITH A FORCIBLY ROTATING JACKET WITH VERTICAL RIBS

*Dmitriev E.A., Karpenko V.A.*

*Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur*

**Keywords:** crystallizer, liquid metal, melt flows, mathematical model, numerical scheme, flow velocity.

**Abstract.** A new technology has been proposed for the process of filling the crystallizer of a continuous casting steel casting plant with liquid metal and mixing it. The work uses mathematical modeling using the numerical method. The main results of studies of melt flow in the volume of the crystallizer are presented. To simulate the processes occurring during the flow of metal in a crystallizer, the authors use a specially created software package. The theoretical calculations are based on the fundamental equations of hydrodynamics, equations of mathematical physics and a proven numerical method. The result of the solution is the velocity and temperature fields of the metal flow in the volume of the mold. Based on the developed numerical schemes and algorithms, a calculation program was compiled.

### **Введение**

Все больший интерес среди исследователей и производителей проявляется к разработке новых и совершенствованию существующих способов подачи и перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе установки непрерывной разливки стали (УНРС) и машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), а также устройств для их осуществления.

Однако очень мало работ посвящено математическому моделированию этих процессов (особенно численными методами), что ограничивает возможности

проектирования новых технологий подачи и перемешивания жидкого металла в УНРС и МНЛЗ.

Таким образом, актуальной задачей остается разработка новых процессов по подаче и перемешиванию расплава в кристаллизаторе и их математическое моделирование, позволяющее еще на стадии разработки и проектирования новых устройств предсказать их работоспособность и эффективность.

Целью настоящей работы является построение математической модели, описывающей гидродинамические процессы в кристаллизаторе УНРС при использовании нового предложенного способа подвода стали в кристаллизатор, а также обоснование полезности применения принудительного вращения для подачи и перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе УНРС по сравнению со свободным вращением стакана при разливке стали.

В настоящей работе описывается и анализируется новый процесс подачи и перемешивания жидкой стали в кристаллизаторе установки непрерывной разливки стали [1]. Рассматриваемый процесс, в отличие от описанных ранее [2, 3], позволяет в широких диапазонах регулировать скорость перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе УНРС, что способствует получению более качественного непрерывного слитка.

### Инженерная и математическая постановка задачи

На рисунке 1 представлена схема устройства для такого процесса.

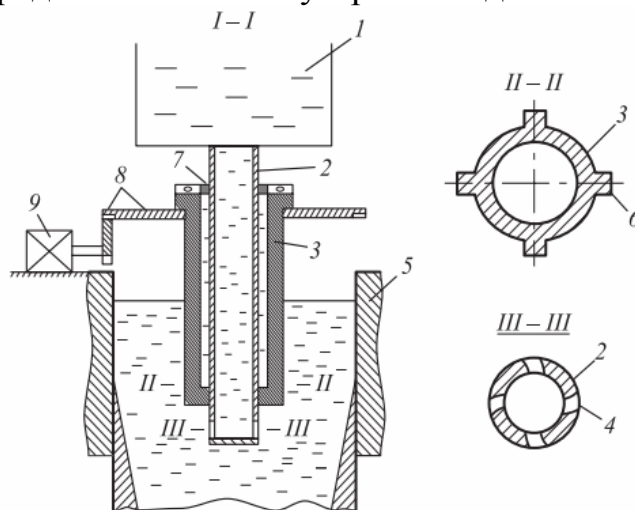


Рис. 1. Схема устройства для подачи и перемешивания стали в кристаллизаторе с вращающейся рубашкой с вертикальными ребрами

Из ковша 1 металл через глуходонный стакан 2 поступает в кристаллизатор 5. Глуходонный стакан 2 имеет эксцентрично расположенные отверстия 4. По наружной поверхности глуходонного стакана выше его выходных отверстий установлена с зазором огнеупорная рубашка 3, имеющая ребра 6. Рубашка соединена с механизмом вращения, состоящим из упорного подшипника 7, редуктора 8 и электродвигателя 9.

Рассматриваемый процесс не стационарный (квазистационарный). При математическом описании процесса были приняты допущения (формализация). Глуходонный стакан в сечении выпуска и вращающаяся огнеупорная рубашка имеют одинаковое внешнее квадратное сечение, поэтому огнеупорная рубашка

при вращении будет перемешивать жидкий металл в кристаллизаторе также и своими гранями. При заданном направлении вращения одна половина грани квадрата огнеупорной рубашки как бы выталкивает жидкий металл от себя, а вторая – втягивает. В этом случае можно считать погружной стакан неподвижным, а через грани рубашки втекает и вытекает металл со скоростями, пропорциональными скоростям вращения и геометрическим размерам квадратного сечения этой огнеупорной рубашки. Такая идеализация позволяет рассматривать данный процесс как стационарный. Кроме того, не учитывают появляющуюся на гранях кристаллизатора корочку затвердевшего металла.

Среда (жидкий металл) считается несжимаемой. Рассмотрим уравнения гидродинамики. Для течения ньютоновской вязкой несжимаемой жидкости справедливы следующие уравнения (процесс стационарный):

$$\sigma_{ij,j} + F_i^* = I_i^*; \quad I_i^* = \rho(\dot{v}_i + v_k \frac{\partial v_i}{\partial v_k}); \quad (1)$$

$$\sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} = 2\mu \xi_{ij}; \quad \xi_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}); \quad (2)$$

$$v_{i,i} = 0; \quad i = 1, 2, 3;$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \Delta \theta; \quad \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = v_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i}; \quad i = 1, 2, 3; \quad (3)$$

здесь  $\sigma_{ij}$  – компоненты тензора напряжений;  $\xi_{ij}$  – компоненты тензора скоростей деформаций;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $p$  – давление в данной точке ( $p = -\sigma$ );  $\sigma$  – гидростатическое напряжение;  $\mu$  – коэффициент вязкости ( $г \cdot с$ )/ $см^2$ ;  $v_i$  – проекция скоростей перемещений по координатным осям  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ );  $\rho$  – плотность жидкого металла;  $F_i^*$  – проекция удельной объемной силы на координатные оси  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ );  $\tau$  – время;  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $\theta$  – температура;  $a = \lambda / (c \cdot \gamma)$  – температуропроводность;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $c$  – удельная теплоемкость;  $\gamma$  – плотность; (все они принимаются постоянными (константами)). Для стационарного процесса:

$$\dot{v}_i = \frac{\partial v_i}{\partial \tau} = 0.$$

На рисунке 2 представлена расчетная схема рассматриваемого процесса. Граничные условия задачи следующие (рис. 2):

$$\sigma_{11} |_{\Gamma_2} = p_1; \quad (\sigma_{12} = \sigma_{13}) |_{\Gamma_i} = 0; \quad i = 1 \div 3;$$

$$(\sigma_{21} = \sigma_{23}) |_{\Gamma_i} = 0; \quad i = 5 \div 8; \quad (\sigma_{31} = \sigma_{32}) |_{\Gamma_i} = 0; \quad i = 9 \div 11;$$

$$(\sigma_{21} = \sigma_{23}) |_{\Gamma'_8} = 0;$$

$$v_2 |_{\Gamma_5} = v^*; \quad v_3 |_{\Gamma''_8} = V_t; \quad v_2 |_{\Gamma'_8} = V_t; \quad v_1 |_{\Gamma_1} = v_u; \quad (4)$$

$$v_1 |_{\Gamma_3} = 0; \quad v_2 |_{\Gamma_i} = 0; \quad i = 6 \div 8; \quad v_3 |_{\Gamma_i} = 0; \quad i = 9 \div 11;$$

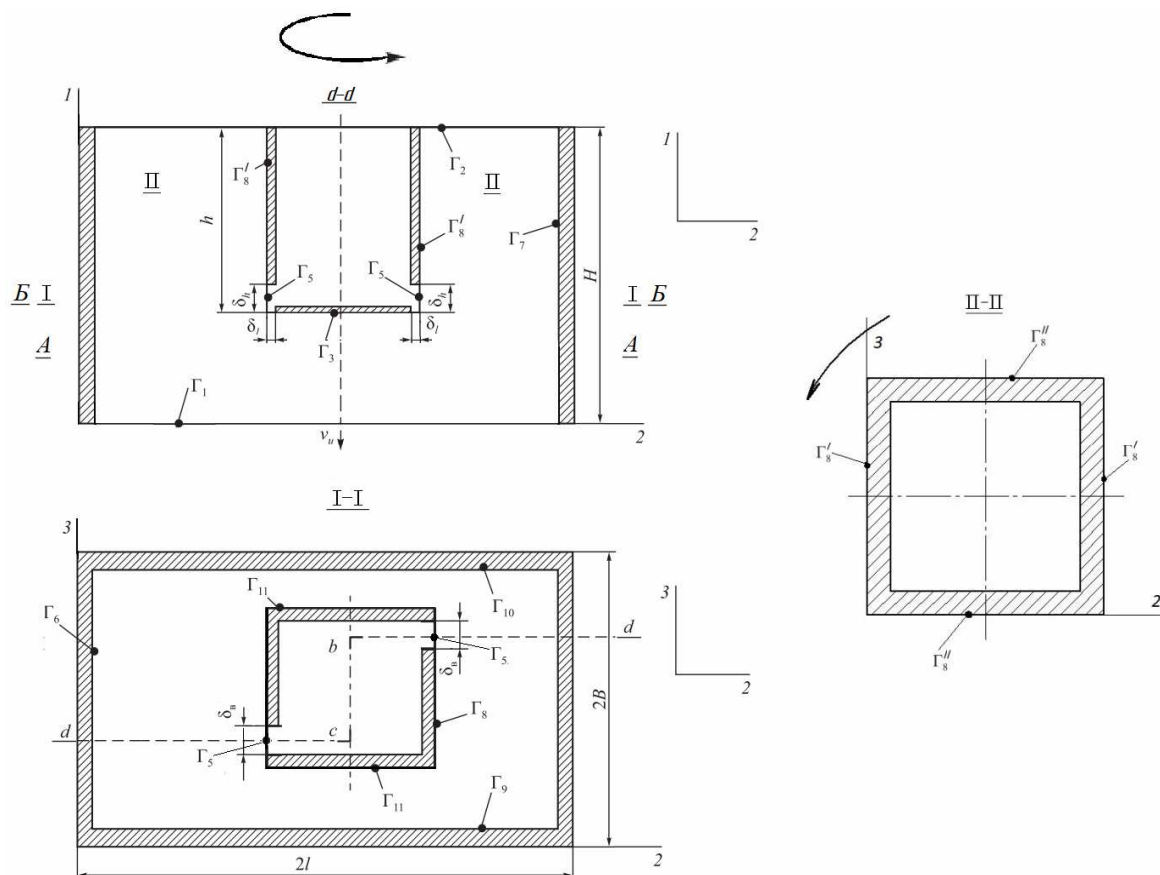


Рис. 2. Формализованная расчетная схема процесса разливки металла в кристаллизатор

При решении уравнения теплопроводности использовались граничные условия:

$$\begin{aligned} \theta|_{\Gamma_i} &= \theta_i^*; \quad i = 1 \div 4, 8; \quad \theta|_{\Gamma_5} = \theta_5^*; \\ q|_{\Gamma_i} &= q_i^*; \quad i = 6, 7, 9, 10; \end{aligned} \quad (5)$$

здесь  $v_u$  – скорость вытягивания слитка (рис. 2);  $v_2^*$  – скорость выхода жидкого металла из окон погружного стакана;  $\theta_i^*$  – заданные функции распределения температуры металла на поверхностях  $\Gamma_i$ ;  $q_i^*$  – заданные из экспериментальных данных тепловые потоки через поверхности  $\Gamma_i$ ;  $\theta_5^*$  – заданная температура выхода металла из окна  $\Gamma_5$ .

Численная схема и алгоритм решения системы уравнений (1)-(3) при граничных условиях (4, 5) подробно описан в работе [4] с использованием широко апробированного численного метода [5].

### Результаты численного расчета

На рисунке 3 показаны векторные потоки металла в горизонтальном сечении А-А при скорости вращения рубашки  $n$ , равном 30 и 50 об/мин. Векторные потоки мало чем отличаются как по характеру движения, так и по скорости.

Для величины  $n=50$  об/мин на рисунке 4 приведены потоки металла в горизонтальном сечении погружного стакана по выходным окнам (сечение Б – Б).

Наблюдаем тот же характер течения металла, что и в сечении А – А (рис. 3), но более интенсивной величины.

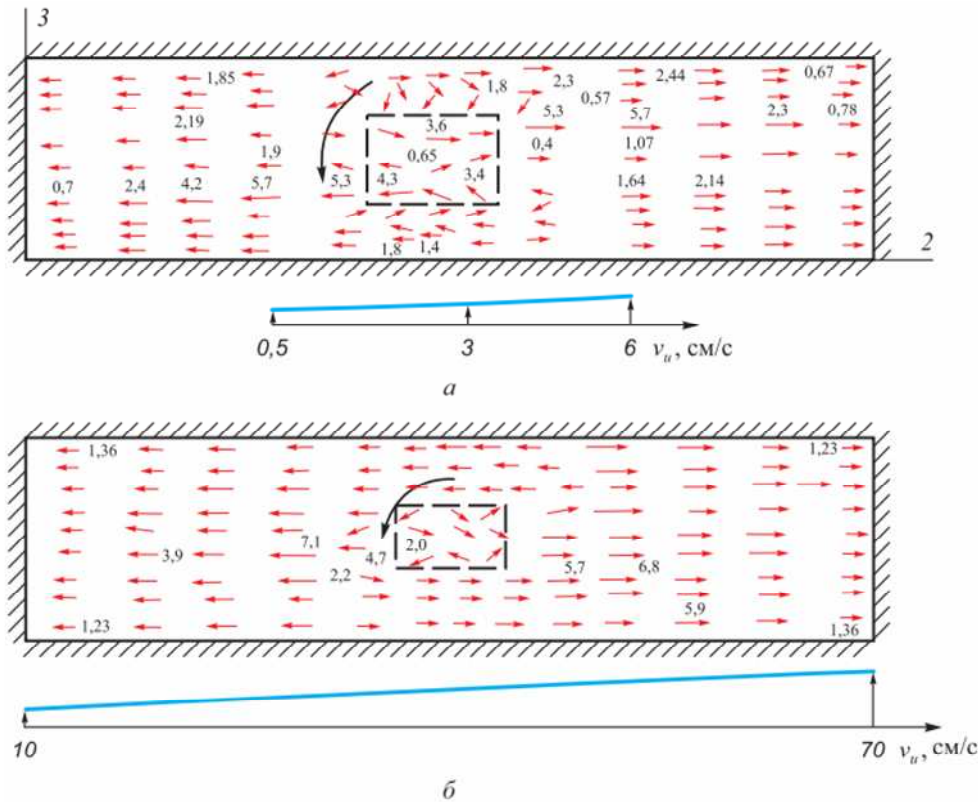


Рис. 3/ Поле скоростей потоков течения металла в кристаллизаторе в сечении А-А при  $n = 30$  (а) и 50 об/мин (б)

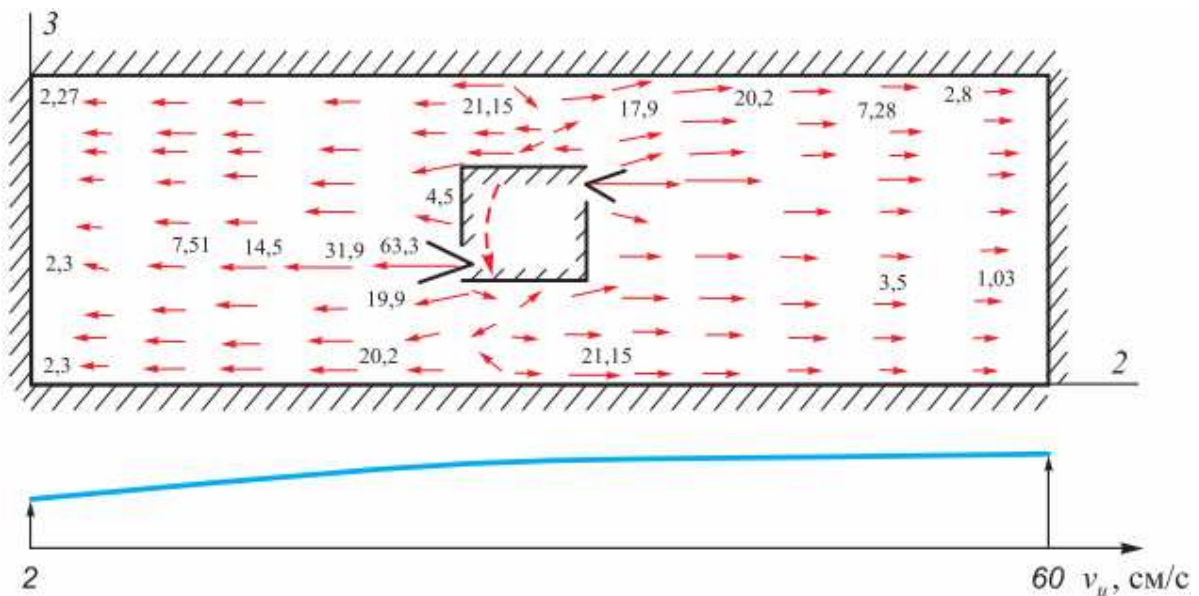


Рис. 4. Поле скоростей потоков течения металла в кристаллизаторе в сечении Б-Б при  $n = 50$  об/мин

### Выводы

Полученные численные результаты теоретического исследования показали, что при принудительном перемешивании жидкого металла в кристаллизаторе прямоугольного сечения происходит интенсивное омывание стенок кристаллизатора, что безусловно способствует отводу тепла от жидкого металла к стенкам кристаллизатора; внутри кристаллизатора, особенно в верхней его части

наблюдается ускоренное движение потоков жидкого металла; на узких стенках кристаллизатора наблюдается заброс жидкого металла (даже при  $n = 30$  об/мин) в область шлаковой рубашки, что может привести к попаданию части шлака в непрерывно-литой слиток. Чтобы избежать этого явления, можно продвинуть погружной стакан вместе с вращающейся рубашкой глубже в кристаллизатор, что возможно при увеличении высоты кристаллизатора.

