

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Магнитогорский государственный технический университет  
им. Г.И. Носова»



MAGNITOGORSK  
ROLLING PRACTICE

Материалы IX международной молодежной  
научно-технической конференции

Под редакцией А.Г. Корчунова

Магнитогорск  
2026

Редколлегия:

Корчунов А.Г. (главный редактор)  
Константинов Д.В.  
Огнева Е.М.

*Материалы трудов конференции индексируются  
Российским индексом научного цитирования и Google Scholar*

**Magnitogorsk Rolling Practice 2026:** материалы IX международной молодежной научно-технической конференции / под ред. А.Г. Корчунова. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2026. 165 с.

ISBN 978-5-9967-3695-9

Представлены материалы докладов IX международной молодежной научно-технической конференции «Magnitogorsk Rolling Practice 2026», посвященной вопросам обработки металлов и сплавов давлением.

ISBN 978-5-9967-3695-9

© Магнитогорский государственный  
технический университет  
им. Г.И. Носова, 2026

### **HYBRID ROLLING PROCESSING FOR HIGH-PERFORMANCE ALUMINUM ALLOYS: MICROSTRUCTURAL EVOLUTION AND ENGINEERING PROPERTY ENHANCEMENT**

**Hailiang Yu<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Central South University, Changsha, China*

<sup>2</sup>*Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials, Nosov Magnitogorsk State  
Technical University, Magnitogorsk, Russia  
e-mail: yuhailiang@csu.edu.cn*

This report presents the research progress on high-performance aluminum alloys enabled by hybrid rolling processing, with a focus on microstructural evolution mechanisms and engineering property breakthroughs. Ultrafine-grained/nanocrystalline aluminum alloys were fabricated by severe plastic deformation techniques, especially cryorolling. The mechanical behaviors of aluminum alloys at cryogenic temperatures were systematically investigated, revealing an unusual ductility improvement contrary to conventional metals. The effects of cryorolling combined with aging treatment on Al-Li, 6xxx, and 7xxx series alloys were explored. Cryorolling significantly refines grains, introduces high-density dislocations, narrows precipitate-free zones, and enhances strength, ductility, corrosion resistance, and fatigue performance. Moreover, cryorolling effectively suppresses cracking in nonferrous alloys. This report provides a feasible processing route for developing high-performance aluminum alloys used in aerospace, cryogenic engineering, and advanced manufacturing fields.

*The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (№ 25-79-31018).*

УДК 539.3

### **ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ ДЛЯ МАТЕРИАЛОВ С АКСИАЛЬНОЙ ТЕКСТУРОЙ**

**Ерисов Я.А., Разживин В.А.**

*ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королева», Самара, Россия  
e-mail: erisov@ssau.ru*

Одной из специфических характеристик, присущей большинству реальных материалов, является анизотропия их свойств, обусловленная кристаллическим строением вещества и последующим его текстурообразованием при больших пластических деформациях [1].

Аксиальная кристаллографическая текстура, формирующаяся при одноосной деформации, типичной для процессов волочения, прессования и осадки, приводит к трансверсальной анизотропии механических свойств [2]. При одноосной деформации ГЦК-металлов, как правило, образуется двухкомпонентная текстура, состоящая из кристаллографических ориентаций  $\langle 111 \rangle$  и  $\langle 100 \rangle$  [3, 4].

Для описания деформационного поведения материалов с аксиальной текстурой разработаны основные соотношения теории пластичности транслопных сред, которые явно учитывают структурные параметры материала и кристаллографическую ориентацию структуры. Величина интенсивности напряжений через константы кристаллической решетки и параметры текстуры будет иметь вид

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \eta (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 4 \left( \frac{5}{4} - \eta \right) \left[ (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 \right] + 4 \left[ \left( \frac{5}{2} - \eta \right) \sigma_{12}^2 - 4 \left( \frac{5}{8} - \eta \right) (\sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2) \right] \right\}^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\eta$  – обобщенный показатель анизотропии,

$$\eta = 1 + \frac{15(A_s - 1)}{4(3 + 2A_s)} \left( \Delta - \frac{1}{5} \right), \quad (2)$$

$A_s$  – параметр анизотропии кристаллической решетки,

$$A_s = \frac{S'_{1111} - S'_{1122}}{2S'_{2323}}. \quad (3)$$

Обычно в реальных металлах наблюдается большее или меньшее отклонение кристаллографической ориентации части кристаллитов от идеального расположения на некоторый угол. Это явление называют рассеянием текстуры. При этом, как показано в [2], при определенном угле рассеяния свойства материала не будут отличаться от свойств, характерных для изотропной среды.

Для учета рассеяния текстуры воспользуемся подходом, предложенным в работе [2]. Примем, что кристаллографическое направление, совпадающее с осью аксиальной текстуры, при рассеянии не выходит за пределы конуса рассеяния, ограниченного углом  $\zeta$ . В этом случае ориентационный фактор  $\Delta'$  аксиальной текстуры с учетом рассеяния описывается формулой

$$\Delta' = \Delta - \frac{5}{4} \left( \Delta - \frac{1}{5} \right) q, \quad (4)$$

где  $\Delta$  – ориентационный фактор идеальной кристаллографической ориентировки;  $q$  – параметр рассеяния текстуры,

$$q = \frac{13}{16} + \frac{1}{32} \frac{1 - \cos 3\zeta}{1 - \cos \zeta} - \frac{7}{160} \frac{1 - \cos 5\zeta}{1 - \cos \zeta}. \quad (5)$$

При идеальной аксиальной текстуре  $q = 0$ .

В данном исследовании были разработаны основные соотношения теории пластичности транслопных сред, учитывающие в явном виде параметры строения материала – упругие константы кристаллической решетки, кристаллографическую текстуру, а также угол рассеяния аксиальной текстуры. Получены частные выражения условия пластичности и уравнений связи

напряжений и деформаций для случаев плоского напряженного и плоского деформированного состояний.

Показано, что кристаллографическая текстура оказывает значительное влияние на форму контура текучести: пластическое течение материала с текстурой  $\langle 111 \rangle$  начинается раньше, а с  $\langle 100 \rangle$  – позже в сравнении с изотропным случаем. При этом степень анизотропии уменьшается со снижением анизотропии кристаллической решетки, а также с увеличением рассеяния текстуры.

*Исследование выполнено за счет гранта FSSS-2026-0006.*

### Список литературы

1. Truskowski W. The Plastic Anisotropy in Single Crystals and Polycrystalline Metals. — Dordrecht: Springer, 2001. – 156 p.
2. Adamesku R.A., Geld P.V., Mityushov Ye.A. Anizotropiya fizicheskikh svoystv metallov. — Moscow: Metallurgiya, 1985. – 137 p.
3. Kocks U.F., Tomé C.N., Wenk H.R. Texture and Anisotropy: Preferred Orientations in Polycrystals and Their Effects on Materials Properties. — Cambridge: Cambridge University Press, 1998. – 668 p.
4. Hu H. Texture of Metals // Texture. — 1974. — Vol. 1. — P. 233–258.

УДК 620.186

## ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕКСТУРЫ И МИКРОСТРУКТУРЫ В АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ НАУЧНОЙ ГРУППЫ ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ СИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ИНДУСТРИАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА

**Арышенский Е.В.**

*ФГБОУ ВО «СибГИУ», Новокузнецк, Россия*

*e-mail: arishenskiy\_ev@sibsiu.ru*

Ключевым направлением группы является изучение влияния термомеханической обработки на формирование микроструктуры при литье и термомеханической обработке. В рамках этого направления проведены исследования закономерностей формирования микроструктуры при горячей прокатке для сплавов систем Al-Mg, Al-Zn-Mg, Al-Mg-Si, Al-Cu, Al-Mn. Установлено влияние режимов термомеханической обработки на субструктуру и зернограничную мобильность. Разработаны подходы к управлению рекристаллизацией с учетом зарождения на границах деформированных зерен, на частицах второй фазы и на участках с неоднородностью деформации [1].

Одним из наиболее перспективных направлений деятельности группы стала работа над грантом РФФИ №24-19-00590 «Изучение закономерностей формирования кристаллографической текстуры и анизотропии механических свойств в процессах холодной листовой штамповки алюминиевых сплавов». Данный проект направлен на изучение эволюции текстуры в процессе операций холодной штамповки. В частности, проведена разработка модели, объединяющей теорию пластичности анизотропных сред, предложенную академиком РАН

Ф.В. Гречниковым с Тейлоровским подходом, выполнены расчеты эволюции текстурных компонент (Cube, Cu, S, Brass) при вытяжке, гибке и отбортовке алюминиевых сплавов. Установлено фундаментальное различие в текстурном поведении низколегированных и высоколегированных сплавов. Показано, что в сплавах с высоким содержанием магния доминирует устойчивая текстура Brass (Bs), практически не изменяющаяся в ходе штамповки. В то же время в малолегированных сплавах при отжиге формируется текстура Cube, которая сохраняется при гибке, но трансформируется в Bs при вытяжке [2]. С помощью моделирования процессов холодной штамповки, в ходе которого варьировались значения ее технологических параметров и содержание текстур Cube и  $\beta$ -фибера, определены оптимальные текстурные композиции и режимы для сплава А5. Оптимальной для вытяжки признана композиция 55% Cube и 45%  $\beta$ -фибера, обеспечивающая максимальное снижение такого технологического показателя, как фестончатость. Для гибки минимальное пружинение достигается при использовании заготовок с доминирующей текстурой Cube, деформируемых вдоль направления прокатки. Также научной группой было исследовано влияние гафния и скандия на формирование микроструктуры в различных группах алюминиевых сплавов. Установлено, что гафний создает термостабилизирующую оболочку вокруг частиц  $Al_3Sc$ , способствует их зародышеобразованию, увеличивает количество дисперсоидов и уменьшает их размеры по сравнению с цирконием, что положительно сказывается на механических свойствах. В сплавах системы Al-Mg-Si с избытком кремния показано, что добавка 0,05 % скандия стабилизирует упрочняющие фазы  $\beta''(Mg_2Si_6)$ , ускоряет формирование зон Гинье – Престона [3].

Таким образом, научная группа «Цветные металлы» СибГИУ ведет системные исследования в области управления микроструктурой и текстурой алюминиевых сплавов при термомеханической и холодной обработке. Разработаны математические модели эволюции текстуры для операций прокатки и штамповки, предложены практические рекомендации по оптимизации режимов обработки. Полученные результаты могут служить основой для повышения технологичности и снижения анизотропии свойств при производстве листовых изделий.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00590, <https://rscf.ru/project/24-19-00590/>*

### Список литературы

1. Разработка нового метода расчета зародышей текстурных ориентировок при рекристаллизации алюминиевых сплавов / Е. В. Арышенский, С. В. Коновалов, Э. Д. Беглов, В. Ю. Арышенский // Цветные металлы. – 2025. – № 2. – С. 80-89. – DOI: 10.17580/tsm.2025.02.10.
2. Klepov D.N., Aryshenskii E.V., Erisov Y.A. Alloying degree effect on texture formation during aluminum alloys deformation // Proceedings of the 11th International Conference on Industrial Engineering. ICIE. - 2025. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham
3. Aryshenskii E. Studying the effect of small additives of Sc and Zr on the microstructure of Al-Mg-Si alloy with excess silicon during multi-step heat treatment /

УДК 621.771.01

## **НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**Песин А.М.<sup>1</sup>, Пустовойтов Д.О.<sup>1</sup>, Рааб Г.И.<sup>1</sup>, Хайлян Ю.<sup>1,2</sup>,  
Дж.Лиу<sup>3</sup>, Песин И.А.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова», Магнитогорск, Россия

<sup>2</sup>Central South University, Changsha, China

<sup>3</sup>Shandong Liangong Testing Machine Co., Ltd, Jinan, China

e-mail: pesin@bk.ru

В результате компьютерного моделирования с использованием специализированного программного комплекса QForm 3D/2D и экспериментальных исследований на уникальном прокатном стане 400 лаборатории механики градиентных наноматериалов им. А.П. Жилева была показана возможность получения следующих новых технологических эффектов асимметричной прокатки: эффект снижения усилия прокатки; эффект равномерной деформации по толщине металла; эффект низкотемпературной динамической рекристаллизации; эффект динамического фазового превращения; эффект увеличения технологической пластичности металлов и сплавов; эффект одновременного повышения прочностных и пластических свойств металлов и сплавов; эффект деформационно-фрикционного разогрева и др. Разработаны и экспериментально подтверждены новые технологические схемы производства листов и полос из сталей и алюминиевых сплавов. Они предполагают сокращение ряда традиционных технологических операций как для холодной, так и горячей прокатки, значительное увеличение (до 2х раз) класса прочности стали без изменения его химического состава при горячей прокатке.

*Работа выполнялась при поддержке гранта Российского научного фонда (№ 25-79-31018).*

УДК 620.172.21:539.4.014.13

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ХОЛОДНОКАТАНОЙ СТАЛЬНОЙ ЛЕНТЕ МЕТОДОМ ТЭДС**

**Чукин М.В., Кошцева Н.В., Ефимова Ю.Ю.**  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия  
e-mail: m.chukin@mail.ru

Технологические процессы холодной листовой прокатки сопровождаются неравномерностью деформации стальной заготовки, что является основной причиной возникновения остаточных напряжений и может существенно повлиять

на механические свойства листового или полосового проката. Однако остаточным напряжениям, формирующимся в холоднокатаном листовом прокате, в литературе уделяется незначительное внимание, в то время как их возникновение существенным образом определяет качество листа, вызывая деформацию, коробление, растрескивание и хрупкое разрушение [1]. Для определения величины и характера остаточных напряжений распространены различные разрушающие и неразрушающие методы [2]. В частности, используется метод инструментального индентирования, ультразвуковой метод, метод, основанный на дифракции рентгеновских лучей, магнитные методы определения остаточных напряжений.

Но все эти методы имеют целый ряд существенных недостатков, связанных с тем, что все они являются косвенными, поэтому практически нельзя учесть все факторы, которые влияют на исходную величину параметра контроля, особенно на образцах со структурной неоднородностью.

Эффективным методом контроля влияния структурного состояния и различного рода дефектов на свойства холоднокатаной листовой стали может явиться применение термоэлектродвижущей силы (ТЭДС), которая является одним из физических свойств, в высокой степени чувствительных к упругой и пластической деформации [3, 4]. В связи с вышесказанным, целью проводимых исследований является оценка остаточных напряжений, возникающих в процессе изготовления холоднокатаной листовой заготовки, с использованием метода ТЭДС.

Эксперименты по измерению ТЭДС проводились с применением модуля PocketLaw исследовательского комплекса Gleeble 3500.

В работе использовался косвенный нагрев с помощью специально сконструированных сборочных элементов, исходя из необходимости предотвращения возможного влияния на значения ТЭДС электромагнитных полей. Передача тепла от нагревательного элемента к исследуемым образцам происходила по механизмам, имитирующим нагрев в печи. Условия нагрева и охлаждения для всех образцов принимались одинаковыми. Нагревательный элемент разогревался со скоростью 10 °С/с до температуры 750 °С, затем осуществлялась изотермическая выдержка в течение 10 с и охлаждение со скоростью 10 °С/с до достижения температуры 100 °С. Программа проведения эксперимента задавалась при помощи программного обеспечения QuikSim2®, а обработка результатов эксперимента осуществлялась при помощи стандартного программного пакета Origin® комплекса Gleeble 3500. Определение остаточных напряжений проводилось в центре образцов в направлении поперек прокатки (т.е. вдоль оси  $X$ ) с использованием метода рентгеновской дифрактометрии.

Величины коэффициента парной корреляции Пирсона между значениями коэффициентов Зеебека и величиной остаточных напряжений, измеренных поперек направления прокатки ленты, для разных серий образцов составили от 0,64 до 0,87, что свидетельствует о наличии сильной положительной корреляционной связи между ТЭДС и остаточными напряжениями, измеренными в направлении поперек прокатки и подтверждается картами распределения значений остаточных напряжений (рис. 1, а) и коэффициентов Зеебека (рис. 1, б) по координатам центров образцов на поверхности ленты.

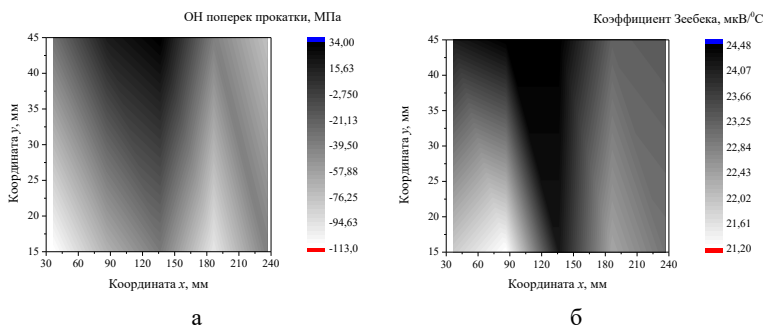


Рис. 1. Карта распределения значений остаточных напряжений, снятых поперек прокатки (а), и коэффициентов Зеебека (б) по поверхности ленты

Это свидетельствует о том, что с увеличением остаточных напряжений ленты значения ТЭДС возрастают. При этом верно и обратное положение: чем выше значение ТЭДС, тем следует ожидать более высоких остаточных напряжений в направлении поперек прокатки. Таким образом, доказана перспективность использования метода ТЭДС для контроля остаточных напряжений холоднокатаной стальной ленты.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России (проект FZRU-2025-0003).*

#### Список литературы

1. Research on Distribution of Residual Stresses of Cold Rolled Sheet Distorted Area Based on ANSYS / Sun W., Shao J., He A. et al. // Manufacturing technology – abstracts. 2015. April. Vol. 15. No. 2. P. 220-226. DOI: 10.21062/ujep/x.2015/a/1213-2489/MT/15/2/220.
2. Разрушающие методы определения остаточных напряжений (обзор) / А.Д. Монахов, Н.О. Яковлев, В.В. Автаев и др. // Труды ВИАМ. - 2021. - № 9 (103). - С. 95-104. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-95-104.
3. Солдатов А.И., Солдатов А.А., Костина М.А. Современные тренды применения термоэлектрического метода в неразрушающем контроле (обзор) // Дефектоскопия. - 2024. - № 2. - С. 64-83.
4. Чукин М.В., Ефимова Ю.Ю., Копцева Н.В. Определение неоднородности свойств холоднокатаной ленты по термоЭДС. Сообщение 1. Разработка методики исследования // Черные металлы. - 2026. - №2. - С.60-66.

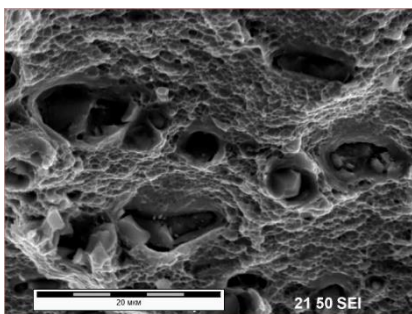
## **ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В КОНТРОЛЕ МИКРОСТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ**

**Сивкова Т.А., Сыропятова О.С., Кадушников Р.М., Сомина С.В.**  
*ООО «СИАМС», Екатеринбург, Россия*  
*e-mail: sivkova@siams.com*

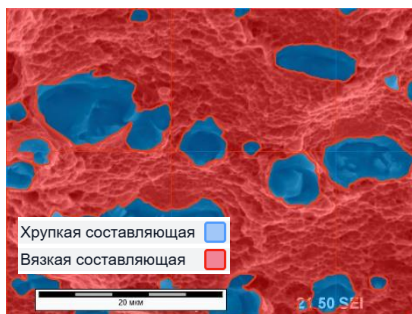
В последние годы наблюдается значительный рост интереса к применению методов искусственного интеллекта (ИИ), в частности нейронных сетей (НС), для оценки структуры материалов при решении традиционных задач материаловедения. К таким задачам относятся идентификация фазовых и структурных составляющих, частиц, включений, границ зерен, пор, дефектов и т.п. Интерес к применению НС обусловлен существующими ограничениями классических методов сегментации, применяемых в системах анализа изображений. Автоматизированные методы распознавания объектов на изображениях могут снижать точность при наличии на изображениях размытых границ, низкого контраста, локальных градиентов, других объектов внутри искомым областей и других артефактов. Примерами подобных изображений являются снимки, полученные методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), отличающиеся повышенным шумом, низкой контрастностью и монохромностью.

Для выполнения количественного анализа структуры при использовании доступного программного обеспечения (ПО) и нейросетевых решений исследователи вынуждены последовательно применять несколько программных продуктов, каждый из которых решает лишь часть задачи: разметку данных, обучение модели, количественные измерения параметров структуры. Такой подход трудоёмок, затратен по времени, нередко требует доступа к онлайн-ресурсам. Помимо количественной оценки структуры материалов как правило требуется дополнительная интерпретация полученных результатов. Для этой цели могут использоваться доступные языковые модели (LLM), такие как Gemini, GPT, Claude, DeepSeek, Qwen, Gemma и другие. Их применение также предполагает постоянный доступ к онлайн-ресурсам, что является существенным ограничением для специалистов-материаловедов.

Для устранения перечисленных ограничений компанией SIAMS (ООО «СИАМС») спроектирована многоуровневая архитектура ПО, объединяющая в единый программный продукт блоки управления оборудованием, обучаемую систему ИИ, классификатор объектов, вычислительный блок, модуль ИИ-Ассистента. Работа с ПО не требует подключения к сети Интернет и обращений к сторонним серверам, что гарантирует конфиденциальность. С помощью ПО SIAMS решаются различные задачи, например, оценка микроструктуры чугуна, определение глубины обезуглероженного слоя в сталях, определение фаз и включений в металлах и сплавах, определение размеров и форм частиц в материалах различного происхождения. На рис. 1 приведен один из примеров количественного анализа с интерпретацией полученных результатов ИИ-Ассистентом.



а



б

### Интерпретация результатов

**Как читать ваш результат**

- **82 % вязкая часть** – это хороший показатель для конструкционной стали. Он говорит о том, что материал может растягиваться и поглощать энергию удара.
- **18 % хрупкая часть** – это небольшая доля, но её наличие указывает на присутствие включений, недостатков в структуре или нежелательного режима охлаждения. Для большинства строительных и машиностроительных применений такой уровень считается допустимым.

**Возможные причины такого результата**

1. **Скорость охлаждения** – слишком медленное охлаждение может привести к образованию мелких зерен и увеличению хрупкой составляющей.
2. **Содержание неметаллических включений** – включения, особенно кремний-оксидные, могут стать центрами хрупкого разрушения.
3. **Неправильный режим термообработки** – отсутствие достаточного времени на отжиг может оставить остаточную напряжённость.

**Практические последствия для изделия**

- **Положительный:** высокая вязкая часть обеспечивает хорошую ударную вязкость и устойчивость к пластическим деформациям, что важно для конструкций, подвергающихся динамическим нагрузкам.
- **Отрицательный:** присутствие хрупкой части может стать причиной локальных разрушений при резких нагрузках, например, в соединениях или при ударных воздействиях. В критических конструкциях, где допускается минимальный риск поломки, может потребоваться дополнительная проверка.

в

Рис. 1. Результат оценки смешанного излома на СЭМ изображении с помощью нейрометодики SIAMS: а) исходное изображение; б) изображение с маской найденных объектов. Относительная доля вязкой составляющей – 82%, хрупкой составляющей – 18%; в) интерпретация результатов анализа ИИ-Ассистентом

Реализованная в ПО SIAMS концепция вложенных технологий объединяет нейросетевые модели с классическими алгоритмами, расширяя возможности микроструктурного анализа. Программный комплекс обеспечивает высокую скорость и воспроизводимость при серийном контроле качества, а также детальную аналитику сложных структур при проведении научных исследований.

# **СЕКЦИЯ 1 – Фундаментальные проблемы обработки металлов давлением в контексте современных потребностей мировой промышленности**

---

---

УДК 621.77

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БАЗОВОГО ПРОКАТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АСИММЕТРИЧНОЙ ЛИСТОВОЙ ПРОКАТКИ**

**Рааб Г.И.**

*ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова», Магнитогорск, Россия  
e-mail: giraab@mail.ru*

Одной из проблем производственного освоения процессов асимметричной прокатки, позволяющей сократить производственный цикл, а также снизить силы прокатки, является ограниченный сортамент специализированного оборудования с индивидуальным приводом валков. Такие обстоятельства требуют научно-технической оценки использования традиционного прокатного оборудования для симметричной прокатки при создании перспективных и экономически обоснованных процессов асимметричной прокатки за счет использования валков разного диаметра. В качестве примера решения проблемы в представленной работе проведен сравнительный анализ напряженного и деформированного состояния очага деформации при горячей прокатке при обжатии 50% в условиях симметричного цикла и асимметричного цикла с коэффициентом асимметрии 1,5 для конструктивных схем с валками одного диаметра с индивидуальным приводом и с валками разного диаметра от одного привода.

Показаны преимущества, недостатки, ограничения и возможные варианты адаптации условий асимметричной прокатки листов на существующей производственной базе предприятий.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-30015, <https://rscf.ru/project/23-79-30015/>*

УДК 669.14-419

## **ВЛИЯНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА СВОЙСТВА ГОРЯЧЕГО СОРТОВОГО ПРОКАТА**

**Егорова К.А., Зотов О.Г.**

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: ksy.egorova.03@mail.ru*

Железнодорожная клемма – это важный элемент рельсового скрепления, фиксирующий положение рельса при креплении к шпале и испытывающий значительные знакопеременные нагрузки (рис. 1).

По этой причине к микроструктуре клемм, изготавливаемых из сортового проката, предъявляются высокие требования по качеству, особенно по количеству и характеру распределения неметаллических включений.



Рис. 1. Внешний вид прутковой железнодорожной клеммы

Целью исследования является изучение влияния неметаллических включений на механические свойства и микроструктуру сортового проката на примере железнодорожных клемм, работающих в сложном напряженном состоянии. Задачи исследования включают в себя:

1. Проведение металлографических исследований с целью оценки состава и количества неметаллических включений.
2. Определение механических свойств и определение влияния на них неметаллических включений.
3. Оценка характера разрушения реальных горячекатаных железнодорожных клемм, разрушенных в ходе эксплуатации.

Исследование проводилось на шести образцах. Три реальных железнодорожных клеммы, разрушенных при эксплуатации и три горячекатаных прутка диаметром 17 мм из стали 40С2. Сталь была изготовлена на ПАО «Северсталь» в соответствии с ТУ 1150-168-01124323-2003.

Для реальных железнодорожных клемм был проведен анализ излома поверхности и определены причины и характер разрушения.

Для прутков, полученных методом горячей прокатки, был проведен следующий ряд исследований:

1. Химический анализ образцов осуществлялся в соответствии с ГОСТ Р 54153-2010 на искровом оптико-эмиссионном спектрометре Arun PolySpek-F.
2. Исследование характера и типов неметаллических включений проводилось с помощью светового оптического микроскопа Leica DMI 5000 и программы Thixomet Pro по стандарту ASTM 1245-03 в плоскости по направлению вдоль проката.
3. Испытания на статическое растяжение были проведены на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z100 по ГОСТ 1497–2023.
4. На сканирующем электронном микроскопе TESCAN Mira-3M проводили фрактографический анализ поверхности разрушения и оценивалась форма, химический состав и тип неметаллических включений.