**Благодарность.** В работе участвовали д.т.н., профессор В.И. Одинокоев, д.т.н., профессор А.И. Евстигнеев.

#### **Список литературы**

1. Патент №2764446 РФ. Устройство для подачи и перемешивания стали в кристаллизаторе установки непрерывной разливки / В.И. Одинокоев, А.И. Евстигнеев, Э.А. Дмитриев, А.Ю. Александров, В.А. Карпенко. Заявка № от 20.05.2021; опубл. 17.01.2022, Бюл. № 2.
2. Одинокоев В.И., Дмитриев Э.А., Евстигнеев А.И., Кузнецов С.А., Горнаков А.И. Совершенствование устройств по заполнению кристаллизатора УНРС жидким металлом // *Металлург.* – 2021. – №4. – С. 33-35.
3. Одинокоев В.И., Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А., Александров С.Ю., Карпенко В.А. Совершенствование устройств для подачи и перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе установки непрерывного литья стали // *Заготовительные производства в машиностроении.* – 2022. – №20(3). – С. 99-103.
4. Одинокоев В.И., Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А., Карпенко В.А. Моделирование нового процесса перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе установки непрерывной разливки при вращающейся рубашке с вертикальными ребрами // *Черная металлургия.* – 2023. – №6. – С. 733-742.
5. Одинокоев В.И., Каплунов Б.Г., Песков А.В., Баков А.В. Математическое моделирование сложных технологических процессов. – М.: Наука, 2008. – 176 с.

#### Сведения об авторах:

*Дмитриев Эдуард Анатольевич* – д.т.н., профессор, ректор;

*Карпенко Владимир Анатольевич* – соискатель.



## К ВОПРОСУ ВЫБОРА ДЕФОРМИРУЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ВОЛОЧЕНИЯ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛЬНОЙ КАНАТНОЙ ПРОВОЛОКИ

*Зайнуллин А.И., Харитонов В.А.*

*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,  
Магнитогорск*

**Ключевые слова:** стальные канаты, проволока, напряженно-деформированное состояние, волочение, монолитная волока, сдвоенная волока, роликковое волочение, модульно-комбинированное волочение.

**Аннотация.** Качественные характеристики стальных канатов напрямую зависят от качества проволок, составляющих конструкцию каната. В этом отношении одним из основных качественных показателей канатной проволоки является ее напряженно-деформированное состояние (НДС), которое формируется на всех технологических переделах. Однако наиболее важным процессом в части формирования НДС проволоки, несомненно, остается волочение. На сегодняшний день, традиционным считается волочение в одинарных монолитных волоках, которое сопряжено со значительными трудностями в части эффективного управления НДС проволоки и нейтрализации остаточных напряжений в ней. Данный вопрос требует принципиального внимания в части разработки новых видов деформирующих инструментов, применение которых теоретически помогли бы эффективно управлять НДС канатной проволоки. Среди таких деформирующих инструментов выделяют сдвоенные волоки, роликковые волоки, роликковые и монолитные волоки, составляющие модуль (модульно-комбинированное волочение). При всех положительных сторонах волочения с применением приведенных выше инструментов, наиболее эффективным, и в экономическом, и технологическом плане, является модульно-комбинированное волочение, которое помимо снижения затрат на производство, обеспечивает более полную проработку сечения проволоки, однородность деформации, что значительно снижает доли остаточных напряжений в проволоке, тем самым улучшая условия ее напряженно-деформированного состояния.

## ON THE ISSUE OF CHOOSING A DEFORMING TOOL FOR DRAWING HIGH CARBON STEEL ROPE WIRE

*Zainullin A.I., Kharitonov V.A.*

*Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk*

**Keywords:** steel ropes, wire, stress-strain state, drawing, monolithic fiber, double fiber, roller drawing, modular-combined drawing.

**Abstract.** The quality characteristics of steel ropes are directly related to the quality of the wires that make up the rope structure. In this regard, one of the main quality indicators of wire rope is its stress-strain state, which is formed at all technological stages. However, the most important process for the formation of the stress-strain state of the wire is undoubtedly drawing. Today, the traditional drawing in single monolithic fibers is considered to be drawing, which is associated with significant difficulties in terms of effective control of the stress-strain state of the wire and neutralization of residual stresses in it. This issue requires fundamental attention in terms of the development of new types of deforming tools, among which there are double fibers, roller fibers, roller and monolithic fibers that make up the module (modular-combined drawing). With all the positive sides of drawing with the use of the above tools, the most effective, both in economic and technological terms, is modular-combined drawing, which in addition to reducing production costs, provides a more complete study of cross-section of the wire, which significantly reduces the proportion of residual stresses in the wire, thereby improving the conditions of non-stress strain state.

Стальные канаты являются одним из самых важных видов металлопродукции метизного передела черной металлургии и применяются в больших объемах в основополагающих экономику Российской Федерации видах промышленности, в связи с чем повышение их конкурентоспособности, определяемой рациональным соотношением качества и цены, является сегодня актуальной задачей. Показатели качества канатов (механические и эксплуатационные свойства: работоспособность, коррозионная и релаксационная стойкости) определяются химическим составом стали и структурой заготовки (катанки), а также напряженно-деформированным состоянием проволок в канате.

Упругопластические деформации изгиба, скручивания и растяжения, возникающие в процессе свивки каната, обуславливают формирование в повивочной проволоке свивочных напряжений, которые значительно снижают ее прочностные и пластические свойства, приводят к эффекту упругой отдачи и тенденции свитой пряжи к раскручиванию, что приводит к значительному снижению эксплуатационных показателей каната. Для снижения негативного воздействия остаточных напряжений в прядях и в канатах, применяют различные технологические инструменты, к которым относят преформирующие устройства, обжимные плашки, рихтовальные устройства, устанавливаемые в линии прядевьющих и канатовьющих машин. Не менее важна и правильная регулировка натяжения проволок (прядей) на прядевьющих и канатовьющих машинах. Однако применение перечисленных выше операций не всегда помогает эффективно нейтрализовать свивочные напряжения, что обуславливается напряженно-деформированным состоянием (НДС) повивочных проволок после волочения, составляющих конструкцию каната. Даже небольшая доля остаточных напряжений в проволоке напрямую влияет на качество готового изделия. Поэтому каждый технологический передел канатной проволоки требует большого внимания в части эффективного управления ее напряженно-деформированным состоянием, снижением доли остаточных напряжений в проволоке.

В области изучения остаточных напряжений, возникающих в проволоке при волочении, проведено много обстоятельных исследований. На величину и характер распределения остаточных напряжений по поперечному сечению стальной проволоки оказывают влияние: подготовка поверхности металла к волочению, величина суммарного обжатия, угол рабочей зоны волоки, содержание углерода в стали, величина единичных обжатий при постоянном суммарном обжатии, способ патентирования и конструктивные особенности оборудования [1].

Для производства канатной проволоки применяют в основном высокоуглеродистые марки стали. Технологический процесс ее производства хорошо изучен и традиционно включает в себя следующие процессы: патентирование, подготовка поверхности заготовки к волочению, сам процесс волочения. Патентирование применяют для получения в заготовке равномерной мелкодисперсной структуры, обеспечивающей наиболее благоприятное сочетание высоких показателей прочности и пластичности. Процесс подготовки поверхности катанки к волочению заключается не только в удалении с нее

окалины, образовавшейся после горячей прокатки, но и в нанесении подмазочного слоя. Несомненно, каждая из перечисленных операций влияет на напряженно-деформированное состояние готовой проволоки, однако наиболее важным процессом, в котором закладываются исходные свойства и НДС проволоки является процесс волочения. Необходимо также отметить, что волочение остается единственной технологической операцией, в которой теоретически можно эффективно повлиять на снижение остаточных напряжений в проволоке. Однако практически, традиционный на сегодняшний день процесс волочения с применением одинарных монолитных волок сопряжен с крайне нестабильным напряженно-деформированным состоянием протянутой проволоки. Данная проблема возникает по причине неравномерной пластической деформации по сечению обрабатываемого металла: одни слои растягиваются в большей степени, чем другие, и после разгрузки в них возникают остаточные напряжения сжатия, в других – менее деформируемых слоях – возникают растягивающие остаточные напряжения. Также при описываемом виде волочения велико влияние неравномерного распределения температуры по сечению, что при различных удельных объемах ведет к возникновению высокой доли остаточных напряжений [2]. Решить эту проблему поможет разработка и исследование альтернативных видов инструментов для холодной деформации проволоки.

Одним из таких видов инструмента являются сдвоенные волокна. Сущность метода с применением данного инструмента заключается в разделении деформационной зоны на две самостоятельные части.

Данный метод обладает следующими преимуществами.

1. Во второй волоке процесс идет с противонапряжением от предыдущих волок, что ведет к понижению давления металла на стенки волочильного канала и уменьшает его износ.

2. Вследствие того, что в межсекционные промежутки легко ввести смазку, могут быть значительно улучшены условия смазки и охлаждения протягиваемого металла.

3. За счет снижения кратности волочения, снижаются и энергетические и экономические затраты на производство.

Несмотря на очевидные преимущества, волочение с применением сдвоенных волок сопряжено с усложнением конструкции волокодержателя, увеличением отходов металла на захватку. Также, при волочении в сдвоенных волокнах происходит некоторое повышение усилия волочения по сравнению с волочением в односекционной волоке (при прочих одинаковых деформационных условиях). Кроме того, достичь значительного улучшения условий напряженно-деформированного состояния протянутой проволоки не представляется возможным.

Следующий способ производства проволоки заключается в применении в роли деформирующего инструмента роликовых волок. Данный метод включает предварительную деформацию заготовки во входной группе роликовой клетки, с последующей ее деформацией в круглое сечение в выходной группе клетки. В практике применяются различные виды роликовых волок: с вертикальным или горизонтальным расположением роликов, также клетки различаются и по числу

роликов, формирующих клеть. Данный процесс позволяет существенно снизить долю остаточных напряжений в проволоке, что достигается благодаря улучшению температурных и контактных условий, а также благодаря более равномерному распределению деформации по сечению изготавливаемой проволоки.

Однако, данный процесс имеет ряд существенных недостатков, заключающихся в следующем.

1. При многократном волочении, получение промежуточного овального сечения проволоки может привести к образованию острых кромок, «усов» в горизонтальных вершинах овального сечения. В этих местах, как правило, образуются трещины, которые делают невозможным последующие протяжки проволоки, так как перечисленные дефекты являются концентраторами напряжений.

2. Реализация данного способа требует большого парка рабочего инструмента, так как для получения каждого переходного сечения различного диаметра необходим конкретный калибр с конкретным диаметром ручья.

Развитием роликового волочения является модульно-комбинированный процесс, заключающийся в последовательном применении для деформации проволоки роликовых и монолитных волок, составляющих модуль.

Для реализации данного способа применяются отдельные модули, в которых объединены роликовая и монолитная волоки. Применение таких модулей не требует значительного переоборудования цехов, так как они легко встраиваются в линию волочильной машины, следовательно, технологический процесс изготовления проволоки остается традиционным. Данный способ обеспечивает эффективное управление напряженно-деформированным состоянием проволоки, благодаря более полной проработке сечения, что достигается за счет того, что в монолитной волоке преимущественно прорабатываются поверхностные слои проволоки, а в роликовой – внутренние, и таким образом подавляется образование локальных областей, в которых происходит накопление внутренних дефектов и микротрещин, что позволяет значительно снизить долю остаточных напряжений в проволоке [3]. Немаловажным является и то, что применение описываемого процесса позволяет снизить энергетические и экономические затраты на производство, вследствие снижения кратности волочения и снижения затрат на вспомогательные материалы.

### **Список литературы**

1. Буркин С.П., Шимов Г.В., Андрюкова Е.В. Остаточные напряжения в металлопродукции: учебное пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 248 с.
2. Соколов И.А., Уральский В.И. Остаточные напряжения и качество металлопродукции. – М.: Металлургия, 1981. – 96 с.
3. Харитонов В.А., Таранин И.В. Холодная прокатка проволоки: история и направления развития: монография. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. – 123 с.

### Сведения об авторах:

*Зайнуллин Азамат Ишдаuletович* – аспирант;

*Харитонов Вениамин Александрович* – к.т.н., профессор кафедры Технологий обработки материалов.

## АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПРОЦЕСС ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТИТАНОВЫХ ТРУБ

*Морозов А.А.*

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,  
Москва*

**Ключевые слова:** совершенствование калибровки, прокатный инструмент, холодная прокатка труб, формоизменение, титан, параметры деформирования.

**Аннотация.** В данной работе рассматривается процесс холодной прокатки титановых труб на стане ХПТ-55 и по результатам компьютерного моделирования в среде «QForm» анализируются параметры, влияющие на процесс холодной прокатки труб (ХПТ). Для этого построены трёхмерные модели заготовки, калибров и оправки в среде «Компас-3D», получены результаты расчёта и сформированы рекомендации по совершенствованию прокатного инструмента.

## ANALYSIS OF PARAMETERS AFFECTING THE PROCESS OF COLD ROLLING OF TITANIUM TUBES

*Morozov A.A.*

*National University of Science and Technology «MISIS», Moscow*

**Keywords:** improved calibration, rolling tool, cold rolling of tubes, shape change, titanium, deformation parameters.

**Abstract.** This paper considers the process of cold rolling of titanium tubes at the mill HPT-55 and analyzes the parameters affecting the process of cold rolling of tubes (HPT) based on the results of computer simulation in the "QForm" environment. For this purpose three-dimensional models of billet, gauges and mandrel in the "Compass-3D" environment are built, calculation results are obtained and recommendations for the improvement of rolling tools are formed.

### **Введение**

Холоднокатаные трубы из сплавов на основе титана предназначены для использования в установках энергетики, химического машиностроения, авиастроения, судостроения и в других сферах промышленности в качестве материала бесшовных труб. Это обусловлено ценными свойствами титановых сплавов, в том числе благодаря высокой коррозионной стойкости и удельной прочности.

Один из способов получения таких труб заключается в горячем выдавливании заготовки с последующей многостадийной холодной прокаткой [1].

Данная технология характеризуется более высоким качеством трубы по свойствам и точности и поэтому широко используется в производстве титановых труб.

Цель работы заключается в поиске подхода к совершенствованию калибровки рабочего инструмента по результатам анализа параметров, влияющих на процесс ХПТ.

Для достижения цели поставлена задача – провести компьютерное моделирование процесса прокатки на стане ХПТ-55 и по результатам анализа полученных данных сформировать рекомендации по доработке и совершенствованию прокатного инструмента.

### **Методы**

Маршрут прокатки и калибровка (второго поколения с криволинейной развёрткой калибра и прямой образующей оправки) рабочего профиля прокатного инструмента приняты согласно данным одного из действующих заводов, занимающихся производством титановых труб.

По результатам анализа калибровки, а именно, данным относительных деформаций стенки трубы в контрольных сечениях обжимного участка, в предчистовом участке обнаружено «лавинообразное» снижение деформаций, которое может повлиять на процесс прокатки [2].

Компьютерное моделирование проводилось в среде «QForm», с применением предварительно построенных трёхмерных моделей – двух калибров, оправки и заготовки. Трёхмерные модели построены в среде «Компас-3D».

Для запуска моделирования проведены специальные расчёты и назначены режимы прокатки, характерные для станов ХПТ-55.

В качестве материала принят существующий титановый сплав в базе «QForm», предназначенный специально для моделирования ХПТ.

Последним этапом перед запуском компьютерного моделирования послужило назначение необходимых граничных условий, например, температура заготовки, фактор трения и др.

### **Результаты и обсуждения**

После достижения установившейся стадии прокатки, при моделировании в среде «QForm», получены данные для анализа.

Максимальное вертикальное усилие, приложенное к нижнему валку, составило 0,4552 МН, в начале обжимного участка на прямом ходу.

При рассмотрении графика усилий на валок отмечено, что в предчистовом участке наблюдаются характерные перепады, которые могут послужить следствием существующей разработки калибровки, где в предчистовом участке предварительно обнаружено «лавинообразное» снижение относительной деформации стенки трубы.

Согласно современному представлению о калибровках такое распределение, может отрицательно повлиять на процесс прокатки, в части разнотолщинности стенки трубы из-за отсутствия в пережиме равенства наклона образующих ручья, калибра и в части снижения стойкости рабочего инструмента.

Функция кривой деформации стенки трубы должна быть монотонно убывающей, вогнутой и стремящейся к нулю, в связи с чем, рекомендуется совершенствование калибровки и применение калибровки третьего поколения (с криволинейной развёрткой калибра и криволинейной образующей оправки) [3].

Максимальное осевое усилие, приложенное к валку, составило 0,268 МН, в начале обжимного участка на обратном ходу.

Максимальное осевое усилие, приложенное к оправке, вдоль оси прокатки составило 0,0293 МН, в начале обжимного участка на обратном ходу.

Максимальное напряжение в предчистовом участке оправки составило 120 МПа, в предчистовом участке. Предел прочности оправки для ШХ15 ГОСТ 801-78 от 590 до 730 МПа, следовательно, коэффициент запаса прочности оправки (по критерию усталости) составляет на данном участке 4,9.

Максимальное напряжение в середине обжимного участка оправки составило 160 МПа. Коэффициент запаса прочности оправки составляет на данном участке 3,7.

Максимальное напряжение в начале обжимного участка оправки составило 180 МПа. Коэффициент запаса прочности оправки составляет на данном участке 3,3.

Максимальная накопленная деформация установлена в предчистовом участке.

Максимальная температура нагрева заготовки в процессе закатки конуса установлена в предчистовом участке и составляет 180 градусов, далее снижается на протяжении калибрующего участка.

### **Заключение**

Таким образом, по результатам компьютерного моделирования процесса холодной прокатки титановых труб на стане ХПТ-55 сформулированы рекомендации по доработке и совершенствованию прокатного инструмента.

В результате анализа параметров, влияющих на процесс ХПТ, установлено, что максимальные усилия на рабочий инструмент концентрируются в начале обжимного участка.

### **Список литературы**

1. Пумпянский Д.А. Перспективные сплавы титана для изготовления холоднодеформированных труб // *Металлург.* – 2023. – № 1. – С. 37-48.
2. Фролов В.Ф., Данченко В.Н., Фролов Я.В. Холодная пильгерная прокатка труб: Монография. – Дніпропетровськ: Пороги, 2005. – 260 с.
3. Орлов Г.А. Основы теории прокатки и волочения труб: учебное пособие – Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2016. – 204 с.

### Сведения об авторе:

*Морозов Александр Андреевич* – аспирант.

## ЗАВИСИМОСТЬ СТОЙКОСТИ СФЕРИЧЕСКОЙ КЕРАМИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКОВОЙ ФОРМЫ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ЕЁ ОХВАТА ОПОРНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ ПРИ ЗАЛИВКЕ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ОТЛИВКИ

*Дмитриев Э.А., Намоконов А.Н., Чернышова Д.В., Евстигнеева А.А.*

*Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре*

**Ключевые слова:** керамическая оболочковая форма, отливка, опорный наполнитель, напряженное состояние, моделирование.

**Аннотация.** Сформулирована и решена задача по оптимизации стойкости сферической оболочковой формы от величины охвата её опорным наполнителем при охлаждении в ней затвердевающей отливки. Приведена численная схема и разработанный алгоритм решения задачи. Оценка трещиностойкости проводится по величине нормальных напряжений в оболочковой форме. Результаты вычислительных экспериментов приведены в виде эпюр нормальных напряжений. Дан анализ полученных результатов стойкости сферической оболочки с учетом изменения модуля сдвига материала формы, температуры внешнего воздействия со стороны опорного наполнителя.

## DEPENDENCE OF RESISTANCE OF A SPHERICAL CERAMIC SHELL MOLD ON THE SIZE OF ITS COVERAGE BY THE SUPPORTING FILLER DURING CASTING AND CRYSTALLIZATION OF THE CASTING

*Dmitriev E.A., Namokonov A.N., Chernyshova D.V., Evstigneeva A.A*

*Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Komsomolsk-on-Amur*

**Keywords:** ceramic shell mold, casting, supporting filler, stress state, modeling.

**Abstract.** The problem of optimizing the resistance of a spherical shell mold from the value of its coverage by a supporting filler during cooling of a solidifying casting in it is formed and solved. The numerical scheme and the developed algorithm for solving the problem are given. The crack resistance is estimated by the value of normal stresses in the shell mold. The results of computational experiments are given in the form of normal stress diagrams. Analysis of the obtained results of spherical shell resistance is given, taking into account the change of shear modulus of the mold material, temperature of external influence from the support filler side.

### Введение

При заливке сталью сферической оболочковой формы (ОФ) возникают значительные сжимающие напряжения, особенно в начале процесса, что может привести к разрушению ОФ и, как следствие, к дефектам в стальной отливке [1].

Процесс заполнения сферической ОФ жидким металлом через литниковую воронку сопровождается кристаллизацией металла с отводом тепла через опорный наполнитель (ОН).

При охлаждении стали в ОФ из-за значительного температурного градиента возникают температурные напряжения, которые могут привести к разрушению ОФ и браку стальной отливки. Цель данного исследования заключается в определении внешних факторов, при которых сферическая ОФ не разрушается от температурных напряжений.



Предыдущие исследования [2, 3] старались снизить сжимающие напряжения в ОФ, учитывая зависимость модуля сдвига от температуры и моделирование величины заливочного окна. Эти усилия позволили снизить напряженное состояние в оболочке, но в первые мгновения сжимающие напряжения на контакте с жидким металлом остаются высокими.

В данной работе моделируется величина охвата ОФ поверхностью ОН. На рисунке 1 представлена расчетная схема процесса с учетом осевой симметрии.

#### Основной текст

Рассматривается четырех-компонентная система (ЖМ – жидкий металл I, ТМ – твердый металл II, ОФ – оболочковая форма III, ОН – опорный наполнитель IV), представленная на рисунке 1.

Рассматривалось осесимметричное тело вращения, при этом деформируемый материал, включая затвердевший металл (область II) и форму (область III) считался изотропным при медленном движении.

Целевая функция, определяющая оптимальное значение угла  $\varphi$ , будет иметь вид:

$$F = \min |\sigma_{33}(\varphi)| \max |\sigma_{33}(\tau, Q)| \quad (1)$$

$$\text{с ограничениями } 0 < \varphi < (180 - \alpha), \quad (2)$$

$$0 < \tau < \tau^*,$$

$$\sigma_{сж} = 50 \div 60 \text{ МПа},$$

где  $Q$  – область меридианного сечения ОФ.

Напряжение  $\sigma_{33}$  в целевой функции (1) принято, как наиболее опасное по приведенным выше результатам расчета.

Ограничение  $|\sigma_{33}| < 50$  МПа принят из справочного материала по пределу прочности на сжатие рядовой керамики  $\sigma_{сж} = 50 \div 60$  МПа.

В процессе оптимизации решается задача определения напряженно-деформированного состояния (НДС) в рассматриваемой области  $Q$ .

Для решения системы уравнений использовались апробированный численный метод и численная схема, описанные в работах [4, 5], а также программные комплексы [6,7]. Расчет показал следующие значения:

$$F = -32,1 \text{ МПа}; \varphi = 10^\circ; \tau = 0,1 \text{ сек.}$$

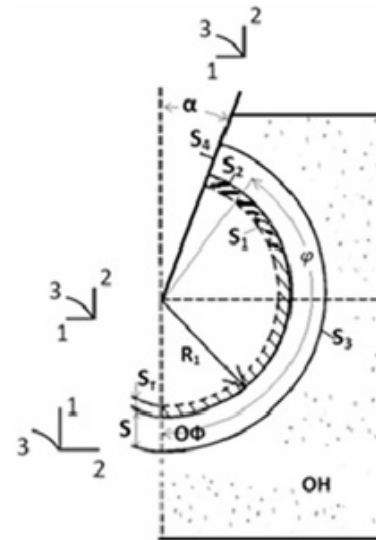


Рис. 1. Расчетная схема системы ЖМ-ТМ-ОФ-ОН с указанием поверхности к граничным условиям задачи:  
 $S_1$  – поверхность контакта жидкого и затвердевшего металла;  $S_2$  – внутренняя поверхность контакта затвердевшего металла и оболочковой формы;  $S_3$  – внешняя поверхность оболочковой формы;  $S_4$  – свободная поверхность торца литниковой чаши оболочковой формы

Результаты исследования приведены на рисунке 2 в виде эпюр по сечению рассматриваемой оболочки. Корочка затвердевшего металла ещё не успела сформироваться.

Растягивающие напряжения  $\sigma_{22}, \sigma_{33}$  малы. При дальнейшем охлаждении ( $\tau = 3,65$  сек) результаты приведены на рисунке 3.

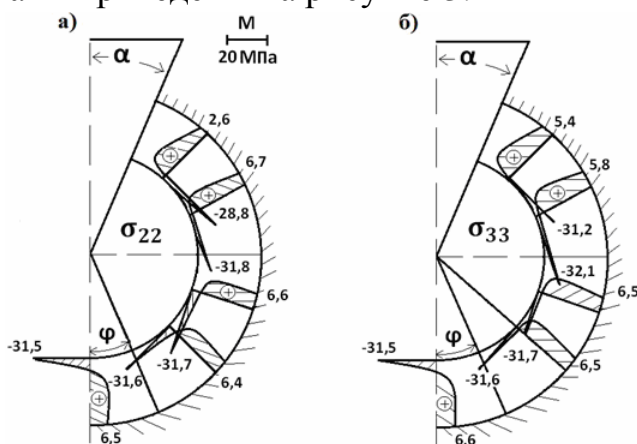


Рис. 2. Поле нормальных напряжений  $\sigma_{22}(a)$  и  $\sigma_{33}(a)$  при  $\varphi = 10^\circ$ ,  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\tau = 0,1$  сек.

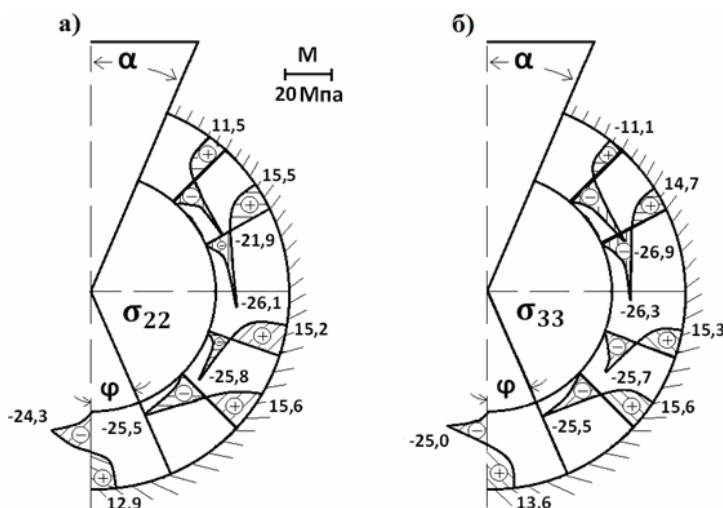


Рис. 3 Поле нормальных напряжений  $\sigma_{22}(a)$  и  $\sigma_{33}(a)$  при  $\varphi = 10^\circ$ ,  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\tau = 3,65$  сек.

В процессе охлаждения стали в ОФ наблюдается резкое снижение сжимающих и увеличение растягивающих напряжений. Однако последние также падают после достижения максимума. Наиболее критичными с точки зрения вероятности образования трещин в ОФ являются внутренние слои, прилегающие к облицовочному слою, контактирующему с жидким затвердевшим металлом.

При дальнейшем охлаждении затвердевающей отливки наблюдается выравнивание величин напряжений по толщине оболочки. Однако эти напряжения практически не влияют на рост НДС и вероятность разрушения ОФ.

При анализе полученного решения были сделаны расчеты и при других значения  $\varphi(45^\circ, 90^\circ, 100^\circ)$ . Результаты показывают, что по требуемым технологическим параметрам поверхность  $S_3$  может быть максимально закрыта ОН на угол  $\varphi = 90^\circ$ , так как максимальное значение  $|\sigma_{33}|$  мало отличается от полученного значения по целевой функции, но более технологична.

## Заключение

Поставлена и решена задача по установлению влияния величины охвата ОФ опорным наполнителем на ее стойкость в процессе охлаждения в ней затвердевающей стальной отливки. Установлен характер распределения возникающих напряжений по толщине ОФ и возможные места образований в ней трещин в процессе затвердевания и охлаждения формирующей ее отливки

Показано, что в первый момент времени после заливки жидкого металла растягивающие напряжения  $\sigma_{22}, \sigma_{33}$  минимальны, а сжимающие напряжения максимальны. При дальнейшем охлаждении величина сжимающих напряжений резко падает, а растягивающих сначала растет, а затем тоже падает. Величина охвата ОФ опорным наполнителем может быть принята при  $\varphi = 90^\circ$ , что обеспечивает снижение или сохранение НДС ОФ на допустимом уровне без ее разрушения.

**Финансирование.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №24-29-00214, <https://rscf.ru/project/24-29-00214/>.

**Благодарность.** Работа выполнялась при участии д.т.н., профессора Одинокова В.И и д.т.н., профессора Евстигнеева А.И.

## Список литературы

1. Евстигнеев А.И., Одинокоев В.И., Дмитриев Э.А., Чернышова Д.В., Евстигнеева А.А., Иванкова Е.П. О трещиностойкости керамической оболочковой формы по выплавляемым моделям при затвердевании в ней шарообразной стальной отливки // Литейное производство. – 2022. – №9. – С. 17-21.
2. Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А., Чернышова Д.В., Одинокоев В.И., Евстигнеева А.А., Иванкова Е.П. Моделирование внешнего силового воздействия на оболочковую форму для заливки стали // Математическое моделирование. – 2022. – Т. 34, №5. – С. 61-72.
3. Евстигнеев А.И., Одинокоев В.И., Дмитриев Э.А., Свиридов А.В., Иванкова Е.П. Влияние внешнего теплового воздействия на напряженное состояние оболочковых форм по выплавляемым моделям // Математическое моделирование. – 2021. – Т. 33, №1. – С. 63-76.
4. Одинокоев В.И., Каплунов Б.Г., Песков А.В., Баков А.В. Математическое моделирование сложных технологических процессов. – М.: Наука, 2008. – 176 с.
5. Одинокоев В.И., Дмитриев Э.А., Евстигнеев А.И., Свиридов В.И. Математическое моделирование процессов получения отливок в керамические оболочковые формы. – М.: Машиностроение, 2020. – 256 с.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012661389. ОДИССЕЙ / В.И. Одинокоев, А.Н. Прокудин, А.М. Сергеева, Г.М. Севастьянов. – Зарегистрировано 13.12.2012.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021616121. Программа математического моделирования оптимизации выбора температуры опорного наполнителя, физических свойств материала и структуры оболочковой формы по выплавляемым моделям для повышения её трещиностойкости при охлаждении в ней отливки / В.И. Одинокоев, Э.А. Дмитриев, А.И. Евстигнеев, Е.П. Иванкова. – Зарегистрировано 16.04.2021.