В результате было установлено, что в том количестве и при том характере распределения, в котором включения присутствуют в исследованных горячекатаных сырых прутках, они практически не оказывают существенного влияния на механические свойства изделий и, следовательно, не могут являться причиной разрушения. Однако анализ характера разрушения в процессе эксплуатации реальных железнодорожных клемм показал, что разрушение происходит по усталостному механизму. При этом источником разрушения является наличие крупных неметаллических включений по типу оксидов, размер

которых значительно превышает 50 мкм. Разрушение металла начинается в одном месте, распространяется к противоположной поверхности и заканчивается зоной долома.

В ходе проведённых исследований установлен критический размер включения, при котором оно является источником хрупкого разрушения изделий, работающих в сложном напряженном состоянии.

#### **Список литературы**

1. ГОСТ 33186 – 2014. Клеммы пружинные прутковые для крепления рельсов. – М.: Стандартиформ, 2015.
2. Рахштадт А. Г. Пружинные стали и сплавы. Москва: Металлургия, 1982. 400 с.
3. Никитина Н. В., Почивалова Г. П., Кон-Сю Ю. Температурная зависимость сопротивления малым пластическим деформациям пружинных сталей и сплавов// МиТОМ. – 1980. – №2. – С. 31-34.
4. Дударев Е. Ф. Деформация и разрушение металлов и сплавов// Изв. вузов. Физика. – 1976. – №8. – С. 88-132.
5. Ефремова Е. А., Руденко Д. Ю. Методические указания к выполнению практических и курсовых работ по дисциплине «Теория обработки металлов давлением». – Донецк: ДГТУ. 2021. С. 4.

УДК 621.7

### **ТЕРМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ФОСФАТНОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ НАГРЕВЕ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ**

**Ушаков А.В., Лавриненко В.Ю.**

*ФГАОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана», Москва, Россия  
e-mail: ushakov7720@gmail.com*

Фосфатирование является обязательным этапом подготовки поверхности стальных заготовок перед холодной объемной штамповкой или волочением, поскольку фосфатное покрытие (фосфатный слой) снижает коэффициент трения, удерживает смазочный материал и уменьшает вероятность появления поверхностных дефектов. Ранее было показано, что предварительный низкотемпературный нагрев заготовок из легированных сталей до 300°C позволяет снизить сопротивление деформированию и нагрузку на инструмент при штамповке до 2-4 раз по сравнению с штамповкой заготовок без нагрева [1-6]. Вместе с тем экспериментальные или производственные данные о влиянии такого нагрева на состояние фосфатного слоя отсутствуют.

В работе проведена экспериментальная оценка термической стойкости фосфатного слоя на заготовках из стали 41X1 после предварительного низкотемпературного нагрева. Образцы с фосфатным покрытием, нанесенным в производственных условиях АО «БЕЛЗАН», нагревали в муфельной печи ПМ-1700п до 200 и 300 °С с выдержкой 1 и 5 мин. Исследование толщины фосфатного слоя проводили с помощью сканирующего электронно-ионного микроскопа общего и прикладного назначения IQSCAN W32 (FIB-SEM),

предназначенного для высокоточного анализа и модификации поверхностей материалов на наноуровне. Он сочетает в себе функциональность сканирующего электронного микроскопа (SEM) и ионотронного луча (FIB — Focused Ion Beam), что обеспечивает расширенные возможности по исследованию образцов.

Для исходного состояния толщина фосфатного слоя составила 0,85-1,60 мкм, среднее значение 1,225 мкм. После нагрева до 200°C при выдержке 1 мин толщина находилась в диапазоне 0,905-1,335 мкм (рис. 1, а), среднее значение 1,118 мкм; при выдержке 5 мин – 1,029-1,529 мкм (рис. 1, б), среднее значение 1,279 мкм. После нагрева до 300°C при выдержке 1 мин толщина составила 0,905-1,549 мкм, среднее значение 1,227 мкм; при выдержке 5 мин – 0,905-1,501 мкм, среднее значение 1,203 мкм.

Сопоставление полученных значений показывает, что во всех исследованных режимах изменения толщины покрытия находятся в пределах исходного разброса. Признаков разрушения, отслаивания или заметного уменьшения толщины фосфатного слоя после нагрева до температур 200 и 300°C не обнаружено. Это свидетельствует о сохранении технологических функций покрытия при кратковременном низкотемпературном нагреве заготовок перед холодной объемной штамповкой.

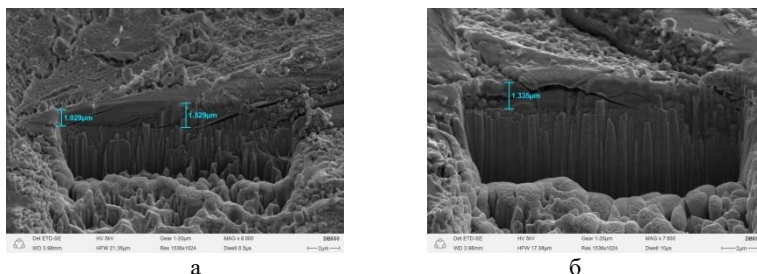


Рис. 1. Измерение толщины фосфатного слоя на образцах из стали 41X1 при нагреве до температуры 200 °С: а – выдержка 1 мин; б – выдержка 5 мин

Таким образом, предварительный низкотемпературный нагрев заготовок из стали 41X1 до 300°C может быть использован в технологиях холодной объемной штамповки без ухудшения характеристик фосфатного слоя.

### Список литературы

1. Лавриненко Ю. А., Евсюков С. А., Лавриненко В. Ю. Объемная штамповка на автоматах: учебное пособие для вузов. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. - 260 с.
2. Лавриненко В. Ю., Лавриненко Ю. А. Основные направления повышения эффективности производства крепежных деталей для различных отраслей промышленности: к 20-летию Центра компетенций «Современные технологии ХОШ на автоматах» МГТУ им. Н.Э. Баумана // Заготовительные производства в машиностроении. - 2024. - Т. 22. - № 4. - С. 188-191.
3. Экспериментальные исследования влияния предварительного низкотемпературного нагрева заготовок из легированных сталей на сопротивление деформированию при холодной объемной штамповке / Лавриненко В.Ю.,

Лавриненко Ю.А., Айрапетян А.С., Файрузов Р.С., Кирсанов А.С. // Заготовительные производства в машиностроении. - 2021. - Т. 19. - 9. - С. 396-399.

4. Лавриненко В.Ю., Лавриненко Ю.А., Кирсанов А.С. Влияние низкотемпературного нагрева заготовок из легированных сталей на сопротивление деформированию // Сталь. - 2021. - № 12. - С. 29-31.

5. Лавриненко В.Ю., Ушаков А.В. Экспериментальные исследования влияния предварительного низкотемпературного нагрева заготовок на механические свойства сталей 41X1, 20Г2Р и 38ХГНМ // Заготовительные производства в машиностроении. - 2025. - Т. 23. - № 1. - С. 14-19.

6. Лавриненко В. Ю., Ушаков А. В., Лавриненко Ю. А. Исследование процесса холодной объемной штамповки сложнопрофильных деталей из сталей 20Г2Р и 41X1 с использованием предварительного низкотемпературного нагрева заготовок // Заготовительные производства в машиностроении. - 2025. - Т. 23. - № 10. - С. 462-465.

УДК 621.77

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКОГО ФАКТОРА АСИММЕТРИИ НА ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

**Бирюкова О.Д., Пустовойтов Д.О., Могильных А.Е., Песин И.А.**  
*ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия*  
*e-mail: fimapatisonchik@inbox.ru*

Алюминий и его сплавы являются вторыми по объему производства конструкционных материалов в мире, уступая место только черным металлам. В связи с этим ключевой целью развития цветной металлургии в России, в частности производства и обработки алюминиевых сплавов, является структурная адаптация отрасли к современным экономическим условиям, развитие внутреннего рынка и повышение эффективности переработки сырья.

Деформируемость алюминиевых сплавов при традиционных схемах обработки, в том числе при прокатке, является ограничивающим фактором при выборе режимов деформации. Соответственно, одним из этапов осуществления технологии выступает использование нескольких циклов термической обработки, что, в свою очередь, приводит к усложнению технологического процесса и снижению производительности, а также введению дополнительных ограничений технологического процесса.

Асимметричная прокатка зарекомендовала себя как способ, позволяющий увеличить технологическую пластичность металлов и сплавов [1-3]. Исследования в данной области продолжаются на алюминиевом сплаве АМг6 разных толщин. В текущей работе описана прокатка материала, которую осуществляли на уникальной научной установке – стане 400 асимметричной прокатки лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева». Деформация образцов толщиной 6 мм проводилась при комнатной температуре, в широком диапазоне отношений скоростей рабочих валков (от  $V1/V2 = 1,0/1,0$  до  $V1/V2 = 10,0/1,8$ ) за один проход. Относительное обжатие варьировалось в пределах 65 – 90 %.

Полученные результаты указывают на снижение усилий прокатки при увеличении коэффициента асимметрии, увеличении технологической пластичности и твердости сплава АМг6, изменении микроструктуры со стабильным уменьшением зерна до 1-2 мкм.

*Исследования выполнены за счет гранта РНФ (соглашение № 23-79-30015), <https://rscf.ru/project/23-79-30015/>*

### **Список литературы**

1. Влияние асимметричной холодной прокатки на технологическую пластичность низкоуглеродистых сталей / А. М. Песин, Д. О. Пустовойтов, О. Д. Бирюкова [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2024. – Т. 22, № 4. – С. 81-88.
2. Обеспечение технологической пластичности производства нержавеющей стали 20Х13 при асимметричной прокатке / А. М. Песин, Д. О. Пустовойтов, К. Ю. Бревнов [и др.] // Сталь. – 2025. – № 4. – С. 21-24.
3. Влияние скоростной асимметрии на технологическую пластичность при прокатке сплава системы алюминий-магний-скандий / М. А. Никитина, Д. О. Пустовойтов, О. Д. Бирюкова [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2025. – Т. 23, № 4. – С. 71-79.

УДК 669.14.018

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ПРОКАТКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ: УПРАВЛЕНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЕМ, ТОЧНОСТЬЮ ГЕОМЕТРИИ И СТАБИЛЬНОСТЬЮ СВОЙСТВ В УСЛОВИЯХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СТАНОВ**

**Чистяков Д.А.**

*ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», ГАПОУ СО «Уральский политехнический колледж - МЦК», Екатеринбург, Россия  
e-mail: danil125k@ya.ru*

Горячая прокатка на непрерывных широкополосных станах формирует геометрию и качество поверхности подката, который будет использоваться на следующих этапах обработки [4, с. 204]. Слябы нагревают до температуры 1180–1220°C, при этом необходимо эффективно удалять окалину водой перед черновой прокаткой, так как внедрение окалины в металл невозможно исправить при последующей холодной прокатке [4, с. 87].

Холодную прокатку проводят в 3–5 этапов с общей деформацией от 70 до 85 %. В первом проходе задают максимальное сжатие — примерно 40–45 %, чтобы сформировать нужную структуру деформации, а последующие проходы выполняют с уменьшенными обжатиями по 15–25 %, что обеспечивает контроль плоскостности проката [4, с. 215].

Для марок, склонных к анизотропии, особенно важно сохранять равномерность поперечного профиля. Для этого применяют валки с изменяемым профилем (CVC) и гидравлические антидеформационные системы, которые

позволяют удерживать отклонения по толщине в пределах, установленных ГОСТ 21427.1-83; при повышенных требованиях точности допуск составляет  $\pm 0,01-0,02$  мм [1; 3, т. 3].

Состав смазочно-охлаждающей жидкости выбирают таким образом, чтобы обеспечить стабильный коэффициент трения по всей ширине проката, так как его неравномерность приводит к серповидности, что не допускается по ГОСТ [1; 2].

После термообработки и нанесения покрытия выполняется дрессировка (обжатие 0,5–3 %). Основные цели процесса:

- устранение эффекта зуба текучести (предупреждение образования полос Людера при штамповке);

- выравнивание микрорельефа для равномерного распределения покрытия;

- достижение заданной шероховатости поверхности ( $Ra$  0,2–0,6 мкм) [5, с. 430–445].

Регулировка натяжения на одноклетевых дрессировочных станах позволяет контролировать плоскостность без пластического деформирования сердцевины [3, т. 3].

Для обеспечения высокой точности размеров, достигающей микронных значений, используются шестивалковые клетки, отличающиеся высокой жёсткостью в диапазоне 6000–8000 кН/мм [3, т.3, с.156]. Валки, предназначенные для холодной прокатки, изготавливаются из хромомолибденовых сплавов и обладают твёрдостью по шкале HSD 94–98 [5, с. 89].

Оценка качества конечного продукта прокатки охватывает следующие параметры:

- Плоскостность: измеряется с помощью лазерных систем. Согласно стандарту ГОСТ 21427.1-83, допустимое отклонение составляет от 2 до 4 мм на метр, в зависимости от категории качества [1].

- Толщина: контролируются допуски по толщине. Например, для листа толщиной 0,30 мм, произведённого с повышенной точностью, отклонение не должно превышать  $\pm 0,01$  мм [1, 2].

- Кромки: оценивается состояние кромок после их продольной резки. Для уменьшения возможности образования наклёпа производится тщательный подбор зазоров между режущими ножами [5, с. 520].

Детальное исследование и точное соблюдение технологических режимов при обработке электротехнической стали оказывает прямое воздействие на три фундаментальных аспекта: удобство дальнейшей обработки у потребителя, рациональное использование энергии, производимой продукцией, и общую экономическую эффективность процесса изготовления.