## Сведения об авторах:

*Эдуард Анатольевич Дмитриев* – д.т.н., профессор, ректор;

*Александр Николаевич Намоконов* – аспирант;

*Дарья Витальевна Чернышова* – аспирантка;

*Анна Алексеевна Евстигнеева* – студентка.

## О НЕКОТОРЫХ ИТОГАХ РАЗВИТИЯ ХИМИЧЕСКОЙ И НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ТЮМЕНСКОЙ ОБЛАСТИ

*Солодовников А.Ю.*

*Тюменское отделение «СургутНИПИнефть», Тюмень*

**Ключевые слова:** Тюменская область, химическая и нефтехимическая промышленность, углеводородное сырьё, предприятия, продукция.

**Аннотация.** В статье дан краткий экскурс становления и развития химической и нефтехимической промышленности в Тюменской области. Названы предпосылки её развития. Было отмечено, что данная отрасль относится к числу наиболее динамично развивающихся отраслей экономики области и эта динамика обусловлена расширением выпуска продукции, в том числе не имеющий аналогов в России.

## THE RESULTS OF GAS-OIL INDUSTRY DEVELOPMENT IN TYUMEN REGION

*Solodovnikov A.Yu.*

*Tyumen department of «SurgutNIPIneft», Tyumen*

**Keywords:** Tyumen region, chemical and oil-chemical industry, hydrocarbons, facilities, production.

**Abstract.** In this article the development of chemical and oil – chemical industry of Tyumen region is observed. The motives of its' development are emphasised. It was notified that this is one of the fastest developing industries of economics and it has no analigues even in Russia.

Принято считать, что Тюменская область относится к числу крупных нефтедобывающих регионов России и это справедливо. Ежегодно на её территории (без автономных округов здесь и далее) добывается порядка 10 млн т нефти. Но при этом мало кто знает, что Тюменская область является одним из центров химической и нефтехимической промышленности в РФ.

Для Тюменской области химическая и нефтехимическая промышленность – наиболее динамично развивающаяся отрасль. В 2022 г. занимала 1-е место в обрабатывающей промышленности и общем объёме отгруженных товаров и услуг. Только за 2005-2022 гг. её доля в объёме отгруженных товаров обрабатывающей промышленности выросла в 505 раз (с 0,1%), в общем объёме отгруженных товаров и услуг – в 372 раза (с 0,1% до 37,2%) (табл. 1).

Зарождение отрасли было обусловлено необходимостью утилизации попутного нефтяного газа и газового конденсата – побочных продуктов добычи, прежде всего, нефти. Длительное время их сжигали в факелах. В 1970-е годы государством было принято решение о реализации проекта по глубокой переработке углеводородного сырья с месторождений Западной Сибири. Одновременно с утилизацией побочных продуктов нефтегазодобычи решалась задача получения из них полезных химических компонентов, которые можно использовать для производства полимеров, каучуков, химических волокон.

Табл. 1. Доля химической и нефтехимической промышленности в объёме отгруженных товаров в 2005-2020 гг., % (составлена по [1, 2])

Год	В общем объёме	Обрабатывающих производств
1	2	3
2005	0,1	0,1
2006	0,1	0,1
2007	0,4	0,4
2008	0,4	0,4
2009	0,3	0,4
2010	0,5	0,8
2011	0,4	0,6
2012	0,3	0,5
2013	0,3	0,6
2014	1,6	3,5
2015	1,8	4,0
2016	0,3	0,7
2017	18,8	25,0
2018	16,9	24,0
2019	19,8	29,1
2020	30,3	42,2
2021	37,3	52,1
2022	37,2	50,5

В 1972 г. министром нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности был подписан акт о строительстве в Тобольске нового производства. В 1974 г. началось его строительство и через 10 лет – в 1984 г. – был осуществлен запуск комбината. Первая продукция была получена в 1985 г.

В 1987 г. на предприятии были введены в строй установки по производству бутадиена производительной мощностью 180 тыс. т в год. Однако с распадом СССР развитие комбината остановилось. Предприятие из-за нехватки сырья оказалось на грани банкротства. Лишь сотрудничество с Сибирско-Уральской нефтегазохимической компанией (СИБУР), в состав которого тобольский «Нефтехим» вошёл в 1999 г., что позволило сохранить завод и выйти из кризиса. На базе предприятия начинается строительство новых производственных мощностей; по производству полипропилена – ООО «Тобольск-Полимер» (2006); по глубокой переработке углеводородного сырья в полиолефины – «ЗапСибНефтехим» (2015). В 2020 г. действующие производственные активы предприятий были объединены в одно юридическое лицо – ООО «ЗапСибНефтехим» [3]. В настоящее время ООО «ЗапСибНефтехим» по объёмам реализации продукции входит в число 400 крупнейших предприятий Урала и Западной Сибири.

Основная выпускаемая продукция – полипропилен, полиэтилен. В качестве сырья используется продукция, поступающая с территории ХМАО-Югры и ЯНАО, – широкая фракция лёгких углеводородов (ШФЛУ). Суммарная мощность завода – 2,5 млн. т полимеров в год (1,5 млн. т полиэтилена и 1 млн. т

полипропилена). Установка пиролиза такой мощности в настоящее время единственная в России и входит в ТОП-5 в мире. В 2020 г. примерно 75% продукции отправлено на экспорт – в Китай (50-55%), Германию, другие страны Западной Европы и СНГ. Экспорт составил 214 млн. долл. США. Запуск «ЗапСибНефтехима» позволил заменить импорт полимеров в объёме 400 тыс. т, в том числе ранее не производившихся в России марок.

Производство химических веществ и химических продуктов сосредоточено в Тюмени. «Трубный завод Сибгазппарат» (1993) – крупнейший в УрФО завод по производству полиэтиленовых труб и комплектующих. Выпускает полиэтиленовые трубы с диаметрами от 225 до 1000 мм, «НеоКомпозит» (2012) (полимерно-композитные строительные материалы), «Акмо» (2004) (пластмассовые изделия, изделия из плёнки), «Запсибагропром» (2015) (изделия из полиуретана), «Тюменский трубный завод» (2005; «СибТрейдПласт», с 2007 – современное название) (полиэтиленовые трубы диаметром от 63 до 630 мм), завод «Полипак» (2017; с. Исетское) – единственный в Тюменской области завод по изготовлению биг-бэгов и упаковочной тары из полиэтилена.

Таким образом, следует отметить, что химическая и нефтехимическая промышленность в Тюменской области относится к числу важнейших отраслей экономики. Она обеспечивает свыше половины объёма производимой продукции обрабатывающей промышленности и около 40 % от общего объёма отгруженных товаров и услуг. На предприятиях области выпускается продукция, не имеющая аналогов в стране и по ряду продуктов область полностью закрывает потребности страны.

#### **Список литературы**

1. Тюменская область (кроме Ханты-Мансийского автономного округа – Югры и Ямало-Ненецкого автономного округа) в 2-х частях. Ч I (I) (1990-2016) Статистический ежегодник: Стат. сб. / Управление Федеральной службы государственной статистики по Тюменской области, Ханты-Мансийскому автономному округу – Югре и Ямало-Ненецкому автономному округу. – Тюмень, 2020. – 349 с.
2. Официальный сайт Управления Федеральной службы государственной статистики по Тюменской области, Ханты-Мансийскому автономному округу – Югре и Ямало-Ненецкому автономному округу [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://72.rosstat.gov.ru>.
3. Официальный сайт ООО «ЗапСибНефтехим» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sibur.ru/zapsibneftekhim>.

#### **Сведения об авторе:**

*Солодовников Александр Юрьевич* – д.геогр.н., доцент, начальник научно-исследовательского отдела Экологии Тюменского отделения «СургутНИПИнефть».

УДК 66.081.6

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМА И МАССЫ ФЛАНЦА ЭЛЕКТРОБАРОМЕМБРАННОГО АППАРАТА ПЛОСКОКАМЕРНОГО ТИПА

*Седоплатов И.С., Ковалева О.А., Столяров А.А., Ковалев С.В.*

*Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, Тамбов*

**Ключевые слова:** электробаромембранный аппарат, фланец, штуцер.

**Аннотация.** При проектировании и создании мембранных аппаратов для расчета их экономической составляющей требуется использовать различные методики. В статье приводится одна из методик, позволяющая рассчитать требуемое количество материала для изготовления фланца электробаромембранного аппарата, а также затраты на приобретение материала, что позволит определить основные расходы при производстве.

## METHOD FOR DETERMINING VOLUME AND MASS FLANGE OF ELECTRIC BAROMEMBRANE DEVICE OF FLAT CHAMBER TYPE

*Sedoplatov I.S., Kovaleva O.A., Stolyarov A.A., Kovalev S.V.*

*Derzhavin Tambov State University, Tambov*

**Keywords:** electrobaromembrane apparatus, flange, fitting.

**Abstract.** When designing and creating membrane devices, various methods must be used to calculate their economic component. The article provides one of the methods that allows you to calculate the required amount of material for the manufacture of the flange of an electrobaromembrane device, as well as the cost of purchasing the material, which will determine the main costs of production.

Разработка конструкций электробаромембранных аппаратов для разделения технологических растворов и сточных вод является актуальной задачей. Выделение ценных компонентов растворов, в виде подкисленных и подщелоченных потоков – возможность снижения технологической нагрузки на элементы очистных сооружений и применения получаемых потоков жидкостей в качестве заменителей химических реагентов (кислот и щелочей). Эффективные и отработанные технологии разделения веществ на финишных этапах очистки промышленных растворов основаны на применении баромембранных и электробаромембранных методов [1-3].

В промышленности нашли широкое применение плоскокамерные мембранные аппараты ввиду простоты конструктивного оформления. Одним из основных элементов плоскокамерного электробаромембранного аппарата является фланец, который является несущим элементом и к нему предъявляются повышенные требования жесткости и прочности, в связи с тем, что рабочее давление в аппарате может достигать 6 МПа.

Конструкция фланца электробаромембранного аппарата (рис. 1) является усовершенствованием конструкции, представленной в работе [4]. Возможны два варианта конструктивного исполнения аппарата: для работы в режиме электробаромембранного разделения; для работы в режиме баромембранного разделения. Элементы аппарата могут быть выполнены из капролона или из

коррозионностойкой стали (12X18H10T, 12X18H9T). Методика расчета конструктивных характеристик фланца электробаромембранного аппарата плоскокамерного типа включает расчет объема и массы конструкционного материала. Методика расчета основана на учете геометрических параметров элемента устройства.

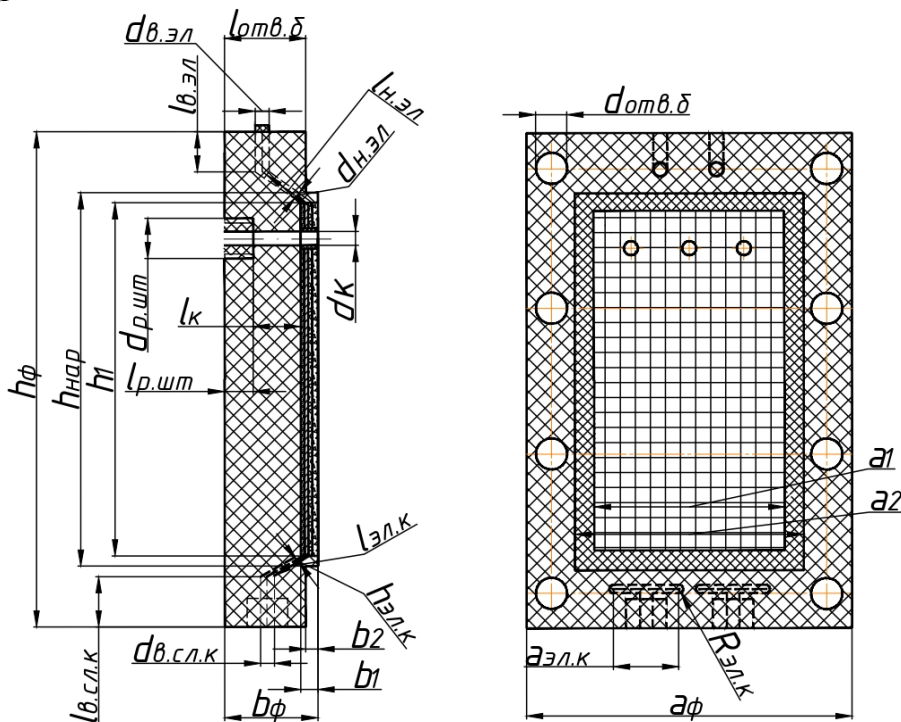


Рис. 1. Фланец электробаромембранного аппарата плоскокамерного типа

На рисунке 1 представлена расчетная схема объема фланца, который определяем по формуле

$$V_{\text{фл}} = V_3 - n_{\text{шт}} V_{\text{р.шт}} - n_{\text{к.р}} V_{\text{к.р}} - n_{\text{к.эл}} V_{\text{к.эл}} - n_{\text{к.сл}} V_{\text{к.сл}} - V_{\text{м}} - V_{\text{нар}} - n_{\text{отв}} V_{\text{отв}},$$

где  $V_3$  – объем заготовки фланца;  $V_{\text{р.шт}}$  – объем резьбовой части штуцеров;  $V_{\text{к.р}}$  – объем канала ввода/вывода разделяемого раствора;  $V_{\text{к.эл}}$  – объем канала подвода электрического тока;  $V_{\text{к.сл}}$  – объем канала слива пермеата;  $V_{\text{м}}$  – объем, занимаемый мембранным пакетом;  $V_{\text{нар}}$  – объем наружного выреза во фланце со стороны камеры разделения;  $V_{\text{отв}}$  – объем отверстий под болты;  $n_{\text{шт}} = 5$  число резьб во фланце под штуцеры;  $n_{\text{к.р}} = 3$  – число каналов ввода/вывода разделяемого раствора;  $n_{\text{к.эл}} = 2$  – число каналов подвода электрического тока;  $n_{\text{к.сл}} = 2$  – число каналов слива пермеата;  $n_{\text{отв}} = 8$  – число отверстий под болты.

Для нахождения объема фланца необходимо найти объем каждой составляющей.

Объем заготовки фланца:

$$V_3 = a_{\text{ф}} b_{\text{ф}} h_{\text{ф}},$$

где  $a_{\text{ф}}$ ,  $b_{\text{ф}}$  и  $h_{\text{ф}}$  – ширина, длина и высота заготовки фланца.

Объем резьбовой части штуцеров:

$$V_{\text{р.шт}} = \frac{\pi d_{\text{р.шт}}^2}{4} l_{\text{р.шт}},$$

где  $d_{\text{р.шт}}$  и  $l_{\text{р.шт}}$  – диаметр и длина резьбы под штуцер.

Объем канала разделяемого раствора:



$$V_{к.р} = \frac{\pi d_k^2}{4} l_k,$$

где  $d_k$  и  $l_k$  – диаметр и длина канала для ввода или вывода разделяемого раствора.

Объем канала для подвода электрического тока:

$$V_{к.эл} = \frac{\pi d_{в.эл}^2}{4} l_{в.эл} + \frac{\pi d_{н.эл}^2}{4} l_{н.эл},$$

где  $d_{в.эл}$  и  $l_{в.эл}$  – диаметр и длина вертикального канала для подвода электрического тока;  $d_{н.эл}$  и  $l_{н.эл}$  – диаметр и длина наклонного канала для подвода электрического тока.