Поддержание надлежащих температурных и деформационных характеристик на этапе горячей прокатки, а также обеспечение высокой точности профиля при холодной обработке гарантирует равномерность толщины металла в пределах допуска  $\pm 0,01$  мм. Это, в свою очередь, увеличивает степень заполнения сердечника трансформатора на 1,5–2 %, не требуя при этом увеличения его массы [1, 5]. Контролируемая окончателная обработка (дрессировка) с заданным уровнем шероховатости  $Ra$  в диапазоне 0,2–0,6 мкм и благодаря устранению поверхностных дефектов (зуба текучести) способствует снижению износа штампового инструмента на 15–20 % и полностью предотвращает появление заусенцев при формовке металла на высоких скоростях [5, с. 432].

Следовательно, контроль над формоизменением, жёсткость производственного оборудования и соответствие стандартам ГОСТ 21427.1-83 и

ГОСТ 21427.2-83 не являются лишь формальными технологическими предписаниями. Они служат действенными методами для снижения себестоимости конечной продукции благодаря повышению выхода годного материала (до 92–94 %), а также для обеспечения потребителей стабильными магнитными характеристиками продукции с минимальным отклонением удельных потерь в пределах  $\pm 5$  % от установленного значения [1, 5].

#### Список литературы

1. ГОСТ 21427.1-83. Сталь электротехническая холоднокатаная анизотропная тонколистовая. Технические условия. — М.: Издательство стандартов, 1983.
2. ГОСТ 21427.2-83. Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная тонколистовая. Технические условия. — М.: Издательство стандартов, 1983.
3. Машины и агрегаты металлургических заводов: Учебник: в 3 т./Целиков А. И., Полухин П. И., Гребеник В. М. и др. — 2-е изд. — М.: Металлургия, 1987–1988.
4. Полухин П.И., Хензель А., Полухин В.П. Технология процессов обработки металлов давлением. — М.: Металлургия; Лейпциг: VEB Deutscher Verl. für Grundstoffindustrie, 1988.
5. Коновалов Ю.В. Справочник прокатчика: в 3 кн. — М.: Теплотехник, 2008. — Кн. 2: Производство холоднокатаных листов и полос.

УДК 669.715

### ВЛИЯНИЕ КРУЧЕНИЯ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ НА СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Mg-Si-Cu

Султанов К.Р.<sup>1</sup>, Хафизова Э.Д.<sup>1,2</sup>, Поленок М.В.<sup>1</sup>, Темралиева Д.Р.<sup>2</sup>,  
Мартыненко Н.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия  
<sup>2</sup> Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН), Москва, Россия  
e-mail: farmkloki@gmail.com

Алюминиевые сплавы системы Al-Mg-Si занимают важное место в производстве конструкционных изделий благодаря легкости, хорошей свариваемости и устойчивости к коррозии. Однако их прочностные характеристики часто оказываются недостаточными для ответственных деталей, работающих в условиях высоких нагрузок. Перспективным направлением повышения прочности является дополнительное легирование, которое способствует образованию упрочняющих интерметаллидных фаз и расширяет диапазон эксплуатационных свойств сплава. Наряду с этим, эффективным способом улучшения механических характеристик служит применение методов интенсивной пластической деформации, позволяющих формировать ультрамелкозернистую структуру.

В настоящей работе в качестве метода интенсивной пластической деформации использовали кручение под высоким давлением (КВД). Данный метод реализуется путем деформации дискообразного образца диаметром 20 мм и

исходной толщиной 1,8 мм под действием квазигидростатического давления 6 ГПа и при одновременном кручении на 10 оборотов. В процессе обработки в материале возникают значительные сдвиговые деформации, приводящие к выраженному деформационному упрочнению (наклепу) и существенному измельчению зеренной структуры с формированием ультрамелкозернистого состояния. Несмотря на малые габариты, результаты, полученные на таких образцах, позволяют оценить потенциал обработки для дальнейшего масштабирования.

В работе исследовался алюминиевый сплав системы Al-Mg-Si-Cu после обработки кручением под высоким давлением. Микротвердость измеряли на твердомере Durascan 50 по методу Виккерса в соответствии с ГОСТ 9450-76. Механические испытания на растяжение проводили на специально подготовленных малых плоских образцах, вырезанных из дисков после КВД, на электромеханической испытательной машине Instron 5982.

В результате проведенных исследований установлено, что обработка кручением под высоким давлением приводит к существенному увеличению микротвердости исследуемого сплава: с  $85,8 \pm 6$  HV в исходном состоянии до  $181 \pm 21$  HV после деформации. При этом выявлена неравномерность распределения микротвердости по радиусу образца (рис. 1). В центральной зоне наблюдается снижение значений твердости, тогда как по направлению к периферии фиксируется ее рост. Данное распределение обусловлено особенностями напряженно-деформированного состояния, реализуемого при КВД: максимальные сдвиговые деформации накапливаются в периферийных областях образца, в то время как центральная часть испытывает преимущественно гидростатическое сжатие без значительной сдвиговой деформации.

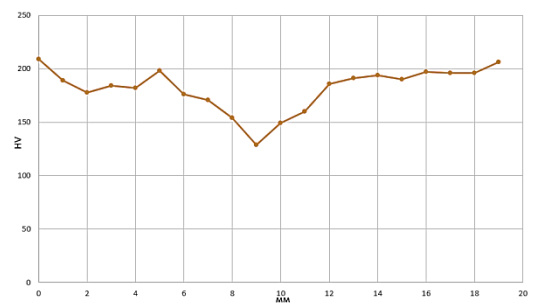


Рис. 1. Распределение микротвердости по радиусу образца после кручения под высоким давлением сплава Al-Mg-Si-Cu

Повышение твердости после обработки связано с формированием ультрамелкозернистой структуры и накоплением высокой плотности дислокаций в процессе интенсивной пластической деформации. Однако результаты механических испытаний на растяжение показали, что образцы после КВД разрушаются хрупко, без образования шейки и зоны пластического течения.

Таким образом, метод КВД эффективен для упрочнения сплава, но приводит к потере пластичности. Для получения материала с оптимальным сочетанием прочности и пластичности необходима дополнительная обработка.

УДК 338.45: 621.774

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ТЕХНИЧЕСКОГО НОРМИРОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ТРУБНОЙ МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ**

**Лысов Д.Н.**

*ООО «Исследовательский Центр ТМК», Москва, Россия*

*e-mail: LysovDN@tmk-group.com*

Вопросы оптимального планирования и экономии сырья и материалов имеют особо важное значение в тех отраслях национальной экономики, где их удельный вес в себестоимости продукции составляет существенную долю. В себестоимости производства стальных труб основная доля затрат приходится на металл – от 75 до 80 %, для труб большого диаметра – до 90 %. Выявленные резервы экономии металла без дополнительных инвестиций, даже в небольших количествах, способствуют снижению себестоимости, получению дополнительного объема готовой продукции и, как следствие, увеличению прибыли предприятия [1]. Безусловно, снижение фактической металлоемкости продукции невозможно без технического прогресса производства, совершенствование же методов и приемов нормирования металла служит задачам установления обоснованного уровня его потребления, определения ориентира, который необходимо обеспечивать техническими решениями и оптимизацией технологических процессов.

В контексте изложенного управление процессом рационального планирования металлоиспользования в сфере производства трубной металлопродукции предполагает необходимость совершенствования методологии планового нормирования с целью ее соответствия актуальному уровню организации технологических процессов [2, 3].

Несмотря на существенную и авторитетную научно-методическую базу, в области нормирования металла в трубном производстве оставались недостаточно изученными вопросы, обуславливающие существование значительных пробелов, требующих заполнения, а именно:

- отсутствие дифференциации методов к индивидуальным технологическим схемам и признакам изготовления продукции, обуславливающее существенные отклонения и допущения в расчетах;

- методология нормирования рассматривала только однопередельную технологическую схему, не позволяя осуществлять объективное внутрицеховое планирование, учет и контроль материальных затрат и незавершенного производства;

- существующие методы и способы не учитывали потери на образование брака и попутной продукции, что приводило к существенным искажениям в планировании себестоимости труб.

В ходе исследования реализована углубленная адаптация общих подходов к нормированию расхода металла на укрупненные виды продукции к конкретным

технологическим процессам производства на трубных предприятиях и разработаны новые методы для определения индивидуальных и групповых расходных коэффициентов, норм расхода, а также массы отходов и потерь металла, по технологическим переделам и в целом по циклу производства продукции. Также впервые сформированы и обобщены теоретические и методические принципы системы нормирования расхода металла в производстве трубной металлопродукции в условиях рыночной экономики.

Основой расчетно-аналитического метода является расчет технологических отходов и потерь по операциям производственных процессов в виде относительных показателей – частных расходных коэффициентов металла и норм расхода металла. Реализация метода осуществляется посредством математического моделирования планируемого расхода материалов на основе регламентированных показателей производственного процесса. В ходе реализации исследований по теме предложен и обоснован метод расчета структуры и массы образующихся отходов и потерь металла с разделением на составляющие: обрешь, стружка, окалина, угар дифференцированно по технологическим переделам. Математически описан и интегрирован в методике учет нормативов показателей качества продукции: брака, попутной продукции также дифференцировано по технологическим переделам. Предложены и реализованы критерии дифференциации расчетно-аналитического метода к индивидуальным технологическим схемам и признакам продукции, разработаны новые частные методы расчета пооперационных норм расхода металла. Стандартной формой воплощения математических моделей являются методики расчета индивидуальных (и при необходимости групповых) частных и обобщенных норм расхода материалов на единицу целевой продукции. Методики расчета являются основой для создания аппаратных средств автоматизации процесса нормирования в виде программных продуктов для ПК [4].

### Список литературы

1. Михайловская И.И., Лысов Д.Н. Математическая модель расчета расхода сырья в производстве стальных труб // Сталь. - 2005. - №11. - С. 143-145.
2. Кувшинов М. С., Киреева Н. В. Анализ соответствия методов управления затратами актуальным задачам управления// Экономический анализ: теория и практика. – 2014. -№ 17. – С.37-46.
3. Климук В. В. Развитие инструментария оценки эффективности использования материальных ресурсов промышленного предприятия: дисс. ... канд. экон. наук: 08.00.05 / Климук Владимир Владимирович; [Место защиты: Юж. федер. ун-т]. – Ростов-на-Дону, 2015. – 208 с. : ил.
4. Баев И.А., Лысов Д.Н., Дворникова Т.В. Методы оптимального планирования материальных ресурсов в производстве труб // Вестник ЮУрГУ. Серия «Экономика и менеджмент». - 2016. - Т. 10. - № 1. - С. 104-112.

## **ВЛИЯНИЕ СКОРОСТНОЙ АСИММЕТРИИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ ПЛАСТИЧНОСТЬ ПРИ ПРОКАТКЕ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ АЛЮМИНИЙ-МАГНИЙ-СКАНДИЙ**

**Никитина М. А., Носов Л.В., Песин А.М., Барышникова А.М.**  
*ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия*  
*e-mail: mgurbich@yandex.ru*

Сплавы 5XXX серии со скандием обладают низкой технологической пластичностью. Из-за этого при прокатке существует необходимость проведения большого количества отжигов, а также использования эдзеров, так как прокатка данной серии сплавов сопровождается растрескиванием кромок [1].

Это, в свою очередь, отражается на конечной стоимости горячекатаного подката. Соответственно исследование изменения технологической пластичности алюминиевых сплавов 5XXX серии при прокатке является актуальным.

С точки зрения обработки металлов давлением наибольший интерес представляет способ асимметричной прокатки как метод улучшения механических и технологических характеристик металлов и сплавов [2]. В данной работе использовался метод асимметричной прокатки, в котором кинематическая асимметрия процесса создавалась за счет рассогласования окружных скоростей валков. С помощью данного способа возможно усовершенствовать технологические схемы обработки алюминиевых сплавов системы Al-Mg с добавлением лигатуры Al-2%Sc. Его применение обеспечивает техническое преимущество, заключающееся в возможности уменьшения количества проходов в чистовой группе клетей при горячей прокатке.

Определить параметры процесса асимметричной прокатки, в частности отношение скоростей валков, при обработке алюминиевого сплава 5XXX серии со скандием, обеспечивающее увеличение технологической пластичности материала при одновременном снижении усилия при горячей прокатке с сохранением уровня механических свойств после холодной прокатки, являлось основной задачей в данной работе.

Горячая и холодная прокатка проводились на уникальном промышленно-лабораторном стане ДУО 400 лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилыева» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Усилие, возникающее в процессе прокатки, регистрировалось программным обеспечением стана ДУО 400. Качество полученного подката оценивалось в соответствии с ГОСТ Р 57510-2017. Твердость поверхности определялась методом Бринелля в соответствии с ГОСТ 9012-59. Механические свойства оценивались в соответствии со стандартом ASTM E8.

При отношении скоростей рабочих валков  $V1/V2$  в диапазоне 1,1-1,3 при горячей прокатке дефекты отсутствовали. При этом усилие прокатки снижалось с 1400 до 1280 кН. Полученные механические свойства соответствовали нормативным документам на катаные полуфабрикаты.

Асимметричная прокатка влияет на изменение технологической пластичности алюминиевого сплава 5XXX серии с дорогостоящей лигатурой Al-2%Sc. В результате возможно снизить количество проходов при чистовой

горячей прокатке с трех-четырех до одного. Благодаря этому исключается дополнительное захлаживание кромок и их растрескивание, а также асимметричная прокатка позволяет снизить издержки производства и сроки изготовления катаных полуфабрикатов.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-30015, <https://rscf.ru/project/23-79-30015/>*

### **Список литературы**

1. Кондратьева Н.Б., Золоторевский Ю.С. Сплавы алюминия с магнием (магналии) // Промышленные алюминиевые сплавы: справочное издание / С. Г. Алиева, М. Б. Альтман, С. М. Амбарцумян и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1984. – С. 37–51.

2. Разработка технологических схем асимметричной прокатки алюминиевых лент, обладающих повышенной прочностью и пластичностью / Песин А. М., Пустовойтов Д. О., Песин И. А., Кожемякина А. Е., Носов Л. В., Сверчков А. И. // Теория и технология металлургического производства. – 2022. – Т. 41, № 2. – С. 32–40.

УДК 621.771.23

## **ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОИЗВОДСТВА НЕРЖАВЕЮЩЕГО ЛИСТОВОГО ПРОКАТА В РОССИИ**

**Морозова П.Н.**

*ФГАОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана», Москва, Россия  
e-mail: polinamorz@gmail.com*

Нержавеющая сталь — это обобщенное название для группы сталей, отличающихся высокой коррозионной стойкостью, которую обеспечивает минимальные 10,5% содержания хрома [1].

Количество нержавеющей марки стали очень велико. Они отличаются по химическому составу и задаваемым им свойствам.

По оценке ассоциации «Спецсталь» наиболее импортозависимыми секторами в нержавеющей продукции, по статистике за первый квартал 2025 года, являются плоский холоднокатаный и горячекатаный прокат, доля иностранной продукции составила 96,2 и 80,5% соответственно [2]. Одной из ключевых причин данной проблемы является объемы потребления нержавеющей стали в России (около 1,5 млн. тонн/год с учетом ввезенной готовой продукции). В свою очередь, ведущие отечественные производители в этом секторе — группа «Мечел» и завод «Красный Октябрь» - производят не более 100 тыс. т. в год.

Отечественное производство металлопроката из нержавеющей стали позволит быстро запустить процесс импортозамещения, так как отечественные листы и полуфабрикаты позволят намного дешевле и быстрее начинать выпуск продукции предпринимателям, развивать российский бизнес и укреплять экономику страны.

Проблемы могут возникнуть с никелем и титаном, практически весь объем добычи которых уходит на экспорт [3]. Также могут появиться затруднения с

получением марганца, который на данный момент полностью импортируется [4]. Качество российских руд в целом низкое: по содержанию марганца они относятся к бедным.

В настоящее время горячекатаный лист изготавливают главным образом на широкополосных станах горячей прокатки, но годовая производительность таких станов достигает более 5 млн т./год, что является избыточным и не окупаемым при современном уровне потребления нержавеющей стали в нашей стране [5].

Одним из эффективных решений в проблеме минимизации мощностей является использование стана Стеккеля – стана горячей прокатки листов с печными моталками, установленными на входе и выходе из клетей. Такой стан позволяет производить продукцию с мощностью от 600 до 1,2 млн т. в год [5].

Суть работы данного типа стана заключается в том, что сляб после нагревательной печи прокатывается несколько проходов в реверсивной черновой клетки с эджером, после отправляется в реверсивные клетки стана Стеккеля, где прокатывается без использования печных моталок до достижения высоты, позволяющей смотать полосу, далее, проходя направляющие ролики, полоса наматывается на одну из печных моталок. После полной смотки, на клетях стана Стеккеля устанавливается меньший зазор и меняется направление прокатки, полоса разматывается с печной моталки и направляющими роликами задается в клетки, после прокатки полоса наматывается на другую печную моталку. Процесс продолжается до тех пор, пока полоса не достигнет нужной высоты, обычно конечная высота полосы после стана Стеккеля варьируется в пределах от 1 до 20 мм, ширина до 2100 мм.

В настоящее время действующий стан Стеккеля (с длиной бочки рабочих валков 1200 мм) установлен на Новолипецком металлургическом комбинате, на нем прокатывают полосу высотой от 1,75 до 4 мм, шириной от 600 до 1050 мм из трансформаторной стали. Также стан 1700 с печными моталками представлен на заводе «Амурсталь» [6].

В ближайшие годы потребление нержавеющей стали в России также продолжит свою тенденцию роста. Большой перспективой обладает проект по созданию современного комплекса по производству плоского проката из нержавеющей марок стали в Волгоградской области – предприятие ООО «Русская нержавеющая компания» (РНК). Производительность нового предприятия составит до 500 тыс. т. готовой продукции из нержавеющей стали в год. В цехе горячего проката планируется также использовать технологический процесс, включающий в себя данный тип оборудования [7].

Технология плоской горячей прокатки на станах Стеккеля может позволить отечественным производителям перейти от импорта к изготовлению собственной нержавеющей продукции.

### Список литературы

1. Морозова П.Н. Проблемы и перспективы производства металлопроката из нержавеющей стали в России // Студенческая научная весна: машиностроительные технологии: всерос. науч.-техн. конф., Москва. - 2025.
2. В Q1 2025 года видимое потребление нержавеющей стали в РФ немного снизилось. - URL: <https://ussa.su/news/2347> (дата обращения: 22.03.2026).

3. В России почти четверть мировых запасов никеля. - URL: <https://clck.ru/3KEqWc> (дата обращения 31.03.2025).

4. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2022 году. Государственный доклад. Москва: ВИМС, 2023. 639 с.

5. Рожков А. И., Рожков А. И. Минимизация заводов по производству горячекатаного листа // Литье и металлургия. – 2010. – № 4(58). – С. 239-241.

6. Стан Стекла с моталками в печах // РУВИКИ. - URL: <https://clck.ru/3ShLV5> (дата обращения: 01.04.2026).

7. Русская нержавеющая компания. - URL: <https://www.rustainless.ru/> (дата обращения 01.04.2026).

УДК 621.77

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОТОЖЖЕННЫХ ЛИСТОВ ИЗ СПЛАВА СИСТЕМЫ АЛЮМИНИЙ-МАГНИЙ, ЛЕГИРОВАННОГО РЗМ И ПМ**

**Юрьев П.О., Байковский Ю.В., Дурнопьянов А.В., Константинов И.Л.**

*Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия  
e-mail: pyurev@sfu-kras.ru*

Производство листовых деформированных полуфабрикатов из сплавов серии 5XXX (система Al–Mg), легированных скандием (РЗМ) и цирконием (ПМ), является одной из актуальных задач применительно к сплавам, используемым в ответственных конструкциях [1]. Сплавы (01570, 1580) данной системы используются в крупногабаритных конструкциях ракетно-космической техники из-за высоких прочностных характеристик (в том числе при отрицательных температурах), технологичности, отличной свариваемости, их коррозионной стойкости. Вместе с тем реализация потенциала этих сплавов в листовом прокате в значительной мере определяется качеством исходной литой заготовки и режимами её последующей пластической деформации. Существующая технологическая цепочка накладывает на процесс ряд ограничений, обусловленных особенностями формируемой структуры слитка [2]. Одним из способов решения данной проблемы является возможность их нивелирования за счет технологических процессов последующей обработки сплавов, которые характеризуются высоким уровнем стабильности и управляемости процесса [3].

Для проведения исследования свойств и деформационного поведения использована литая заготовка, полученная методом полунепрервного литья, со следующим химический составом сплава, мас. %: Mg – 5,0±0,1; Mn – 0,5±0,01; Si – 0,1±0,01; Fe – 0,18±0,01; Cr – 0,12±0,01; Sc – 0,05±0,005; Zr – 0,08±0,005; прочие (сумм.) – 0,14±0,01; Al – ост.

Горячая прокатка проведена на стане горячей прокатки ДУО 330 до 5 мм. Холодная прокатка проведена на прокатном стане MDM ARIETE LS 400×240. Исходя из расчетов, ресурс деформируемости сплава при холодной прокатке составляет не менее 85 %. Термическая обработка (ТО) проведена в печи марки LAC PP 20/65.

Свойства определены методом статических испытаний на растяжение образцов при комнатной температуре на испытательной машине Walter+Bai

AGLFM 400 kN в соответствии с ГОСТ 1497-84. Заготовки вырезаны поперек направления прокатки. Результаты испытаний усреднены по параллельным измерениям при соответствующей температуре ТО. Полученные результаты подвергали статистической обработке с доверительной вероятностью 0,95. Результаты испытания холоднокатаных полуфабрикатов толщиной 1 и 3 мм представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Свойства холоднокатаных листов исследуемого сплава

| № п/п               | Температура ТО, °С | Время ТО, час | Временное сопротивление разрыву $\sigma_b$ , МПа | Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа | Относительное удлинение $\delta$ , % |
|---------------------|--------------------|---------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Листы толщиной 3 мм |                    |               |                                                  |                                                |                                      |
| 1                   | 225                | 3             | 380                                              | 275                                            | 13                                   |
| 2                   | 250                | 3             | 379                                              | 276                                            | 14                                   |
| 3                   | 275                | 3             | 376                                              | 272                                            | 15                                   |
| 4                   | 300                | 3             | 373                                              | 267                                            | 16                                   |
| 5                   | 325                | 3             | 371                                              | 261                                            | 17                                   |
| 6                   | 350                | 3             | 367                                              | 253                                            | 17                                   |
| Листы толщиной 1 мм |                    |               |                                                  |                                                |                                      |
| 1                   | 225                | 3             | 413                                              | 275                                            | 14                                   |
| 2                   | 250                | 3             | 410                                              | 277                                            | 15                                   |
| 3                   | 275                | 3             | 407                                              | 278                                            | 16                                   |
| 4                   | 300                | 3             | 396                                              | 272                                            | 17                                   |
| 5                   | 325                | 3             | 385                                              | 261                                            | 18                                   |
| 6                   | 350                | 3             | 382                                              | 250                                            | 19                                   |

В результате установлено, что временное сопротивление разрыву  $\sigma_b$  во всем диапазоне исследуемых температур имеет убывающий характер (с 413 до 382 МПа для 1 мм; с 380 до 367 МПа для 3 мм), относительное удлинение  $\delta$  – восходящий (с 14 до 19% для 1 мм; с 13 до 17% для 3 мм). Увеличение характеристик между прокатом разной толщины обусловлены степенью суммарной деформации. В зависимости от типа изделия и, как следствие, предъявляемых к нему требований, рекомендуемым режимом ТО является температурный диапазон 250-275°С, что обеспечивает необходимый уровень технологичности при удовлетворительно высоком уровне прочностных характеристик. При ТО 225°С ресурс выхода годного снижается до 85 %.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-19-20014, <https://rscf.ru/project/26-19-20014/>, за счет целевого финансирования (гранта) Красноярского краевого фонда науки*

### Список литературы

1. Study of deformability during the rolling of aluminum alloy 1580 doped with small additions of erbium and ytterbium / Konstantinov I.L., Baykovskiy Yu.V., Yuryev P.O., Bezrukikh A.I., Sidelnikov S.B., Saparova A.S., Mansurov Yu.N., Partyko E.G., Bozhko D.N. // Metallurgist. – 2025. – DOI: 10.1007/s11015-024-01833-z.
2. Investigation the structure in cast and deformed states of aluminum alloy, economically alloyed with scandium and zirconium / Yuryev P.O., Baranov V.N.,

Orelkina T.A., Bezrukikh A.I., Voroshilov D.S., Partyko E.G., Konstantinov I.L., Yanov V.V., Stepanenko N.A., Murashkin M.Y. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 115, No. 1-2. – P. 2633. – DOI: 10.1007/s00170-021-07206-z.

3. Study of structure and properties of industrial ingot made of alloy 1580 and determination of its deformability resource during cold rolling / Konstantinov I.L., Yuryev P.O., Baykovskiy Yu.V., Orelkina T.A. // Non-Ferrous Metals. – 2025. – No. 1. – P. 62-69. – DOI: 10.17580/nfm.2025.01.08.

УДК 669.187.26

## **МИНИМИЗАЦИЯ ДЕФЕКТОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ: КРОМОЧНЫЕ ТРЕЩИНЫ**

**Федосеева М.В.**

*ГАПОУ СО «Уральский политехнический колледж-МЦК», Екатеринбург, Россия  
e-mail: maria.fedosееva1996@mail.ru*

Анизотропная электротехническая сталь (ЭАС) является основным материалом для магнитопроводов силовых трансформаторов. Высокое содержание кремния (2,9–3,5 %), необходимое для снижения магнитных потерь и увеличения удельного электросопротивления, существенно повышает хрупкость материала, особенно в условиях холодной прокатки [1, 2]. Одним из наиболее распространённых дефектов, возникающих при производстве тонколистовой ЭАС, являются кромочные трещины, приводящие к обрывам полосы, снижению выхода годного и дополнительным затратам на обрезку. В работе рассмотрены основные причины образования кромочных трещин и предложены технологические решения для их минимизации.

Цель работы — выявить причины возникновения кромочных трещин и предложить меры по их минимизации.

Кромочные трещины образуются на кромках стальных листов в процессе производства. Основные причины:

1. Неравномерность деформации при прокатке:
  - разная скорость прокатки по ширине листа;
  - неравномерное распределение напряжений в металле.
2. Дефекты исходной заготовки:
  - наличие поверхностных трещин, сколов или неровностей на слябах;
  - неоднородность структуры металла.
3. Температурные режимы:
  - неправильный нагрев перед прокаткой (перегрев или недостаточный нагрев);
  - неравномерное охлаждение после прокатки [3].
4. Состояние прокатного оборудования:
  - износ валков;
  - неправильная настройка зазоров между валками.
5. Химический состав стали:
  - повышенное содержание вредных примесей (сера, фосфор);
  - отклонения от оптимального соотношения легирующих элементов [4].

6. Напряжения при смотке/размотке рулонов: остаточные напряжения в металле могут провоцировать образование трещин на кромках.

Для снижения количества кромочных трещин предлагается комплекс мер: контроль скорости прокатки и равномерности деформации; регулировка натяжения полосы в процессе прокатки; тщательный входной контроль слябов; удаление поверхностных дефектов перед прокаткой; обеспечение равномерного нагрева металла перед прокаткой; оптимизация режимов охлаждения после прокатки; регулярная проверка и замена изношенных валков; точная настройка зазоров и геометрии валков; соблюдение норм по содержанию легирующих элементов и примесей; корректировка состава стали для повышения пластичности; применение отжига для снятия внутренних напряжений; оптимизация параметров смотки рулонов; использование ультразвукового контроля и визуального осмотра для выявления трещин на ранних стадиях; автоматизация контроля геометрии кромки [5].