Для нахождения объема канала слива необходимо вычислить объем вертикального канала и объем эллиптического канала. Зная формулу нахождения объема эллипса:

$$V_{эл.к} = a_{эл.к} h_{эл.к} l_{эл.к} + 2 \frac{\pi R_{эл.к}^2 l_{эл.к}}{2}.$$

Тогда объем канала слива находится по формуле:

$$V_{к.сл} = \frac{\pi d_{в.сл.к}^2}{4} l_{в.сл.к} + a_{эл.к} h_{эл.к} l_{эл.к} + 2 \frac{\pi R_{эл.к}^2 l_{эл.к}}{2} = \frac{\pi d_{в.сл.к}^2}{4} l_{в.сл.к} + a_{эл.к} h_{эл.к} l_{эл.к} + \pi R_{эл.к}^2 l_{эл.к},$$

где  $d_{в.сл.к}$  и  $l_{в.сл.к}$  – диаметр и длина вертикального канала для слива пермеата;  $a_{эл.к}$ ,  $l_{эл.к}$  и  $h_{эл.к}$  – ширина, длина и высота эллиптического канала.

Объем мембранного пакета:

$$V_M = a_1 b_1 h_1,$$

где  $a_1$  и  $h_1$  – ширина и высота, занимаемая мембранным пакетом;  $b_1$  – толщина, занимаемая мембранным пакетом.

Объем наружного выреза во фланце со стороны камеры разделения:

$$V_{нар} = a_{ф} b_2 h_{ф} - a_2 b_2 h_{нар},$$

где  $a_2$  и  $h_{нар}$  – ширина и высота наружной части выреза;  $b_2$  – глубина выреза.

Объем отверстий под болты:

$$V_{отв} = \frac{\pi d_{отв.б}^2}{4} (b_{ф} - b_2),$$

где  $d_{отв.б}$  – диаметр отверстий под болты.

Подставив габаритные параметры и объемы каналов элементов фланца в формулу, получим:

$$V_{фл} = a_{ф} b_{ф} h_{ф} - 5 \frac{\pi d_{р.шт}^2}{4} l_{р.шт} - 3 \frac{\pi d_k^2}{4} l_k - 2 \left( \frac{\pi d_{в.эл}^2}{4} l_{в.эл} + \frac{\pi d_{н.эл}^2}{4} l_{н.эл} \right) - 2 \left( \frac{\pi d_{в.сл.к}^2}{4} l_{в.сл.к} + a_{эл.к} h_{эл.к} l_{эл.к} + \pi R_{эл.к}^2 l_{эл.к} \right) - a_1 b_1 h_1 - (a_{ф} b_2 h_{ф} - a_2 b_2 h_{нар}) - 8 \frac{\pi d_{отв.б}^2}{4} (b_{ф} - b_2).$$

Масса фланца аппарата определяется по формуле

$$m = \rho V_{фл},$$

где  $\rho$  – плотность материала корпуса аппарата, кг/м<sup>3</sup>.

Разработана методика расчета объема и массы фланца для электробаромембранного аппарата плоскокамерного типа, применение которой

позволит определять общую стоимость материала, требуемую для его изготовления.

### **Список литературы**

1. Свитцов А.А. Введение в мембранную технологию. – М.: ДеЛи принт. 2007. – 208 с.
2. Нифталиев С.И., Козадерова О.А., Ким К.Б., Малявина Ю.М. Электродиализ в очистке азотсодержащих сточных вод предприятия по производству минеральных удобрений // Химическая промышленность сегодня. –2014. – № 7. – С. 52-56.
3. Goncharuk V.V., Dul'neva T.Y., Kucheruk D.D. Water purification of hydroxocomplexes of heavy metals by electromicrofiltration using inorganic membranes // Journal of Water Chemistry and Technology. 2010, vol. 32, pp. 95-100.
4. Патент №2771722 РФ. Электробаромембранный аппарат плоскокамерного типа / С.В. Ковалев, Д.Н. Коновалов, О.А. Ковалева, Д.И. Кобелев. – Заявка №2021127024 от 14.09.2021; опубл. 11.05.2022, Бюл. № 14.

### Сведения об авторах:

*Седоплатов Иван Сергеевич* – аспирант;

*Ковалева Ольга Александровна* – д.т.н., профессор кафедры ММиИТ;

*Столяров Алексей Андреевич* – аспирант;

*Ковалев Сергей Владимирович* – д.т.н., профессор кафедры ММиИТ.

## МОДЕРНИЗАЦИЯ И СОЗДАНИЕ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ МАЛОТОКСИЧНОЙ ГОРЕЛКИ ДЛЯ ТРУБЧАТЫХ ПЕЧЕЙ НЕФТЕГАЗОВЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

*Катин В.Д., Журавлев А.А.*

*Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск*

**Ключевые слова:** нефтегазовые предприятия, трубчатые технологические печи, газомазутная горелка типа ГП-2, частичная рециркуляция дымовых газов, подача пара в зону горения, труба с распылителем пара, оксид азота, продукты неполного горения, снижение выбросов загрязняющих веществ.

**Аннотация.** В статье дается обоснование целесообразности применения частичной рециркуляции дымовых газов в топку трубчатых печей в целях снижения выбросов оксидов азота, как наиболее токсичных вредных веществ, образуемых при горении топлива. Показано, что при подаче в топку газов в объеме более 20% от общего количества продуктов сгорания появляются сажа, углеводороды и оксид углерода. Разработана новая конструкция горелки с дополнительной установкой специальной трубы с распылителем пара в зону горения топлива, что позволяет существенно повысить экологическую эффективность ее эксплуатации и трубчатой печи в целом.

## MODERNIZATION AND CREATION OF A NEW DESIGN OF A LOW-TOXIC BURNER FOR TUBE FURNACES OF OIL AND GAS ENTERPRISES

*Katin V.D., Zhuravlev A.A.*

*Far Eastern State Transport University, Khabarovsk*

**Keywords:** oil and gas enterprises, tubular technological furnaces, gas-oil burner type GP-2, partial recycling of flue gases, supply of steam to the combustion zone, pipe with a steam atomizer, reduction of pollutant emissions, nitrogen oxides, products of incomplete combustion.

**Abstract.** The article provides a rationale for the feasibility of using partial recirculation of flue gases into the furnace of tube furnaces in order to reduce emissions of nitrogen oxides, as the most toxic harmful substances formed during fuel combustion. It has been shown that when gases are supplied to the furnace in a volume of more than 20% of the total amount of combustion products, soot, hydrocarbons and carbon monoxide appear. A new burner design has been developed with the additional installation of a special pipe with a steam atomizer in the fuel combustion zone, which can significantly improve the environmental efficiency of its operation and tubular furnace.

Для сокращения выбросов оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) применяют различные способы сжигания газа и мазута в трубчатых печах нефтегазовой отрасли, основанные на учете механизмов образования  $\text{NO}_x$  при их горении [1]. При этом по данным [1-3] приоритетным методом снижения выбросов  $\text{NO}_x$  является рециркуляция части продуктов сгорания в топку печных агрегатов. Экологический эффект указанного способа при подаче дымовых газов количестве 15-20% от объема продуктов сгорания заключается в сокращении выхода  $\text{NO}_x$  на 30-35% по сравнению с традиционным сжиганием топлива. В то же время по данным [3] рециркуляция продуктов сгорания в топку в объеме более 20% связана с появлением в дымовых газах углеводородов, сажи, оксида углерода. В связи с этим необходимо разработать техническое решение, повышающее

экологическую эффективность способа частичной рециркуляции путем подачи пара через специальную трубу в зону горения топлива.

Так, в известной конструкции горелки, защищенной патентом на полезную модель [4], предусмотрен дополнительный канал с заслонкой для подачи части рециркулирующих дымовых газов в зону горения, в результате чего обеспечивается снижение выбросов на 25-30%. В то же время существенным недостатком ее являются сопутствующие выбросы углеводородов, сажи и оксида углерода при совместном сжигании газа и мазута, что снижает экологическую эффективность горелки.

Авторами разработана принципиально новая конструкция горелочного устройства, отличающаяся от аналогов тем, что в нем дополнительно установлена труба распылителем пара в зону горения топлива. Предлагаемая горелка показана на рисунке 1.

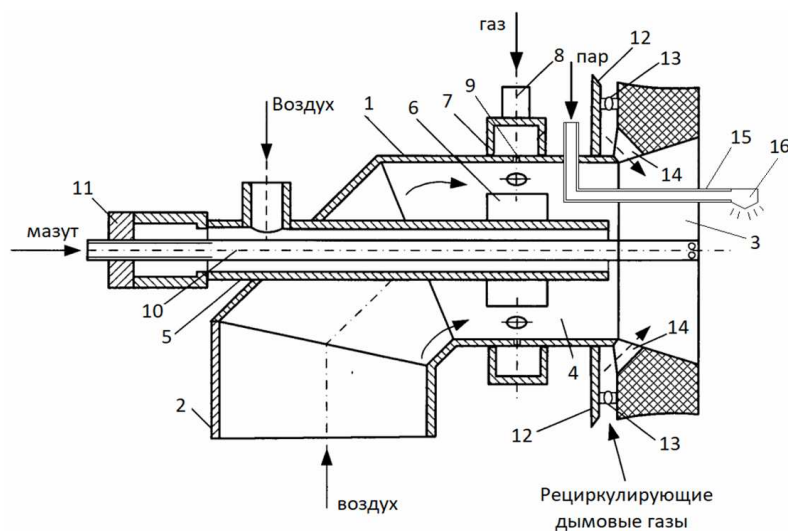


Рис. 1. Схема новой конструкции горелки типа ГП-2 с подачей пара в зону горения

Горелка содержит корпус 1 с патрубком для подачи воздуха 2, соединенный с амбразурой 3, установленной в отверстие печи, смешивательную камеру 4, трубу с патрубком 5 для подачи воздуха при работе горелки на мазуте, расположенную по оси корпуса 1, вставку 6, закрепленную на наружной поверхности трубы 5 с возможностью поворота и предназначенную для образования пережима на воздушном тракте. Горелка также содержит периферийный кольцевой коллектор 7 с патрубком 8 и газораздающими отверстиями 9, расположенными в зоне пережима воздушного тракта, мазутную форсунку 10, установленную внутри трубы 5. При этом распылительная часть форсунки 10 установлена с возможностью осевого перемещения относительно амбразуры 3 к ее выходу с помощью регулировочного механизма, представляющего собой соединение винт-гайка 11 и расположенного на трубе 5 и форсунке 10. Горелка оборудована каналом 12 с заслонкой 13, через который в отверстие 14, выполненное в основании амбразуры 3, подают рециркулирующие газы в зону горения газа и мазута. Дополнительно в смешивательной камере 4 горелка оснащена специальной трубой 15 с распылителем 16 пара в зону горения.

Для снижения выбросов  $NO_x$  подаются рециркулирующие дымовые газы через канал 12 с заслонкой 13 в отверстие 14 у основания амбразуры. В то же

время в целях уменьшения образования продуктов неполного горения через трубу 15 с распылителем 16 подают пар в зону горения топлива, который способствует полному выгоранию сажи, углеводородов, оксида углерода за счет образуемых при диссоциации воды радикала Н и гидроксила ОН в зоне горения. С учетом этого в новой газомазутной горелке существенно снижаются выбросы не только  $\text{NO}_x$ , но и обеспечивается полнота сжигания газа и мазута, а это значительно повышает экологическую эффективность предлагаемой горелки. Авторскую конструкцию горелки следует рекомендовать к применению на предприятиях отрасли, как отличающуюся от аналогов новизной и невысокими затратами на реконструкции.

Таким образом, представленные в работе инновационные технические решения могут быть успешно использованы на трубчатых печах, работающих на газе и мазуте на нефтегазовых предприятиях.

### **Список литературы**

1. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. – СПб.: Недра, 1998. – 312 с.
2. Катин В.Д. Проблемы сокращения вредных выбросов в атмосферу из нефтезаводских печей. – Хабаровск: ТОГУ, 2019. – 192 с.
3. Катин В.Д., Журавлев А.А. Рециркуляция дымовых газов в новых топливосжигающих устройствах на НПЗ как способ сокращения выбросов оксидов азота // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2022. – №6. – С. 39-42.
4. Патент №158820 РФ. Газомазутная горелка / А.Ю. Березуцкий, В.Д. Катин. – Заявка №2015129154 от 16.07.2015; опубл. 20.01.2016, Бюл. №2.

### Сведения об авторах:

*Катин Виктор Дмитриевич* – д.т.н., профессор, профессор кафедры «Техносферная безопасность»;

*Журавлев Александр Александрович* – аспирант.

## ПРОВЕДЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ В УСЛОВИЯХ РЕЗОНАНСА В СТАТИЧЕСКИХ СМЕСИТЕЛЯХ

*Никифоров А.О., Донова М.Е.*

*Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург*

**Ключевые слова:** волнообразный канал, колебательная модель (маятник), диспергирование слюды, роторно-пульсационный аппарат, переработка отходов слюды, гидрофобизация древесноволокнистых плит.

**Аннотация.** На основании экспериментальных данных для потока жидкости через три типа волнообразных канала в области чисел  $100 < Re < 10000$  и, применяя механическую колебательную модель к потоку жидкости через волнообразные каналы, установлена резонансная частота для продольных колебаний несжимаемой жидкости. Таким образом, установленная резонансная частота позволяет проводить массообменные процессы в статических смесителях с большей интенсивностью.

## CARRYING OUT CHEMICAL TECHNOLOGY PROCESSES UNDER RESONANCE CONDITIONS IN STATIC MIXERS

*Nikiforov A.O., Donova M.E.*

*Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint-Petersburg*

**Keywords:** wave-like channels, vibrational model (pendulum), mica dispersion, rotary-pulsation apparatus, mica waste recycling, hydrophobization of fiberboards.

**Abstract.** Based on experimental data for fluid flow through three types of wave-like channels in the range of numbers  $100 < Re < 10000$  and applying a mechanical oscillatory model to fluid flow through wave-like channels, a resonant frequency for longitudinal vibrations of an incompressible fluid is established. Thus, the established resonant frequency allows mass transfer processes to be carried out in static mixers with greater intensity.

Статические смесители сочетают в себе одновременно высокую производительность, низкую энергоёмкость, компактность, надёжность в эксплуатации, простоту в изготовлении и обслуживании [1, 2]. Однако в последнее время появилась резонансная аппаратура для процессов в жидкофазных системах, которая предполагает более полное использование вводимой в аппарат энергии [3]. При этом резонанс в одних условиях должен создаваться на макроуровне – в системе элементы аппарата – рабочая среда, в других – на микроуровне, например, в системе вибрирующая поверхность – микрообъём рабочей среды.

Из результатов экспериментальной работы [4], в которой исследовался поток жидкой системы через три типа волнообразных канала, в сравнении с прямым каналом при одинаковой производительности насоса в области чисел  $100 < Re < 10000$ , видно, что коэффициент трения в волнообразных каналах выше, чем в прямом, при данном числе  $Re$  и эта тенденция более заметной с увеличением сдвига по фазе.

Для любого канала коэффициент трения уменьшается с увеличением  $Re$  до  $Re = 350$ . При  $Re > 350$  значение коэффициента трения постепенно возрастает и затем становится постоянным. Эти явления можно объяснить образованием вихрей около гребней и впадин. При  $Re < 350$  вихри переходят из устойчивого в неустойчивое движение. Влияние сдвига по фазе на массоперенос для всех волнообразных каналов почти одинаково. Используя метод регрессивного анализа, получена зависимость:

$$Sh = 0.18 Re^{0.71} Sc^{0.33}, \quad (1)$$

где:  $Sh$  – критерий Шервуда;  $Re$  – критерий Рейнолдса;  $Sc$  – критерий Шмидта.

Числа Шервуда для всех волнообразных каналов превышают числа Шервуда для прямого канала. При  $Re \approx 370$  наблюдается резкое увеличение массопередачи. Применяя механическую колебательную модель (маятник) к волнообразным каналам, можно определить собственную частоту продольных колебаний несжимаемой среды как:

$$\omega = \sqrt{\frac{2g}{l}}, \quad (2)$$

где  $\omega$  – частота колебаний,  $1/c$ ;  $g$  – ускорение свободного падения, равно  $9,8$  м/с;  $l$  – длина маятника, м.

Выбирая в качестве длины маятника, длину волны волнообразного канала, тогда по формуле

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,8}{28 \cdot 10^{-3}}} \approx 26,5 \frac{1}{c}, \quad (3)$$

С другой стороны, используя формулу для расчета  $Re$ , как:

$$Re = \frac{n \cdot h^2 \cdot \rho}{\mu}, \quad (4)$$

где  $n$  – частота  $1/c$ ;  $h$  – среднее расстояние между стенками волнообразного канала, м;  $\rho$  – плотность, равная  $1000$  кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости, равный  $10^{-2}$  Па·с (рабочая среда глицерин-вода).

Определяя  $Re \approx 370$ , при котором коэффициент массопередачи максимален. Получаем из уравнения (3):

$$n = \frac{Re \cdot \mu}{h^2 \cdot \rho} = \frac{370 \cdot 10^{-2}}{(13 \cdot 10^{-3}) \cdot 10^3} = 21,9 (c^{-1}), \quad (5)$$

Сравнивая значения, определенные по формуле (4) и (5) нетрудно заметить совпадение величин.

Таким образом, получена зависимость, описывающая массоперенос в соответствующем статическом смесителе (волнообразные каналы).

Установлена резонансная частота для более полного использования вводимой энергии в статический смеситель с целью повышения массопередачи. Рассматривая результаты, следует отметить, что ряд таких процессов, как отбелка, перемешивание и диспергирование, приготовление суспензий для проклейки (канифольных, канифольно-парафиновых и т.п.), растворение, экстрагирование из продуктов осмола, эмульгирование можно проводить в подобной резонансной аппаратуре.

Дополнительным немаловажным аргументом является невысокая стоимость конструктивных разработок и технологии изготовления статических смесителей.

#### **Список литературы**

1. Статические смесители. Технологическое смешение и реакционные технологии | Sulzer Chemtech [Электронный ресурс]. – URL: <https://tisys.ru/upload/uf/1ac/Статические%20смесители%20SULZER.pdf>.
2. Матвиенко О.В., Ромащенко В.А. Математическое моделирование турбулентного смешения в статическом смесителе // Инженерно-физический журнал. – 2022. –Т. 95, №6. – С. 1492.
3. Абиев Р.Ш. Резонансная аппаратура для процессов в жидкофазных смесителях: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. – Санкт-Петербург: СПбГТИ, 2000. – 20 с.
4. Nishimina T., Kajimoto Y., Kawamura Y., Mass transfer enhancement with a wavy wall // J. Chem. Eng. Jap. 1986, vol. 19, no. 2, pp. 142-144.

#### Сведения об авторах:

*Никифоров Аркадий Олегович* – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой ПАХТ;

*Донова Марина Евгеньевна* – инженер кафедры ПАХТ.



УДК 621.926:678.633.524.6/9

## ВАЛЬЦОВЫЙ СТАНОК ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ ПРИ ВЫДЕЛЕНИИ ВОЛОКОН ДЛЯ АРМИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Чащиллов Д.В.<sup>1</sup>, Чащилова В.Д.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем химико-энергетических технологий  
Сибирского отделения Российской академии наук, Бийск;

<sup>2</sup>Средняя общеобразовательная школа №3, Бийск

**Ключевые слова:** крапива двудомная, лубяные волокна, механический реттинг, костра, армирующий наполнитель, полимерный композиционный материал.

**Аннотация.** При механическом реттинге стебли крапивы двудомной (*Urtica dioica L.*) пропускают между валками вальцового станка. Происходит механическая обработка, с ослаблением связи между эпидермой, лубяным слоем и ксилемной частью стебля. Обработка позволяет сравнительно легко выделять лубяной слой и лубяные волокна, отделяя их от эпидермиса. Ксилемная часть стебля образует крапивную костру. Выделенные таким образом лубяные волокна крапивы могут быть использованы в качестве армирующего наполнителя полимерных композиционных материалов.

## ROLLER MACHINE FOR MECHANICAL PRETREATMENT OF VEGETABLE RAW MATERIALS IN THE EXTRACTION OF FIBERS FOR REINFORCEMENT OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

Chashchilov D.V.<sup>1</sup>, Chashchilova V.D.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Problems of Chemical and Energy Technologies of the Siberian Branch  
of the Russian Academy of Sciences, Biysk;

<sup>2</sup>Secondary school No. 3, Biysk

**Keywords:** nettle is dioecious, bast fibers, mechanical rating, bonfire, reinforcing filler, polymer composite materials.

**Abstract.** With a mechanical rating, the stems of nettle (*Urtica dioica L.*) are passed between the rolls of a roller machine. Mechanical processing occurs, with a weakening of the connection between the epidermis, the bast layer and the xylem part of the stem. The treatment makes it relatively easy to isolate the bast layer and bast fibers, separating them from the epidermis. The xylem part of the stem forms a nettle bonfire. Nettle bast fibers isolated in this way can be used as a reinforcing filler of polymer composite materials.

В последние годы активно развивается направление создания и исследования полимерных композиционных материалов (ПКМ). Такие материалы состоят из полимерной матрицы и армирующего наполнителя. Одними из наиболее перспективных видов наполнителя ПКМ являются растительные волокна. Такие волокна могут быть использованы в различных масштабах – технические, элементарные волокна, микроволокна и нановолокна. Основой волокон любых размеров является целлюлоза [1].

В стебле растения волокна являются структурным каркасом. Они составляют основу всех механических тканей любого растения. Одними из

наиболее прочных являются технические и элементарные лубяные волокна. Они образуют особый лубяной слой некоторых растений. В частности, лубяные волокна есть в стебле льна, конопли, а также крапивы [2]. Снаружи лубяной слой покрыт слоями эпидермиса и протодермы, с другой стороны находится одревесневшая часть, условно называемая ксилемой (для конопли и крапивы), а также пористая паренхима [3].

Растительные лубяные волокна могут быть выделены из стебля растений различными способами. Используют механический, микробиологический и химический реттинг [4]. Также иногда используют водную обработку – водяной реттинг.

Механический реттинг – один из наиболее доступных. С сырого стебля слой луба (с эпидермой) обычно снимается без значительных усилий. Но при этом может происходить частичное механическое повреждение лубяного слоя. При обработке сухого сырья может потребоваться его предварительное увлажнение и отволаживание. Таким образом, проблемой является необходимость дополнительной обработки растительного сырья при выделении лубяных волокон. Актуальность проблемы обусловлена востребованностью таких растительных волокон для использования в качестве армирующего наполнителя ПКМ [5].

Цель данной работы – проведение предварительной обработки стеблей растений перед механическим реттингом лубяных волокон.

Одним из вариантов является использование дополнительного устройства для предварительной механической обработки растительного сырья. Например, может быть применена машина вальцового типа.

Использовался оригинальный вальцовый станок с двумя валками. Диаметр валков составляет 63 мм. Ширина валков – 40 мм. Каждый из валков установлен на своем валу, каждый из которых закреплен в подшипниковых опорах. Валки выполнены приводными, могут вращаться навстречу друг другу, посредством зубчатого зацепления. Один из валков имеет ручной привод через рукоятку, закреплённую на его валу.

Стебли крапивы освобождались от листьев, заправлялись между валками и, посредством направленного вращения рукоятки, протягивались между валками. При протягивании стебля, происходит ослабление связи между механическими тканями растения. Также, обработанный стебель становится практически плоским. Также, видимо, происходит механическая активация, которая может способствовать ускорению последующей гидротермической, химической или термохимической обработки [6].

Затем стебли вручную разделялись, при этом отделялся лубяной слой. Лубяной слой дополнительно аккуратно очищался от частиц костры и эпидермы, а затем подсушивался. Волокна лубяного слоя, в качестве армирующего наполнителя, использовались для приготовления опытных образцов ПКМ.

В заключение можно отметить, что в качестве предварительной механической обработки растительного сырья может быть использован вальцовый станок. Обработка стеблей приводит к ослаблению связи между механическими тканями стебля растения, что значительно облегчает

последующий механический реттинг Выделенный лубяной слои или лубяные волокна пригодны для использования в качестве армирующего наполнителя в полимерных композиционных материалах.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ для ИПХЭТ СО РАН, № государственной регистрации 121061500030-3, при использовании оборудования Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

#### Список литературы

1. Keijsers E.R.P., Yilmaz G., Van Dam J.E.G. The cellulose resource matrix // Carbohydrate Polymers. 2013, vol. 93(1), pp. 9-21. DOI: 10.1016/j.carbpol.2012.08.110.
2. Prasad L., Kumain A., Patel R.V., Yadav A., Winczek J. Physical and Mechanical Behavior of Hemp and Nettle Fiber-Reinforced Polyester Resin-based Hybrid Composites // Journal of Natural Fibers. 2020, vol. 19, iss. 7, pp. 2632-2647. DOI: 10.1080/15440478.2020.1821284.
3. Lev-Yadun S. Plant fibers: initiation, growth, model plants, and open questions // Физиология растений. – 2010. – Т. 57, №3. – С. 323-333. – DOI: 10.1134/S1021443710030015.
4. Чащилов Д.В., Бычин Н.В. Сравнительное исследование термического разложения лубяных волокон и костры из стебля крапивы двудомной (*Urtica dioica* L.), обработанного горячей водой в жидком состоянии // Южно-Сибирский научный вестник. – 2022. – № 1(41). – С. 36-44. – DOI 10.25699/SSSB.2022.41.1.011.
5. Amiandamhen S.O., Meincken M., Tyhoda L. Natural fibre modification and its influence on fibre-matrix interfacial properties in biocomposites materials // Fibers and polymers. 2020, vol. 21, no. 4, pp. 677-689. DOI: 10.1007/s12221-020-9362-5.
6. Ruiz H.A. Conrad M., Sun S.N. et al. Engineering aspects of hydrothermal pretreatment: From batch to continuous operation, scale-up and pilot reactor under biorefinery concept // Bioresource Technology. 2020, vol. 299, pp. 122685. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122685.

#### Сведения об авторах:

*Чащилов Дмитрий Викторович* – к.т.н., ведущий инженер лаборатории материаловедения минерального сырья;

*Чащилова Виктория Дмитриевна* – ученица.

## ЭКСТРАКЦИОННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ГИДРОТРОПНОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЛИГНИНА ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ ПРИ ВЫДЕЛЕНИИ ВОЛОКОН ДЛЯ АРМИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Чащиллов Д.В.<sup>1</sup>, Манухина К.С.<sup>2</sup>, Назмутдинов Р.А.<sup>2</sup>, Кораблин А.А.<sup>2</sup>,  
Злочевский Л.А.<sup>2</sup>, Павлов И.Н.<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Институт проблем химико-энергетических технологий  
Сибирского отделения Российской академии наук, Бийск;*

*<sup>2</sup>Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного  
технического университета им. И.И. Ползунова, Бийск*

**Ключевые слова:** делигнификация, нативный лигнин, регенерация экстрагента, растительные волокна, армирующий наполнитель, полимерный композиционный материал.

**Аннотация.** Экстракционная установка состоит из экстрактора, бака свежего экстрагента и сборника отработанного экстрагента. В экстрактор с навеской растительного сырья, циклически подаются порции свежего экстрагента, лигнин экстрагируется и вместе с экстрагентом отводится в сборник отработанного экстрагента. При регенерации отработанного экстрагента выделяется нативный лигнин. Делигнифицированные растительные волокна могут быть использованы в качестве армирующего наполнителя полимерных композиционных материалов.

## EXTRACTION INSTALLATION FOR HYDROTROPIC FRACTIONATION OF LIGNIN FROM PLANT RAW MATERIALS IN THE EXTRACTION OF FIBERS FOR REINFORCEMENT OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

*Chashchilov D.V.<sup>1</sup>, Manukhina K.S.<sup>2</sup>, Nazmutdinov R.A.<sup>2</sup>, Korablin A.A.<sup>2</sup>,  
Zlochevsky L.A.<sup>2</sup>, Pavlov I.N.<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Institute of Problems of Chemical and Energy Technologies of the Siberian Branch  
of the Russian Academy of Sciences, Biysk;*

*<sup>2</sup>Biysk Institute of Technology (branch) of the Altai State Technical University  
named after I.I. Polzunov, Biysk*

**Keywords:** delignification, native lignin, extractant regeneration, plant fibers, reinforcing filler, polymer composite material.

**Abstract.** The extraction unit consists of an extractor, a tank of fresh extractant and a collection of spent extractant. Portions of fresh extractant are cyclically fed into the extractor with a suspension of vegetable raw materials, lignin is extracted and, together with the extractant, is discharged into the collection of spent extractant. During the regeneration of the spent extractant, native lignin is released. Delignified plant fibers can be used as a reinforcing filler of polymer composite materials.

Одним из основных направлений современного развития является модель циркулярной или круговой экономики. В соответствии с её принципами, при переработке любого сырья не должно образовываться отходов [1]. В частности, из легко возобновляемой биомассы возможно извлечение растительных волокон. Они могут быть получены из стеблей, листьев, плодовых оболочек семян

растений. Последние могут быть использованы в качестве армирующего наполнителя для композиционных материалов (ПКМ) [2].

Основой волокон является целлюлоза – биополимер на основе D-глюкозы. Микроволокна целлюлозы являются «строительным» материалом клеточной стенки растений [3]. В клетках целлюлозные волокна покрыты защитным слоем лигнина – также природного полимера, но на основе фенилпропана. Его остаточное присутствие в растительных волокнах ухудшает межфазную связь армирующего наполнителя в полимерной матрице, что снижает прочность изделий из ПКМ [4]. Обычно, при обработке растительного сырья, лигнин считают отходом. Делигнификацию растительного сырья проводят, например, путём щелочного гидролиза или другим способом, постепенно удаляя лигнин. Лигнин химически модифицируется, переходя в варочный раствор. Свойства его существенно меняются, а также затруднено извлечение из регенерируемого раствора. В совокупности таких обстоятельств, лигнин полезно практически не используется.

В то же время существует возможность выделить из растительной биомассы лигнин практически в нативном виде. Известно, что лигнин, не претерпевая при этом химической модификации, может растворяться в горячих водных растворах бензоата натрия [5]. Последний является распространённой пищевой добавкой. Химически – это соль бензойной кислоты, что обуславливает сродство с фенилпропановыми звеньями лигнина. Проблемой является возможность обратного высаждения лигнина из раствора экстрагента при понижении температуры. Актуальность проблемы обусловлена необходимостью дополнительных процедур по повторному растворению такого лигнина, что усложняет процесс.

Цель данной работы – разработка автоклавной установки, пригодной для проведения гидротропной экстракции лигнина из растительного сырья.

Экстракционная установка состоит из трёх сосудов – непосредственно экстрактора, расходного бака свежего экстрагента и сборника отработанного экстрагента. Также имеется необходимая коммутационная трубопроводная арматура и измерительные приборы. Установка – периодического действия.

В экстрактор помещается навеска обрабатываемого сырья. Из расходного бака проводится подача свежего экстрагента. В экстракторе происходит обработка сырья с извлечением лигнина. Экстрагент с лигнином попадает в сборник отработанного лигнина. В экстрактор подаётся новая порция свежего экстрагента и цикл обработки повторяется. Таким образом, растительное сырьё обрабатывается экстрагентом при постоянной температуре, что практически исключает возможность повторного осаждения экстрагированного лигнина.

После завершения последнего цикла экстракции навеска делигнифицированного растительного сырья извлекается из экстрактора, дополнительно промывается и используется в качестве армирующего наполнителя для ПКМ. Отработанный экстрагент охлаждается, что приводит к осаждению части экстрагированного лигнина. При разбавлении отработанного экстрагента водой растворимость лигнина резко снижается, и он также

осаждается из раствора. Путем упаривания раствор может быть регенерирован и использован повторно.