Практические результаты: внедрение предложенных мер на производстве позволит:

- снизить количество кромочных трещин на 30–50 %;
- повысить выход годного металла;
- улучшить магнитные и механические свойства электротехнической стали;
- сократить затраты на переработку бракованной продукции.

Минимизация кромочных трещин в производстве электротехнической стали требует комплексного подхода, включающего оптимизацию режимов холодной прокатки (снижение единичных обжати, увеличение числа проходов), применение сдвоенной прокатки для перераспределения напряжений, тщательную подготовку кромок подката и использование промежуточных термических операций. Реализация предложенных мероприятий позволяет сократить потери от брака на 5–10 %, а также повысит конкурентоспособность продукции и снизит экономические потери.

### Список литературы

1. Goss N.P. Electrical sheet and method and apparatus for its manufacture and test: US Patent № 1965559. 03.07.1934.
2. Франценюк И.В., Казаджан В.Б., Барятинский В.П. Достижения в улучшении качества электротехнических сталей на НЛМК // Сталь. – 1994. – № 10. – С. 35–38.
3. Миндлин Б. И., Настич В. П., Чеглов А. Е. Изотропная электротехническая сталь. — М.: Интернет Инжиниринг, 2006. — 240 с.
4. Влияние температуры посадки металла в нагревательную печь на трансформацию трещин, полученных при кристаллизации непрерывнолитых заготовок стали марки S355J2 / Ковалева И. А., Ходосовская Н. А., Венгура А. В., Гордиенко В. В. // Литьё и металлургия. — 2012. — № 1. — С. 10–13.
5. Правосудович В. В. и др. Дефекты стальных слитков и проката: справочник. — М.: Интернет Инжиниринг, 2006. — 384 с.
6. Дефекты стали: справочник / под ред. С. М. Новокшеновой, М. И. Виноград. — М.: Металлургия, 1984. — 199 с.
7. Бахтин А. С. Устранение причин образования дефекта «рулонная кривизна» на электротехнической изотропной стали // Современные материалы, техника и технологии. — 2015. - № 2(2). – С. 204 – 207.

## **ВЛИЯНИЕ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ С РАЗЛИЧНОЙ СКОРОСТЬЮ РАБОЧИХ ВАЛКОВ И ПОСЛЕДУЮЩЕГО РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИОННОГО ОТЖИГА НА ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ**

**Рашевский К. А., Песин А.М., Носов Л.В.**

*ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова», Магнитогорск, Россия  
e-mail: kirill45630@gmail.com*

Одним из эффективных подходов к управлению структурным состоянием низколегированных сталей является сочетание холодной пластической деформации и последующей термической обработки. При холодной прокатке с увеличением степени обжатия в металле накапливаются дефекты кристаллического строения, формируется текстура, что в дальнейшем может оказывать влияние на протекание рекристаллизационных процессов [1].

В этом отношении определённый интерес представляет асимметричная прокатка, при которой различие окружных скоростей валков обеспечивает наличие дополнительной сдвиговой деформации [2]. Такая схема может способствовать изменению условий формоизменения металла и особенностей эволюции структуры по сравнению с традиционной симметричной прокаткой.

Последующий рекристаллизационный отжиг позволяет снизить уровень внутренних напряжений, частично восстановить структурное состояние после холодной деформации и выявить влияние ранее сформированной текстуры и субструктуры на процессы образования новых зёрен. Поэтому исследование совмещённого воздействия холодной асимметричной прокатки и рекристаллизационного отжига представляет научный и практический интерес для низкоуглеродистых сталей.

### **Список литературы**

1. FEM simulation of influence of asymmetric cold rolling on throughthickness strain gradient in low-carbon steel sheets / D. Pustovoytov [et al.] // 13th International Conference on Superplasticity in Advanced Materials ICSAM 2018: Abstracts. – St. Petersburg, 2018. – P. 79.

2. Исследование влияния скоростной асимметрии на параметры различных процессов листовой прокатки / А. М. Песин, Х. Дья, А. Кавалек [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2014. – № 1(45). – С. 86–91.

## НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТЬ МАГНИЕВОГО СПЛАВА Mg-0.8Mn

Гайсина А.А., Никитина М.А., Валиев Р.З.  
Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия  
e-mail: azaliya021@mail.ru

В работе проведены исследования влияния комбинированной обработки, включающей в себя интенсивную пластическую деформацию (ИПД) методом равноканального углового прессования (РКУП), совмещенную с экструзией, на низкотемпературную сверхпластичность магниевого сплава Mg-0,8Mn. Исследованы механические свойства при растяжении сплава в различных состояниях. Испытания образцов после комбинированной ИПД-обработки при 150 и 180°C продемонстрировали пластичность более 200 %.

Широкое применение магниевых сплавов сдерживается низкой пластичностью из-за ГПУ-решётки и недостаточного количества систем скольжения. Решением является формирование ультрамелкозернистой структуры методами интенсивной пластической деформации, что активирует дополнительные механизмы (зернограничное скольжение). Легирование Mn дополнительно измельчает зерно и снижает критическое напряжение сдвига для небазальных систем скольжения, обеспечивая высокую пластичность, в том числе при комнатной температуре [1-4].

В результате проведения механических испытаний сплава Mg-0,8Mn после комбинированной обработки были получены кривые растяжения при температурах 150 и 180°C (рис. 1).

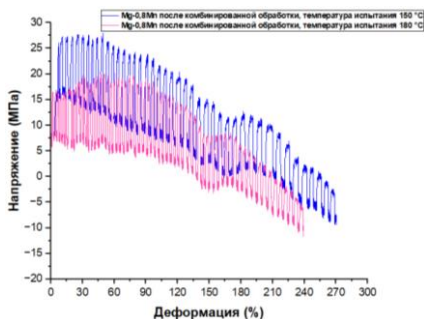


Рис. 1. Кривые растяжения сплава Mg-0,8Mn

Исходная рабочая длина образцов составляла 4 мм. После испытания при температуре 150 °C длина образца достигла 14,871 мм, что соответствует относительному удлинению 272 % по формуле  $(l - l_0)/l_0 * 100$  %. При температуре 180 °C длина образца составила 13,568 мм, что соответствует удлинению 239 % (рис. 2).

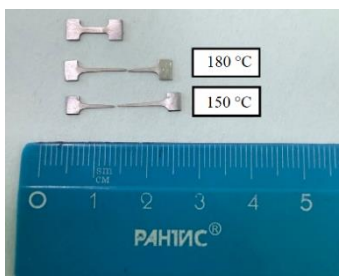


Рис. 2. Образцы сплава Mg–0,8Mn после деформирования

Полученные значения хорошо согласуются с данными кривых растяжения, где также зафиксировано, что наибольшая пластичность достигается при 150 °С, а с повышением температуры наблюдается её снижение.

*Работа выполнена при поддержке РНФ, проект No 22-19-00445-П. Исследовательская часть работы выполнена с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» ФГБОУ ВО УУНУТ.*

#### Список литературы

1. Superior ductility Mg-Mn extrusion alloys at room temperature obtained by controlling Mn content / C.C. Li, Z.H. Xia, X.G. Qiao a, I.S. Golovin, M.Y. Zheng // Materials Science and Engineering: A. – 2023. – Т. 869.
2. Hidetoshi Somekawa. Room temperature grain boundary sliding behavior of fine-grained Mg-Mn alloys / Hidetoshi Somekawa, Dudekula Althaf Basha, Alok Singh // Materials Science and Engineering: A. – 2018. – Т. 730. С. 355-362.
3. Рейнор Г. В. Металловедение магния и его сплавов. – М.: Металлургия, 1964 / пер. с англ. – 250 с.
4. Achieving exceptional room-temperature ductility in ultrafinegrained Mg-0.8Mn alloy via high pressure torsion / C.C. Li, R.E. Kim, X.G. Qiao, W.T. Sun, L. Yuan, H.S. Kim, T. Sakai, R.Z. Valiev, M.Y. Zheng // Journal of Alloys and Compounds – 2025. – Т. 1020.

УДК 621.778.01

#### ПРОБЛЕМЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПРОВОЛОКИ ИЗ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕГО СПЛАВА 3лМ80

**Матюшин Е.В.<sup>1</sup>, Логинов Ю.Н.<sup>2</sup>, Черепов А.А.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> АО «Екатеринбургский завод по обработке цветных металлов»,  
Верхняя Пышма, Россия

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента  
России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия  
e-mail: e.matyushin@ezost.ru

Сплавы системы Au-Cu используются для изготовления проволоки и применяются в качестве материала ответственных контактов слаботочной

аппаратуры. К числу таких материалов относится сплав ЗлМ80. При рассмотрении диаграммы состояния Cu – Au оказывается, что содержанию 20% меди соответствует минимум графика температуры ликвидус, равной 910°C (рис., стрелки показывают зоны фазовых превращений).

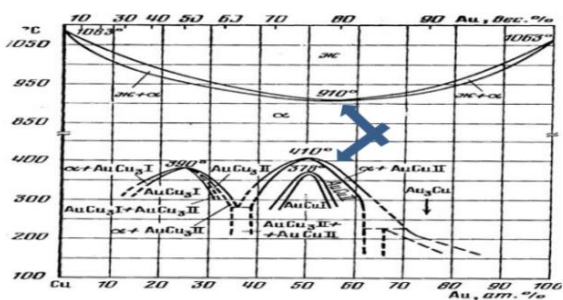


Рис. 1. Диаграмма состояния Cu – Au

При этом линии солидус и ликвидус близки друг к другу, то есть зона существования смеси жидкая фаза +  $\alpha$  - твердый раствор довольно узкая. Сплавы Au-Cu испытывают фазовое превращение из разупорядоченного состояния в упорядоченное [1]. При охлаждении ниже 400-410°C исходная разупорядоченная ГЦК кристаллическая решетка перестраивается в атомно-упорядоченную решетку и превращается в тетрагональную решетку с уменьшением объема до 1%. Такой переход возможен при назначении температур отжига в маршруте волочения. В тетрагональной решетке в отличие от кубической решетки нет равенства сторон куба: одна из сторон имеет другой размер. То есть решетка не имеет полной симметрии размеров, что характерно для куба и что создает повышенную анизотропию материала. Следует отметить, что эта разница может нивелироваться, если ориентация элементарной ячейки выглядит случайным образом, но если есть преимущественная ориентация в виде текстурованности металла, то изменение объема приводит к неравным изменениям размеров обрабатываемого продукта.

На предприятии АО «Екатеринбургский завод по обработке цветных металлов» при обработке вышеуказанного сплава часто происходит трещинообразование по ходу маршрута обработки заготовки для волочения проволоки диаметром 0,1-1,0 мм.

В попытке решить эту проблему выполнен ряд промышленных экспериментов, в том числе:

- изменение параметров при плавке (температура разливки, скорость охлаждения, диаметры прутков, массы плавки, микролегирование, сверхчистые шихтовые материалы);
- изменение параметров отжига (температура отжига, выдержка, использование соляных ванн, чистота и температура воды для охлаждения);
- изменение параметров термомеханической обработки (степени деформации за проход, накопленной степени деформации между отжигами).

Улучшенные результаты получены при проведении дополнительного отжига с медленным охлаждением в восстановительной атмосфере для снятия внутренних напряжений.

Следует отметить, что обработка давлением материалов, имеющих при изменении температуры фазовые превращения, приводит к опасности появления остаточных напряжений, поэтому имеется рекомендация не пересекать линии графика таких переходов [2]. Дополнительную нестабильность процесса пластической деформации создает проявление эффекта Портевена –Ле Шателье, который был выявлен для близкого по составу сплава [3]. Улучшение текстурного состояния проволоки может быть достигнуто также изучением влияния угла образующей волоки в процессе утонения продукта [4, 5].

### Список литературы

1. The change in the shape of gold–copper alloy samples during a disorder - order phase transformation / Glukhov A.V., Kazantsev V.A., Volkov A.Y., Antonov B.D. // *Technical Physics*. – 2020. – V. 65. - No. 1. – P. 87-92. – DOI:10.1134/S1063784220010065.
2. Wijler A., Schade van Westrum J., van den Beukel A. A new type of stress-strain curve and the Portevin-Le Chatelier effect in Au (14 at.% Cu) // *Acta Metallurgica*. – 1972. - V. 20. - Iss. 3. - P. 355-362.
3. Логинов Ю.Н., Овчинников А.С. Влияние присутствия второй фазы на свойства двойных латуней // *Заготовительные производства в машиностроении*. - 2017. - Т. 15. - № 4. - С. 187-190.
4. Логинов Ю.Н., Первухин А.Е. Роль дополнительных сдвиговых деформаций при волочении золота в формировании свойств конечного продукта // *Труды конференции «Трубы-2014»*, Челябинск. – 2014. - С. 314-316.
5. Логинов Ю.Н. Влияние угла рабочей зоны волоки на напряженное состояние в очаге деформации при волочении меди. // *Цветные металлы*. - 2010.- № 3.- С. 94- 97.

УДК 669.717

## ВОЗМОЖНОСТЬ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ СЛОИСТЫХ ПОЛОС ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

**Яковлев С.И.<sup>1</sup>, Глинских П.И.<sup>1</sup>, Замараева Ю.В.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> *ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод»,  
Каменск-Уральский, Россия*

<sup>2</sup> *Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия  
e-mail: YakovlevSI@kumz.ru*

Исследование плакирования металлов и сплавов, а также горячей прокатки слоистых материалов является актуальным в настоящее время [1].