Таким образом, описанная экстракционная установка может быть использована для проведения делигнификации растительного сырья с выделением практически нативного лигнина. Делигнифицированное таким образом сырьё принципиально может быть использовано для армирования ПКМ.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ для ИПХЭТ СО РАН, № государственной регистрации 121061500030-3, при использовании оборудования Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

#### Список литературы

1. Zhou Y.H., Stanchev P., Katsou E., Awad S., Fan M.Z. A circular economy use of recovered sludge cellulose in wood plastic composite production: Recycling and eco-efficiency assessment // *Waste Management*. 2019, vol. 99, pp. 42-48. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.08.037.
2. Bourmaud A., Shah D.U., Beaugrand J., Dhakal H.N. Property changes in plant fibres during the processing of bio-based // *Industrial Crops and Products*. 2020, vol. 154, p. 112705. DOI: 10.1016/j.indcrop.2020.112705.
3. Keijsers E.R.P., Yilmaz G., Van Dam J.E.G. The cellulose resource matrix // *Carbohydrate Polymers*. 2013, vol. 93(1), pp. 9-21. DOI: 10.1016/j.carbpol.2012.08.110.
4. Amiandamhen S. O., Meincken M., Tyhoda L. Natural fibre modification and its influence on fibre-matrix interfacial properties in biocomposites materials // *Fibers and polymers*. 2020, vol. 21, no. 4, pp. 677-689. DOI: 10.1007/s12221-020-9362-5.
5. Денисова М.Н., Кухленко А.А., Павлов И.Н. Исследование влияния параметров гидротропной делигнификации на физико-химические характеристики целлюлозы из шелухи овса // *Ползуновский вестник*. – 2017. – № 2. – С. 95-98.

#### Сведения об авторах:

*Чацилов Дмитрий Викторович* – к.т.н., ведущий инженер лаборатории материаловедения минерального сырья;

*Манухина Ксения Сергеевна* – студентка;

*Назмутдинов Руслан Аенварович* – студент;

*Кораблин Арсений Александрович* – студент;

*Злочевский Леонид Анатольевич* – студент;

*Павлов Игорь Николаевич* – к.т.н., доцент кафедры машин и аппаратов химических и пищевых производств.

## ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ НА ИЗМЕРЕНИЕ ИМПЕДАНСА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СЕНСОРНЫХ УСТРОЙСТВ

*Трясцын А.Ю., Ремизова О.А., Томаев В.В.*

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет), Санкт-Петербург*

**Ключевые слова:** влияние факторов, микросхема AD5933, Arduino UNO, атмосферные условия, импедансная спектроскопия.

**Аннотация.** В работе рассматривается влияние факторов внешней среды на измерение импеданса электрохимических сенсорных устройств. Основными факторами являются атмосферные условия, такие как температура, давление и влажность. Кроме атмосферных условий так же рассматриваются основные особенности, которые необходимо учитывать при измерении электрического импеданса. Результаты исследования позволят учитывать рассматриваемые факторы при проведении измерений.

## INFLUENCE OF ENVIRONMENTAL FACTORS ON IMPEDANCE MEASUREMENT OF ELECTROCHEMICAL SENSOR DEVICES

*Triastsyn A.Yu., Remizova O.A., Tomaev V.V.*

*Saint-Petersburg State Institute of Technology, Saint-Petersburg*

**Keywords:** influence of factors, AD5933 chip, Arduino UNO, atmospheric conditions, impedance spectroscopy.

**Abstract.** The paper examines the influence of environmental factors on the impedance measurement of electrochemical sensor devices. The main factors are atmospheric conditions such as temperature, pressure and humidity. In addition to atmospheric conditions, the main features that must be taken into account when measuring electrical impedance are also discussed. The results of the study will allow us to take into account the factors under consideration when making measurements.

Импедансная спектроскопия является уникальным и полезным инструментом в современной научной и технической сфере. Она широко используется в различных областях, таких как электрохимия, электроника, материаловедение, биология и медицина, криминалистика и других. В электрохимии она применяется для исследования электрохимических процессов, таких как кинетика реакций, транспорт ионов и электронов в электролитах, свойства электродов и электролитических систем. В электронике импедансная спектроскопия применяется для анализа электрических свойств компонентов цепи в широком диапазоне частот. В материаловедении позволяет исследовать электрические свойства материалов и структур (например, полупроводников, диэлектриков, металлов). Данное исследование может использоваться для определения структурных характеристик материалов, оценки электрической проводимости и диэлектрических свойств, а также контроля качества и процессов синтеза материалов. В биологии и медицине импедансная спектроскопия применяется для изучения биологических систем (клетки, ткани и органы). Позволяет исследовать электрические свойства биологического материала, его состав и структуру. Это может быть полезным для диагностики и классификации

опухолей, изучения электрической активности нервной системы, мониторинга жизненно важных функций организма и разработки биосенсоров.

Современные разработки в области импедансной спектроскопии включают автоматизацию и миниатюризацию измерительной аппаратуры, развитие новых методов анализа и обработки данных, а также применение многоканальных систем исследования.

В работе [1] описан разработанный макет импедансметра на основе микроконтроллера Arduino UNO и микросхемы AD5933. Так как данная разработка позиционируется, как прототип портативного устройства и проведение измерения возможно в «полевых условиях» необходимо компенсировать влияние факторов окружающей среды при проведении измерений. Именно поэтому в работе предполагается выделить основные факторы окружающей среды и оценить их влияние на результаты импеданса.

В данной работе рассмотрены основные факторы окружающей среды, вносящие наибольшие изменения в получаемые значения импеданса.

Первым значащим фактором являются *атмосферные условия*, такие как влажность, температура, и давление.

Влажность оказывает прямое влияние на импеданс сенсора, как активного элемента. Например, в работе [2] рассматривается влияние влажности на спектральные характеристики импеданса зерен пшеницы. В сухом зерне с влажностью меньшей 14% действительная часть проводимости отсутствует за счет большой величины электрического сопротивления ( $R > 10^8$  Ом), здесь имеет место только реактивная составляющая. Это означает, что сухое зерно – это диэлектрик. В увлажненных зернах наблюдается активная часть проводимости. При этом следует отметить следующие особенности, которые связаны с частотой возбуждения и отражающие внутреннюю структуру зерен пшеницы и распределение в них воды, ионизированной примесями.

Таким образом, причинами влияния влажности на изменение импеданса может служить следующее.

1. Диффузия ионов. Влага в окружающей среде сенсора может повлиять на скорость диффузии ионов в электролитическом растворе. Более высокая влажность может способствовать улучшению диффузионных свойств электролита, что положительно сказывается на проводимости ионов в растворе. Это может существенно повысить точность и чувствительность измерений сенсора.

2. Поляризация электродов. Влага может также влиять на электродные свойства сенсора, вызывая изменение поляризации электродов. Возможны различные механизмы, такие как процессы окисления/восстановления и электролитические реакции, которые могут быть влиянием влаги. Это может привести к изменению импеданса сенсора и его электрохимическому поведению.

3. Изменение электрических свойств материалов. Влага может вызывать изменение электрических свойств материалов, используемых в сенсоре. Например, диэлектрическая проницаемость материала может изменяться в зависимости от содержания влаги, что влияет на его электрическую



проводимость и электрический импеданс. Такие изменения могут быть учтены при анализе данных и интерпретации результатов измерений.

4. Коррозия и окисление. Высокая влажность может привести к ускоренной коррозии и окислению материалов, используемых в сенсоре. Это может привести к изменению поверхностных свойств электродов и снижению их электрохимической активности. Такие изменения могут негативно сказаться на качестве измерений и надежности сенсора.

Температура, как и влажность, так же оказывает прямое влияние на изменение импеданса. Например, в работе [3] рассматривается влияние температуры на изменение электрического импеданса паренхимных тканей овощей.

Основными причинами влияния температуры на импеданс являются:

1. Ионная проводимость. Повышение температуры обычно приводит к увеличению ионной проводимости раствора в электролите сенсора. Увеличение проводимости может снизить сопротивление электролита и улучшить электродные реакции, что, в свою очередь, может изменить импеданс сенсорного устройства.

2. Кинетические процессы. Температура также влияет на скорость кинетических процессов в электрохимических реакциях, происходящих на электродах сенсора. Увеличение температуры может ускорить реакции окисления, восстановления и разрядки, что изменит электрохимическую активность сенсора и его импеданс.

3. Диффузия ионов. При повышении температуры диффузионные процессы ионов в растворе становятся более интенсивными. Это снижает омическое сопротивление и увеличивает подвижность ионов, влияя на импеданс сенсора. Однако также возможно увеличение электролитических потерь из-за более высокой температуры, что может сказаться на точности измерений.

4. Термическое расширение. Изменение температуры также вызывает термическое расширение материалов, из которых состоит сенсорное устройство. Это может приводить к изменению геометрии электродов и изменению плотности электролита, что может повлиять на импеданс сенсора.

В работе [4] так же исследуется влияние температуры на электрохимический импеданс. В данной работе электрический импеданс является характеристикой топливного элемента с протонообменной мембраной. Результаты показали, что, чем выше температура ячейки, тем большую степень специфичности емкостного реактивного сопротивления проявляет двойной электрический слой.

Импеданс – суммарное сопротивление (индуктивности, емкости и активной составляющей), которое препятствует прохождению тока через среду. В случае газа или жидкости изменение давления может приводить к изменению плотности среды, что вызывает изменения импеданса в некотором диапазоне частот. В твердых телах при изменении давления может наблюдаться деформация материалов, а, следовательно, изменение электрической проводимости. Таким образом давление окружающей среды также может влиять на изменение импеданса.

Помимо влияния рассмотренных ранее факторов при проведении измерений необходимо принимать во внимание следующие особенности.

1) Частота измеряемого сигнала. Область частот должна быть, по возможности, наиболее широкой.

2) Линейность и нелинейность измеряемой системы. При измерении нелинейных систем обнаруживаются гармоники на выходящем сигнале, которые могут влиять на изменение результата измерения.

3) Ложные сигналы. Любой компонент любой цепи не является чисто активным или реактивным, он является комбинацией этих элементов импеданса.

Результаты данного исследования позволят учесть факторы внешней среды, влияющие на проведение измерений, и создают предпосылки к созданию алгоритмов обработки выходных сигналов для макета, рассматриваемого в работе [1].

**Финансирование.** Исследование выполнено при поддержке гранта АС "Фонд-М" 218974ГУ/2023.

#### Список литературы

1. Трясцын А.Ю., Ремизова О.А., Томаев В.В., Мякин С.В. Разработка портативного устройства для измерения импеданса и исследования электрохимических сенсоров // Математические методы в технологиях и технике. – 2022. – №10. – С. 16-18. – DOI: 10.52348/2712-8873\_ММТТ\_2022\_10\_16.
2. Ничкова Н.М. Влияние влажности на спектральные характеристики электрического импеданса зерен пшеницы // Материалы XV Международной научно-практической конференции молодых ученых. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2022. – С. 204-207.
3. Голев И.М., Бобкина Е.Ю. Температурная зависимость электрического импеданса паренхимных тканей овощей // Естественные и математические науки в современном мире. – 2012. – №1. – С. 103-208.
4. Qian Liu, Hong Sun, Zheng Nan Jin, Li Hua Luan Effects of Temperature on the Impedance of PEM Fuel Cell // Manufacturing Science and Technology, AEMT2011. 2011, pp. 2002-2006.

#### Сведения об авторах:

*Ремизова Ольга Александровна* – к.т.н., доцент, доцент кафедры автоматизации процессов химической промышленности;

*Трясцын Андрей Юрьевич* – магистр;

*Томаев Владимир Владимирович* – к.ф.-м.н., доцент кафедры теоретических основ материаловедения.

УДК 630.3

## МОДУЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БОРЬБЫ С ЛЕСНЫМИ ПОЖАРАМИ

*Скобцов И.Г.*

*Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск*

**Ключевые слова:** форвардер, пожарный лафетный ствол, предотвращение лесного пожара.

**Аннотация.** Лесные пожары были и продолжают оставаться серьезной проблемой Республики Карелия. Таким образом, совершенствование технологий и создание современной техники для борьбы с огнем в лесу являются актуальными задачами. Статья посвящена обоснованию разработки модульной системы пожаротушения на базе форвардера «Амкодор» в рамках импортозамещения.

## MODULAR EQUIPMENT FOR FOREST FIRE FIGHTING EFFICIENCY IMPROVING

*Skobtsov I.G.*

*Petrozavodsk State University, Petrozavodsk*

**Keywords:** forwarder, fire-fighting monitor, forest fire prevention.

**Abstract.** Forest fires continue to be a serious regional problem. According to this, the improvement of technology and the designing of modern forest fire fighting machines becomes an actual problem. This paper deals with the development of mobile forest fire preventing system based on forwarder «Amkodor» under import substitution.

Стихийные бедствия в виде лесных пожаров ежегодно наносят большой ущерб бюджету Республики Карелия – как показывают статистические данные, с 2012-2022 г.г. пики пожаров приходились на 2013 и 2021 годы, при этом только в 2021 году площадь, пораженная пожарами, составила более 15 тыс. га [1]. Существует ряд направлений по повышению эффективности борьбы с огнем в лесу. Одним из них является совершенствование технологий и технических средств для тушения лесных пожаров: использование для мониторинга беспилотных летательных аппаратов, применение дистанционно управляемых лафетных стволов и пожарных роботов [2], создание негорючих противопожарных барьеров, искусственное вызывание осадков, создание мобильных установок пожаротушения на базе специальных лесных машин. В последнем случае следует отметить способ повышения эффективности путем установки модульной системы пожаротушения на базе форвардера – трелёвочной машины манипуляторного типа [3].

Особенности применения форвардеров в качестве базовых машин для установки систем борьбы с лесными пожарами могут быть сформулированы следующим образом:

– колесные форвардеры обладают более высокими скоростями перемещения в условиях лесной пересеченной местности по сравнению с гусеничными трелёвочными тракторами – в свою очередь, это позволяет форвардеру быстрее добраться до места возникновения лесного пожара и приступить к его локализации;

– колесные форвардеры имеют более высокий тяговый класс по сравнению с гусеничными лесными машинами, и, следовательно, большую грузоподъемность, что позволяет размещать в грузовом отсеке емкости для огнетушащего вещества большего объема, что, в свою очередь, повышает эффективность борьбы с огнем;

– наличие гидроманипулятора достаточной грузоподъемности позволяет оперативно произвести погрузку и монтаж модульного комплекса для пожаротушения в грузовом отсеке форвардера без использования дополнительных погрузочных приспособлений, усложняющих конструкцию грузовой платформы (рис. 1);

– наличие достаточно вместительного грузового отсека позволяет произвести размещение в нем как емкостей достаточно большого объема, насосной установки, дистанционно управляемого лафетного ствола, входящих в состав мобильного комплекса для тушения лесных пожаров;

– грузовые отсеки большинства форвардеров ведущих производителей имеют сходные конструкции и, таким образом, возникает возможность создания универсальной установки для пожаротушения в виде мобильного комплекса, использование которого возможно как в линейке форвардеров одного производителя, так и форвардеров разных фирм при условии сходной конструкции грузовых отсеков.



Рис. 1. Погрузка модульной установки для пожаротушения в грузовой отсек манипулятором форвардера «Амкодор-2662» (фрагмент испытаний)

Модульная система пожаротушения представляет собой специальное навесное оборудование, которое содержит платформу, на которой установлены дистанционно управляемый лафетный ствол с системой управления, насосная станция (мотопомпа), емкости для огнетушащего вещества [3]. В пожароопасный период установка при помощи манипулятора форвардера размещается в грузовом отсеке и после крепления, подключения системы управления, производится заполнение емкостей огнетушащим веществом и выдвигание к месту возгорания.

Дистанционно управляя подачей огнетушащего вещества, оператор форвардера может устанавливать направление, угол распыления и характер подачи (от водяного тумана до сплошной струи).

Создание модульной установки для тушения лесных пожаров с использованием дистанционно-управляемых лафетных стволов на отечественных форвардерах (например, «Амкодор») позволит повысить эффективность борьбы с огнем в лесу за счет снижения нагрузки на оператора путем механизации процесса управления пожарным стволом, а также за счет сокращения времени на монтаж противопожарного оборудования в грузовом отсеке форвардера.

Исследования, описанные в данной работе, были проведены в рамках проекта «Разработка мобильного комплекса на базе форвардера для тушения лесных пожаров», поддержанного в рамках Программы поддержки НИОКР студентов, аспирантов и лиц, имеющих ученую степень, обеспечивающих значительный вклад в инновационное развитие отраслей экономики и социальной сферы Республики Карелия, в 2023 году, финансируемой Правительством Республики Карелия (код научной темы – КГРК-23/23).