В работе представлен результат реализованной в условиях АО «КУМЗ» горячей прокатки полос, состоящих из двух алюминиевых сплавов разных групп: авиали (группа сплавов Al-Mg-Si) и силумина (AlSi10Mg). Для приварки данных

сплавов между собой использована прослойка в виде планшета из алюминиевого сплава А5 ( $Al \geq 99,5\%$ ). Однако даже с применением данного промежуточного слоя, легко диффундирующего при горячей прокатке в каждый из сплавов и способствующего их соединению, есть сложность в подборе режимов процесса деформации.

В ходе работы первым этапом осуществлена совместная горячая прокатка плиты из силумина и планшета из сплава А5. Полученная плакированная полоса представлена на рис. 1.



Рис. 1. Полоса из силумина  $AlSi10Mg$  с плакирующим слоем из сплава А5

Следующим этапом осуществлено соединение путем горячей прокатки вышепоказанной плакированной полосы (здесь полоса становится планшетом) с плитой из авиала. В процессе деформации выявлен изгиб планшета вверх с обоих его концов (рис. 2, а). При осмотре планшета обнаружено отсутствие визуальных следов его соединения с плитой, а также растрескивание раската по узким граням в местах приварки планшета (рис. 2,б). Возможными причинами вышеуказанного могут являться: разность сопротивления деформации сплавов планшета и основы; неверно подобранный режим обжатий либо недостаточное обжатие, при котором не удалось достичь деформации основы и, как следствие, разрушения окисных плёнок и последующей диффузии слоев планшета в основной металл.



Рис. 2. Изгиб конца планшета вверх (а), растрескивание раската по узким граням в местах приварки планшета (б)

С целью устранения выявленного изгиба концов планшета и растрескивания приняты следующие меры: в 4 раза уменьшена толщина планшета (специально отметим, что под планшетом здесь имеется ввиду полоса из силумина, плакированная сплавом А5), на  $70^{\circ}C$  увеличена температура начала горячей прокатки, в среднем в 2 раза понижена величина абсолютного обжатия за проход с увеличением общего количества проходов. При скорректированной горячей прокатке приварка планшета осуществлена без недостатков. В итоге прокатка

осуществлена до толщины полосы 7 мм. На рис. 3 показана полученная горячекатаная полоса, смотанная в рулон.



Рис. 3. Горячекатаная полоса, смотанная в рулон

В дальнейшем в условиях АО «КУМЗ» возможна холодная прокатка данного рулона до толщин 0,5-3,0 мм. Готовая продукция может быть использована при изготовлении приборов для охлаждения и нагрева в различных отраслях промышленности и для бытовых нужд.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.*

#### Список литературы

1. Технологические особенности производства плакированных листов из твердых алюминиевых сплавов в ОАО «КУМЗ» / Дегтярев А.В., Мальцева Т.В., Глинских П.И., Яковлев С.И. // Технология легких сплавов. – 2024. – № 2. – С. 40–46.

УДК 669.715

### ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ СЕРИИ 6000 И ОСОБЕННОСТИ ИХ ОБРАБОТКИ

**Емельянов Т.Д., Логинов Ю.Н.**

*ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия  
e-mail: amiryam04@bk.ru*

Судя по данным сетевых изданий, в мировой практике сложилась своеобразная пропорция по выпуску изделий из алюминиевых сплавов среди серий по марочному составу от серии 1000 до серии 8000. Наиболее востребованными оказались сплавы серии 6000 (система алюминий – магний – кремний). Это объясняется тем, что они востребованы отраслями с высокими объемами потребления: гражданское строительство и автомобильная промышленность. Это объясняется высоким уровнем пластичности, что позволяет применять различные методы обработки давлением без ощутимого появления дефектности [1]. Потребителей здесь устраивает и не самая высокая прочность изделий. Далее по уровню потребления идет серия 3000 (система алюминий – марганец), что также оправдано высоким уровнем пластичности и малыми

энергетическими затратами при обработке давлением из-за невысоких значений сопротивления деформации, масштаб востребованности при создании упаковочных материалов. Далее следует серия 5000 (алюминий – магний) с превалярованием сплавов с содержанием магния на пределе растворимости (5-6%). Это объясняется более высоким уровнем прочностных свойств относительно предыдущих аналогов, а также повышенной коррозионной стойкостью, что чаще всего востребовано в судостроении. Играет роль также отсутствие необходимости термического упрочнения сплава, что позволяет экономить энергию. Как ни странно, сплавы серии 2000 (дюралюмины, система алюминий – медь – магний), несмотря на высокую востребованность в авиации, не вошли в первичный список, хотя в более ранний период они заняли бы одно из первых мест. Наибольший объем производства алюминиевых сплавов сейчас наблюдается в Китае, для него же характерен большой объем магния, который часто входит в состав алюминиевых сплавов.

Одна из особенностей обработки сплавов серии 6000 – возможность появления крупнокристаллического ободка (ККО) в приповерхностной зоне горячепрессованных изделий, что, правда, характерно не только этой серии. Разнозернистость для сплавов серии 6000 наблюдается и при горячей прокатке, но не в виде ободка, а в виде слоистого строения [2]. Аномальный рост зерен может наблюдаться также при изготовлении кованых изделий [3].

В прессованных изделиях на периферии поперечного сечения наблюдается зона крупных кристаллов. В случае прессования зона может иметь различную толщину, увеличиваясь от начала прессования к концу процесса [4]. Переход от зоны нормальных поликристаллов к зоне крупнокристаллического строения может сопровождаться появлением трещин [5], поэтому в любом случае появление ККО нежелательно.

Наличие ККО свидетельствует о неоднородности воздействия на металл в течение того или иного метода обработки. Например, при прессовании можно сохранять приемлемую скорость перемещения активного инструмента, но скорость деформации при этом может увеличиваться, что связано со сложным строением очага деформации [6]. Одним из приемов, опробованных в промышленности, является снижение температуры деформации до относительно невысоких значений - на уровне 300-350°C [7]. Однако следует отметить, что такое понижение приводит к увеличению прочностных свойств в частности сопротивления деформации сплава, что может сказаться на работоспособности прессового инструмента и должно соответствовать силовым возможностям прессового оборудования.

### Список литературы

1. Структура, свойства и применение сплавов системы Al - Mg - Si - (Cu) / Колобнев Н. И., Бер Л. Б., Хохлатова Л. Б., Рябов Д. К. // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2011. – № 9(675). – С. 40-45.
2. Влияние скорости горячей прокатки на структурно-текстурное состояние плиты алюминиевого сплава системы AL - SI – Mg / Лобанов М.Л., Логинов Ю.Н., Данилов С.В и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. - 2018. - № 5 (755). - С. 49-54.

3. Analysis of abnormal grain growth in 6061 aluminum alloy during high-temperature solution treatment following forging / Juncheng Mao, Fanlin Zheng, Shiquan Huang et al. // *Materials Science and Engineering*: - 2025. – V. 932 – No. 148252

4. Логинов Ю.Н., Буркин С.П., Сапуnji В.В. Влияние структуры прессованной полосы алюминиевого сплава 6061 на изменение ее поперечных размеров при правке растяжение // *Цветные металлы*. – 2002. - № 7. - С. 71-74.

5. Shogo Oda, Shun-Ichiro Tanaka. Grain boundaries with high  $\Sigma$  value and strain in grain matrix induce crack initiation in extruded 6000 series aluminium alloys, // *Materials Science and Engineering: A*. – 2022. - V. 834. – No. 142630.

6. Логинов Ю.Н., Антоненко Л.В. Управление средней скоростью деформации при прессовании сплошных заготовок // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. - 2011. - № 2. - С. 11-16.

7. Клочков Г. Г., Клочкова Ю.Ю., Романенко В.А. Влияние температуры деформации на структуру и свойства прессованных профилей сплава В-1341 системы Al-Mg-Si // *Труды ВИАМ*. – 2016. – № 9(45). – С. 3 – 11.

УДК 620.22: 630.377.42

## **ОСОБЕННОСТИ ГИБКИ ЗАГОТОВОК КРОНШТЕЙНОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ВЫРУБКОЙ И ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКОЙ**

**Соченко Т.В., Мифтахов Ф.К., Каблуков В.В., Исаков Т.Ф.**  
*ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»,  
Набережные Челны, Россия  
e-mail: ferrum-ferrum@inbox.ru*

Для изготовления многих деталей машиностроения применяется листопрокат, в том числе и высокопрочный, из различных марок сталей. Зачастую конструктивное исполнение штампованных деталей содержит элементы сложной геометрии с малыми радиусами перехода, качество которых необходимо обеспечить в процессах холодной пластической деформации. Выявлению и устранению дефектов изделий, получаемых из листового проката, посвящено множество публикаций, в том числе качеству гибки радиусом, близким к толщине листопроката в различных публикациях уделяется значительное внимание [1-4].

В нашей работе исследованию подвергались кронштейны роликовой тележки, входящие в состав механизма складывающейся крыши грузового полуприцепа. Деталь изготавливается из стального листопроката толщиной 3 мм. С одной стороны, деталь выполнена в виде элемента П-образного сечения (рис. 1, поз. 1), которым она вставляется в поперечину, а с другой стороны, присутствует отогнутая на 90 градусов стенка. В конструкции детали выполнены отверстия, в которые устанавливаются ролики, а в средней части детали находятся угловые элементы (рис. 1, поз. 2) с выполненными внутри них отверстиями.

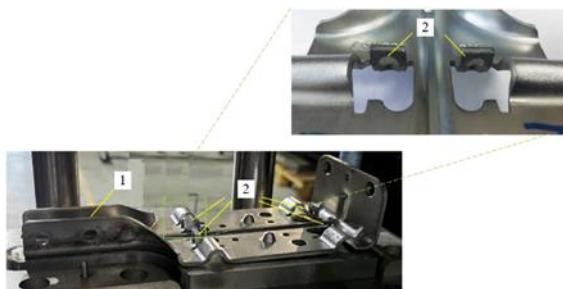


Рис. 1. Внешний вид детали «кронштейна роликовой» тележки:  
1 – бурт; 2 – угловые элементы

Заготовки для детали изготавливали на вырубном прессе и лазерной резкой, которые далее подвергались штамповке для формообразования ребер, придающих жесткость детали и базовых отверстий, а затем гибочной операции, которая обеспечивает формообразование П-образного бурта и угловых элементов. Гибка элементов выполнялась на угол 90 градусов относительно верхней поверхности основания кронштейна. Деталь имеет значительный запас прочности и в процессе эксплуатации при общем исправном механизме ее надежность обеспечивается. Слабым местом в детали являются угловые элементы. При нарушении процесса складывания полотна крыши в процессе эксплуатации может происходить их разрушение в месте радиусного изгиба.

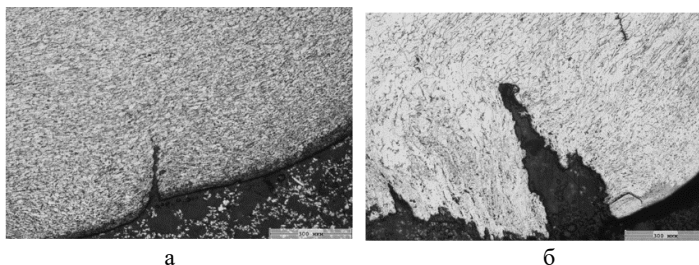


Рис. 2. Микроструктура поверхностного слоя углового элемента различной технологии формообразования заготовки с внешней стороны дефектов, глубиной:  
а – после вырубки – 0,15 мм; б – лазерной резки – 0,67 мм

Проведенные исследования гибки угловых элементов кронштейна из стали 08КП и 20КП с радиусом, близким к толщине металла, выявили наличие трещин после гибки заготовок, полученных как вырубкой, так и лазерной резкой (рис. 2). После гибки вырубленных заготовок микротрещины имеют глубину до 0,15 мм, после лазерной резки наблюдается их большее количество, глубиной до 0,7 мм. Кроме того, по краям и дну микротрещин обнаружены следы выкрашивания материала, что связано с наличием литой закаленной структуры поверхностного слоя, возникающей после термического воздействия лазерного луча в процессе резки металла.

Установлено, что использование заготовок, вырезанных лазером из листопроката, не дает преимуществ по отношению к заготовкам, полученным путем их вырубki на прессе. В некоторых случаях лазерная вырезка заготовок приводит к получению деталей более низкого качества, особенно по кромкам в местах холодной гибки металла.

### Список литературы

1. Вилимок Я.А., Евдокимов А.К. Сравнительный анализ предельной штампуемости при двусосном растяжении // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2014. - № 7. - С. 71-75.
2. Козлов Е. Д., Боткин А.В. Компьютерное моделирование гибки детали «Скоба» // Молодежный вестник УГАТУ. - 2024. - № 1(30). - С. 60-65.
3. Клочков В. Н., Подымако М. Э., Колесов И. А. Моделирование технологического процесса гибки листовых деталей на этапе проектирования штампового оборудования // Вестник Брестского государственного технического университета. - 2024. - № 2(134). - С. 98-103.
4. Нестеренко Е. С., Щербов М. И. Моделирование процесса гибки детали "уголок" с углом гиба больше 90 градусов в усовершенствованном штампе с упругими элементами // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2021. - № 6. - С. 380-383.

УДК 504.5:669

## СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ ТОКСИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ РАБОТЕ ПРОКАТНОГО ЦЕХА

**Ханнанова А.Е.**

*ГАПОУ СО «Уральский политехнический колледж-МЦК»,  
Екатеринбург, Россия  
e-mail: Adelinaha2008@gmail.com*

Прокатные цеха металлургических предприятий оказывают заметное воздействие на окружающую среду и условия труда персонала. В процессе горячей прокатки металла образуются выбросы, содержащие оксиды углерода и азота, пыль окалины, металлические частицы, а также аэрозоли смазочно-охлаждающих жидкостей. Накопление данных веществ в воздухе рабочей зоны приводит к ухудшению санитарно-гигиенических условий, поэтому снижение токсичных выбросов является важной задачей при эксплуатации оборудования [1].