#### **Список литературы**

1. Громцев А.Н., Кузнецов О.Л., Курило Е.А., Полина Е.Г. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2021 году. – Петрозаводск: Министерство природных ресурсов и экологии РК, 2022. – 263 с.
2. Скобцов И.Г., Галактионов О.Н., Сапанкевич П.А. Интеграция дистанционно управляемых лафетных стволов в состав мобильного комплекса на базе форвардера для борьбы с лесными пожарами // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Девятой Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием. – Петрозаводск: ПетрГУ, 2023. – С. 159-162.
3. Скобцов И.Г., Галактионов О.Н., Клюев Г.В., Бошаков И.С. Компонировочная схема установки для пожаротушения на базе форвардера «Амкодор» // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2023. – №63. – С. 333-335.

#### Сведения об авторе:

*Скобцов Игорь Геннадьевич* – д.т.н., доцент, профессор кафедры транспортных и технологических машин и оборудования Института лесных, горных и строительных наук.

## РАСШИРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКИ

*Мерчалов С.В., Прядкин В.И.*

*Воронежский государственный лесотехнический университет  
им. Г.Ф. Морозова, Воронеж*

**Ключевые слова:** дробилка, пневмотранспортная система, сепаратор, фракция, сепарирование, гранулометрический состав, модуль измельчения, затраты энергии.

**Аннотация.** Работа направлена на исследование использования пневмотранспортной системы дробилки для ведения с сепаратором операции промежуточного контроля крупности измельченного зерна. Такая технологическая схема измельчения зерна для кормления животных позволяет уменьшить их потери, за счет качества готового продукта по гранулометрическому составу и хорошего усвоения их животными. В готовом продукте уменьшается содержание крупных фракций в 2-6 раз, по сравнению с прямым измельчением и получается более выровненный гранулометрический состав. При этом энергетические показатели на единицу продукции снижаются до 15%, а также расширяются технологические возможности молотковой дробилки при измельчении зерна.

## EXPANDING THE TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF A HAMMER MILL

*Merchalov S.V., Pryadkin V.I.*

*Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, Voronezh*

**Keywords:** crusher, pneumatic conveying system, separator, fraction, separation, granulometric composition, grinding module, energy consumption.

**Abstract.** The work is aimed at investigating the use of a pneumatic conveying system of a crusher for conducting an intermediate grain size control operation with a separator. Such a technological scheme for grinding grain for feeding animals allows to reduce their losses, due to the quality of the finished product in terms of granulometric composition and good assimilation by animals. In the finished product, the content of large fractions decreases by 2-6 times, compared with direct grinding, and a more aligned granulometric composition is obtained. At the same time, energy indicators per unit of production are reduced to 15%, and the technological capabilities of the hammer crusher are expanded when grinding grain.

Для повышения технологических возможностей молотковой дробилки в схему измельчения зерна вводим дополнительную операцию сепарирования для контроля качества готового продукта. Для такой операции устанавливали в пневмотранспортную систему молотковой дробилку КДМ-2 сепаратор. Технологический процесс работы сепаратора поддерживается энергией потока воздуха с измельченным зерном, поступающего по пневмопроводу.

В последнее время изучается такая схема подготовки зерновых кормов для животноводства с различными конструкциями измельчителей и сепарирующих устройств [1-3].

Разработанный сепаратор имеет вид цилиндра, внутри которого установлена сепарирующая поверхность с кольцевым распределителем, согласно источнику [4]. Внутренние радиусы колец распределителя уменьшаются по ходу

движения обрабатываемого продукта. Устройство кольцевого распределителя позволяет дробить исходный воздушно-продуктовый поток на отдельные потоки, равномерно загружать сепарирующую поверхность и поддерживать определенный скоростной воздушный режим в сепараторе.

Кольцевой распределитель сепаратора состоит из 25 колец с наружным диаметром 0,2 м и начальным внутренним 0,1 м. Расстояние между кольцами 0,025 м. Размеры сепарирующей поверхности: высота – 0,8 м и диаметр – 0,4 м.

Проведены два этапа сравнительных экспериментальных исследования, направленных для выявления влияния установки сепаратора в пневмотранспортную систему дробилки на качественные и энергетические показатели измельчения зерна. Данные исследования были проведены на дробилке КДМ-2 без сепаратора (прямое измельчение) и с установкой воздушно-ситового сепаратора (дробилка + сепаратор). В камеру измельчения дробилки устанавливали решета с диаметром отверстий 2; 4; 6; 8; 10; 12 мм. Это позволяет изменять режим измельчения зерна в дробилке в большом диапазоне от мелкого (решето с диаметром отверстий 2 мм) до самого крупного (решето с диаметром отверстий 12 мм), в сепаратор устанавливали сита с диаметром отверстий 4 мм; 5 мм и с размерами 3x3 мм. Схема измельчения зерна с сепаратором изображена на рисунке 1.

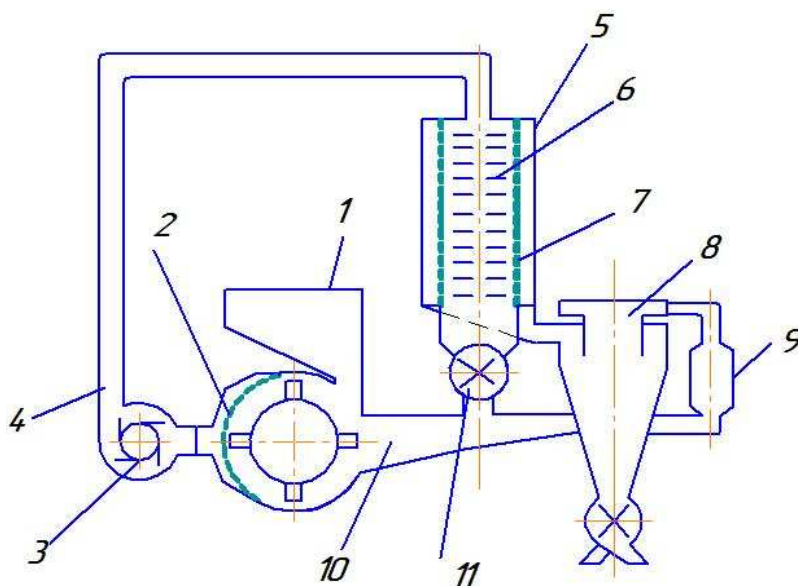


Рис. 1. Схема дробилки с воздушно-ситовым сепаратором: 1 – бункер; 2 – камера измельчения; 3 – вентилятор-швырялка; 4 – пневмопровод; 5 – воздушно-ситовый сепаратор; 6 – кольцевой распределитель; 7 – ситовый цилиндр; 8 – циклон готового продукта; 9 – фильтр воздушный; 10 – патрубок возврата крупной фракции на доизмельчение; 11 – затвор

Принцип работы дробилки с сепаратором следующий. Из бункера 1 зерно транспортируется для измельчения в камеру дробилки 2, где подвергается измельчению и выводится вентилятором – швырялкой 3 через пневмопровод 4 в сепаратор 5. Кольцевой распределитель 6 дробит воздушно-продуктовый поток на несколько потоков и направляет их на ситовый цилиндр 7. На ситовом цилиндре 7 происходит разделение воздушно – продуктовой смеси на крупную фракцию-сход и готовый продукт-проход, который направляется в циклон 8. В



циклоне 8 происходит отделение готового продукта от воздуха. Отделенный воздух очищается от мучной пыли на фильтре 9 и поступает в патрубок возврата крупной фракции на доизмельчение 10. Крупная фракция, поступающая сходом с сит сепаратора 5, затвором 11 направляется в патрубок 10 и транспортируется воздухом на повторное измельчение в камеру измельчения 2.

Качество готовых фракции готового продукта, оценивали для III группы крупности по содержанию остатка крупной фракции в процентах на контрольном сите рассева с диаметром отверстий 3 мм [5].

Готовый продукт после сепаратора, соответствующий III группы крупности, получен при постановке в сепаратор сит с размерами отверстий 4 мм и 3x3 мм, а в камеру измельчения решет диаметром отверстий 6;8;10;12 мм.

На рисунке 2 представлены зависимости влияния режимов измельчения на модуль измельчения  $M$  от диаметра отверстия сит в сепараторе. Можно заключить, что модуль измельчения готового продукта после сепарирования зависит от режима измельчения и диаметра отверстий сит в сепараторе.

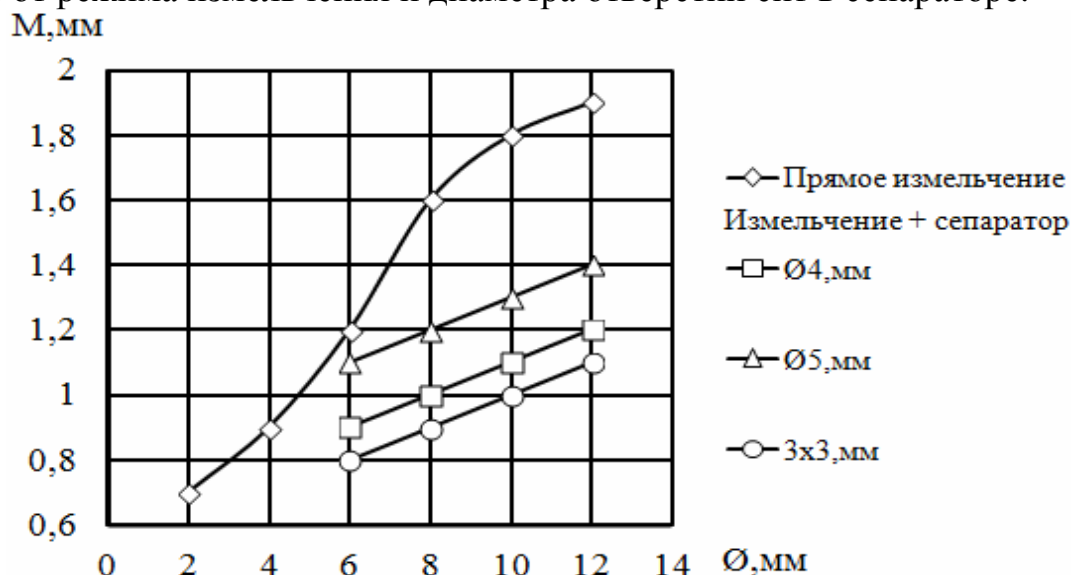


Рис. 2. Влияние режимов измельчения на модуля измельчения  $M$  от диаметра отверстия сит в сепараторе

При постановке в сепаратор сит с размерами отверстий 4 мм; 5 мм и 3x3 мм модуль измельчения увеличивался соответственно с 0,8 до 1,4 мм, а при прямом измельчении до 2 мм. Это указывает на то, что после сепаратора в готовом продукте уменьшается содержание крупных фракций в 2-6 раз, по сравнению с прямым измельчением и получается более выровненным гранулометрический состав.

На рисунке 3 представлены зависимости влияние модуля измельчения  $M$  при прямом измельчении и с применением сепаратора на удельные затраты энергии Ауд. Можно отметить следующее, что удельные затраты энергии на получении готового продукта при работе дробилки с сепаратором уменьшаются при сравнении с прямым измельчением.

Минимальные удельные затраты энергии получены при постановке в сепаратор сит с размерами 3x3 мм. Уменьшение удельных затрат энергии зависит от режимов измельчения в камере дробилки и установки в сепаратор решет с



соответствующими размерами отверстий. Уменьшение составило от 11% до 8% при сравнении с прямым измельчением при одном и том же модуле готового продукта.

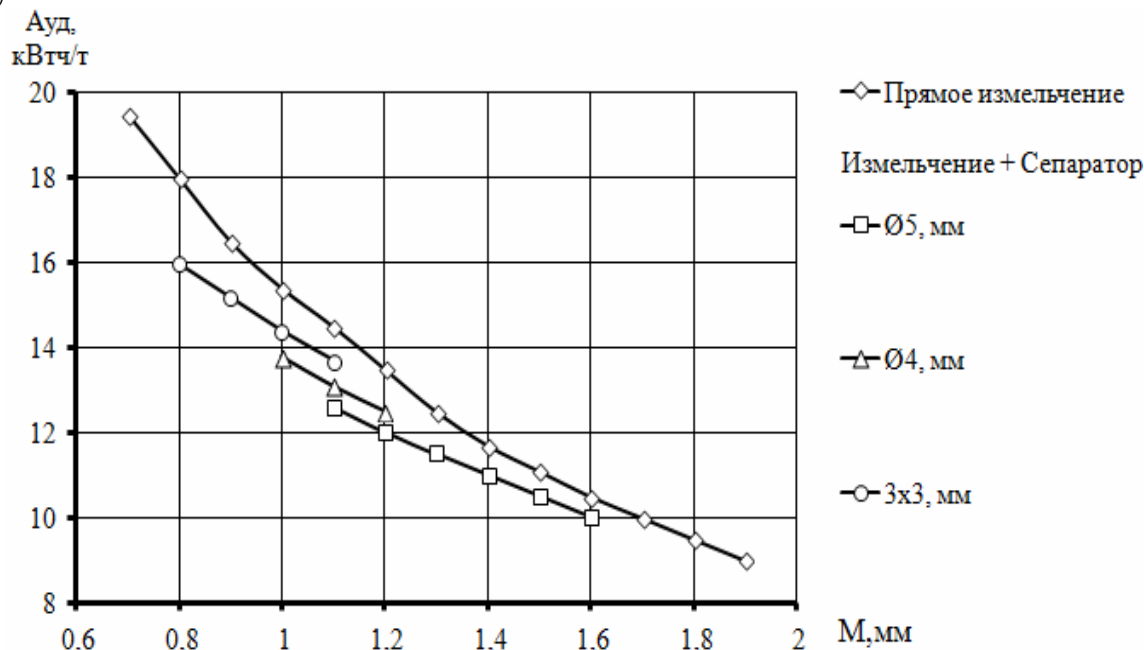


Рис. 3. Влияние модуля измельчения  $M$  при прямом измельчении и с применением сепаратора на удельные затраты энергии  $A_{уд}$

На основе анализа результатов полученных при проведении экспериментальных исследований молотковой дробилки по двум схемам измельчения, можно сделать следующие выводы.

Включение сепарирующего устройства в технологическую схему дробилки позволяет контролировать качество готового продукта по содержанию крупных фракций, уменьшать их в 2-6 раз, удельные затраты энергии при этом уменьшаются от 11% до 8% при сравнении с прямым измельчением.

### Список литературы

1. Федоренко И.Я., Золотарев С.В., Смышляев А.А. Предпосылки к разработке способа промежуточной сепарации продуктов измельчения в дезинтеграторе // Совершенствование технологий и технических средств в АПК: Юбилейный сборник. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2001. – С. 93-95.
2. Sysuev V., Savinyh P., Aleshkin A., Ivanovs S. 2017 Engineering for Rural Development Proceedings // Investigation of oscillations of hammer rotor of grain crusherpp. 2017, pp. 1225-1232.
3. Goodband R.D., Tokach M.D., Nelssen J.L. The effects of diet particle size on animal performance // Feed manufacturing. 1995, no. 2050, p. 156-161.
4. Патент №1509131A1 РФ. Устройство для разделения сыпучих материалов по крупности / А.А. Сундеев, С.В. Мерчалов. – Заявка №4351719/29-03 от 30.12.87; опубл.20.01.93, Бюл. №35.
5. ГОСТ 13496.8-72. Комбикорма. Методы определения крупности размола и содержания неразмолотых семян культурных и дикорастущих растений. – Москва, 2011.

### Сведения об авторах:

Мерчалов Сергей Васильевич – к.т.н., доцент.

Прядкин Владимир Ильич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой.

Научное периодическое издание

# **Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация:**

**Материалы международной  
научно-практической конференции**

№7

Верстка и корректура: ИП Жукова Е.В.

Формат издания 60x84 1/16. Усл. печ. л. 7,09.

Подписано в печать 26.01.24г. Заказ №24-01.

Электронная версия доступна на сайте: <http://srcms.ru/maippsim.html>  
<https://doi.org/10.26160/2587-7577-2024-7>

*Учредитель, издатель и распространитель:* Жукова Елена Валерьевна  
(ИП Жукова Е.В., ИНН 422802805198, ОГРНИП 318420500009778,  
г. Санкт-Петербург).

*Ответственный редактор:* Жуков Иван Алексеевич.

*Редакция:* Научно-исследовательский центр «МашиноСтроение»,  
197372, г. Санкт-Петербург, пр. Комендантский, д. 28, корп. 2, оф. 117.

<http://srcms.ru>

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