Основными источниками загрязнения воздуха являются нагревательные печи, прокатные клети и участки охлаждения металла. Во время нагрева заготовок происходит сгорание топлива, сопровождающееся образованием газообразных продуктов. При деформации металла разрушается слой окалины, что приводит к образованию мелкодисперсной пыли. Дополнительное загрязнение возникает при применении смазочно-охлаждающих жидкостей, которые частично испаряются и образуют аэрозоли в рабочей зоне цеха [2]. Для снижения количества вредных выбросов применяется установка систем газоочистки. На первой стадии очистки используются циклоны, предназначенные

для улавливания крупных частиц пыли. Далее применяются рукавные фильтры, обеспечивающие более глубокую очистку воздуха от мелкодисперсных частиц. В некоторых случаях используются электрофильтры, позволяющие эффективно удалять аэрозоли и дымовые включения. Применение комбинированных систем очистки позволяет значительно снизить концентрацию загрязняющих веществ в выбросах [2, 3].

Снижение токсичных выбросов также возможно за счет модернизации нагревательных печей. Использование современных горелочных устройств обеспечивает более полное сгорание топлива и уменьшает образование вредных газов. Переход на природный газ позволяет снизить содержание сернистых соединений и уменьшить пылеобразование. Дополнительно применяется автоматическое регулирование температурного режима, что уменьшает образование окалины и снижает количество твердых выбросов [3].

Дополнительным мероприятием является применение локальных отсосов и общеобменной вентиляции. Установка вытяжных систем в местах образования пыли и аэрозолей позволяет своевременно удалять загрязненный воздух. Использование аспирационных установок предотвращает распространение вредных веществ по помещению цеха и улучшает условия труда работников. Также применяется герметизация отдельных участков оборудования, что способствует снижению выбросов в рабочую зону [1, 4].

Таким образом, снижение выбросов токсичных веществ при работе прокатного цеха достигается путем внедрения систем газоочистки, совершенствования нагревательных печей и применения эффективных вентиляционных систем. Реализация данных мероприятий позволяет улучшить экологические показатели производства, снизить концентрацию вредных веществ и повысить безопасность труда персонала [1–4].

### Список литературы

1. Белов С.В. Охрана окружающей среды. – М.: Высшая школа, 2008. – 335 с.
2. Газоочистка металлургических производств / од ред. Л.С. Левина. – М.: Металлургия, 2005. – 256 с.
3. Жучков В.И. Экология металлургического производства // Металлург. – 2012. – Т. 1. – № 11. – С. 71–77.
4. Грудев А.П. Теория обработки металлов давлением // Металлургические процессы обработки давлением: труды науч.-практ. конф. – М., 2008. – Т. 1. – С. 116–118.

## ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИОДЕГРАДИРУЕМОГО СПЛАВА Zn-0.5%Ag-0.8%Al

**Нугаманов Ф.В.<sup>1</sup>, Хафизова Э.Д.<sup>1,2</sup>, Исламгалиев Р.К.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия*

<sup>2</sup>*Институт металловедения и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,  
Москва, Россия*

*e-mail: nugamanovflyur@yandex.ru*

В современной медицине актуальным является вопрос применения биodeградируемых имплантатов в ортопедии. Среди материалов, потенциально применимых для таких имплантатов, рассматриваются и исследуются сплавы на основе цинка и магния. Эти металлы обладают необходимыми для биоразстворимых имплантатов свойствами, такими как биосовместимость и биodeградируемость. Однако из-за существенного недостатка магниевых сплавов — повышенной и трудноконтролируемой скорости коррозии — активные исследования проводятся в области цинковых биodeградируемых сплавов. Проблемой цинковых сплавов являются низкие значения механических свойств. Повышение механических свойств цинковых сплавов достигается за счет легирования в сочетании с деформационной обработкой, в частности методами интенсивной пластической деформации [1].

В данной работе исследован цинковый биodeградируемый сплав Zn – 0,5%Ag – 0,8%Al, подвергнутый деформационной обработке методами интенсивной пластической деформации: равноканальным угловым прессованием (РКУП) и интенсивной пластической деформацией кручением (ИПДК). Проведены измерения микротвердости и механические испытания на растяжение.

Установлено, что деформационная обработка позволяет повысить механические характеристики сплава (табл. 1.). Наибольший прирост прочностных свойств достигнут после РКУП при 350°C: предел прочности ( $\sigma_b$ ) увеличился с 42 до 90 МПа, предел текучести ( $\sigma_t$ ) — с 57 до 100 МПа, относительное удлинение ( $\delta$ ) — с 6 до 22%. Обработка методом ИПДК ( $n=10$ ) также привела к росту прочностных показателей ( $\sigma_b$  — до 63 МПа,  $\sigma_t$  — до 75 МПа) при увеличении пластичности до 25% [2]. Значения микротвердости (HV) во всех исследованных состояниях не изменялись.

Полученные результаты подтверждают эффективность примененных методов интенсивной пластической деформации для улучшения механических свойств биodeградируемых цинковых сплавов.

Таблица 1 – Механические свойства Zn–0,5%Ag–0,8%Al в зависимости от режима деформирования

| Состояние      | HV         | $\sigma_b$ , МПа | $\sigma_t$ , МПа | $\delta$ , % |
|----------------|------------|------------------|------------------|--------------|
| Исходное       | 68,55±7,49 | 42±5             | 57±3             | 6±1          |
| РКУП при 350°C | 67,2±5,00  | 90±10            | 100±5            | 22±4         |

|           |           |      |      |      |
|-----------|-----------|------|------|------|
| ИПДК n=10 | 68,4±6,20 | 63±3 | 75±4 | 25±4 |
|-----------|-----------|------|------|------|

### Список литературы

1. Ситдигов В.Д., Хафизова Э.Д., Поленок М.В. Влияние интенсивной пластической деформации на структуру и свойства сплава Zn-1%Li-2%Mg // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2023. - № 29(6). – С. 35–43.

2. Structure and mechanical properties of Zn-1Cu-1Mn and Zn-0.8Al-0.5Ag alloys processed by ECAP / Abdрахманова E.D., Nugamanov F.V., Khafizova E.D. et al. // Russ Phys Journal. - 2024. – No. 67. – P. 1661–1667.

УДК 621.7.011

## РАСЧЕТ УГЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИЙ ТЕЧЕНИЯ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ СТАНА РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ ПРОКАТКИ

**Кин Т.Ю., Хакимова А.Н.**

*Университет науки и технологий МИСус, Москва, Россия  
e-mail: tatianakin@mail.ru*

Радиально-сдвиговая прокатка (РСП) относится к эффективным процессам обработки давлением и востребована для получения деформированных полуфабрикатов круглого сечения в широком марочном сорimente материалов благодаря интенсивной проработке структуры и обеспечению баланса прочностных и пластических характеристик [1].

При РСП реализуются уникальные траекторно-скоростные состояния металла, которые отсутствуют в других стационарных процессах получения прутков и профилей [2, 3]. В частности, изменение направления вектора скорости течения металла в очаге деформации при РСП формирует развитую поворотную деформацию, которая может приводить как к повышению свойств металла, так и к снижению его деформируемости и образованию несплошностей, особенно при недостаточной прочности межзеренной связи. В работе выполнена аналитическая оценка поворотной деформации при радиально-сдвиговой прокатке и проанализирован характер ее распределения с учетом цикличности процесса.

На основе методики траекторно-скоростного анализа [2, 3] установлена формула связи угла поворота (определяемого как разность углов подъема произвольной траектории до и после очага деформации) с количеством циклов деформации  $N$ , углом подачи  $\beta_1$  и углом конусности  $\alpha$  обжимного участка:

$$\Delta\bar{\beta} = \text{arcctg} \left[ \bar{r} \cdot \frac{\text{ctg}\beta_1 \cdot (\text{ctg}\beta_1 + N \cdot C_\alpha) + \bar{r}^{-2}}{N \cdot C_\alpha} \right], \quad (1)$$

где  $\bar{r}$  – относительный радиус траектории;  $C_\alpha = 2\pi \cdot \text{tg}\alpha$  – константа процесса РСП при заданной установке валков и их калибровке.

Согласно проведенному расчету, угол поворота имеет резко неравномерное распределение по радиусу заготовки. В около центральных, достаточно тонких слоях при  $\bar{r} = 0,10-0,30$  отмечается весьма острый максимум с прилегающими

зонами крутого градиента, особенно со стороны центра (рис.1). С увеличением количества циклов зафиксирован рост максимальных значений  $\Delta\beta$ , смещение точки максимума к оси заготовки и резкое увеличение перепада между центром и максимумом.

Подобный выраженный максимум с прилегающими зонами крутого градиента может способствовать образованию характерных несплошностей и снижению деформируемости заготовок. При этом при уменьшении количества циклов деформации отмечается снижение максимумов угла поворота.

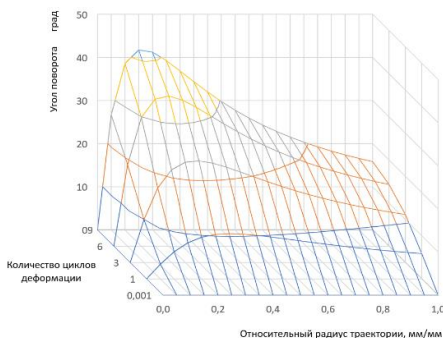


Рис. 1. Влияние числа циклов деформации  $N$  и относительного радиуса траектории на угол поворота  $\Delta\beta$

Результаты проведенной расчетно-аналитической оценки параметров траекторий показывают, что для повышения деформируемости материала при РСП целесообразно ограничение максимальных углов поворота скорости в околоцентральных слоях, что может быть реализовано за счет снижения цикличности процесса. Полученные данные позволяют уточнить существующие методики оценки протекания процесса и совершенствовать РСП как уже обрабатываемых, так и новых материалов.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-01304, <https://rscf.ru/project/25-29-01304/>*

### Список литературы

1. Review of scientific-applied research and industrial application of radial shear rolling technology / Galkin S., Kin T., Gamin Y., Aleshchenko A., Karpov B. // CIS Iron and Steel Review. – 2024. – Vol. 27. – P. 35-47. DOI:10.17580/cisistr.2024.01.06.
2. Galkin S.P. Regulating radial-shear and screw rolling on the basis of the metal trajectory // Steel in Translation. – 2004. – Т. 34. – № 7. – С. 57-60.
3. Галкин С.П. Теория и технология стационарной винтовой прокатки заготовок и прутков малопластичных сталей и сплавов: автореф.... дис. д-ра. техн. наук. – М.: МИСиС, 1998. – 41 с.

## **ИЗУЧЕНИЕ ДИАГРАММЫ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ СТАЛИ 30Г2 ДЛЯ ОЦЕНКИ ДЕФОРМАЦИОННОГО УСКОРЕНИЯ ПРИ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ**

**Лешок В.А.**

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь  
e-mail: leshok.vlad@bntu.by*

Одним из приоритетных направлений развития химико-термической обработки (ХТО) является разработка технологических приемов, обеспечивающих ускорение (интенсификации) диффузионного насыщения [1, 2]. Среди таких приемов важное место занимает предварительная пластическая деформация [3]. Однако температурно-временные режимы ХТО приводят деформированную сталь к равновесному недеформированному состоянию. Следовательно, для обоснованного применения данного приема ускорения необходимо установить температурно-временную область, в пределах которой сохраняется деформированное состояние [4, 5].

Объектом исследования выступала сталь марки 30Г2. В ходе исследования дюрометрические исследования проводили по методу Роквелла. На образцах создавали объемную пластическую деформацию со степенью 40 %. Деформированные образцы помещали в контейнер и проводили серию отжигов при различных температурах и временах выдержки, соответствующих реальным температурно-временным режимам ХТО. Отжиг являлся имитацией термической части реального процесса ХТО без диффузионного насыщения. Полученные результаты позволяли оценить влияние температуры и времени ХТО на устойчивость деформированного состояния. Контейнеры содержали балластный наполнитель и плавкий затвор. Это гарантировало герметизацию контейнера во время отжига, исключая контакт поверхности образцов с окислительной атмосферой печи. После завершения отжига контейнер извлекали из печи, охлаждали и распаковывали. Для каждой пары параметров температура и время выдержки фиксировали значение поверхностной твердости. Совокупность таких значений формировала массив данных, позволяющий судить о степени разупрочнения предварительно деформированного материала в ходе имитации термической части реальной ХТО. Если при данной температуре и времени твердость после отжига была выше исходной твердости недеформированного материала, то фиксировали, что данные режимы приводят к сохранению деформированного состояния. С другой стороны, если при данной температуре и времени твердость после отжига приближалась к исходной твердости недеформированного материала, то фиксировали полное снятие деформированного состояния (рекристаллизацию). Для каждой исследуемой точки температура-время проводили серию измерений не менее чем на пяти образцах с последующей статистической обработкой результатов.

На основе экспериментальных данных была построена диаграмма рекристаллизации стали 30Г2, позволяющая оценить возможности сохранения деформированного состояния в условиях ХТО (рис. 1). На диаграмме присутствуют две характерные области. Ниже линии разделения существует

область сохранения деформированного состояния. Для каждой точки этой области после отжига твердость не возвращается к исходному (недеформированному) уровню, т.е. сохраняется деформированное состояние. Выше линии разделения существует область рекристаллизованного состояния. Для каждой точки этой области после отжига твердость возвращается к исходному (недеформированному) уровню, т.е. отмечается рекристаллизованное состояние.

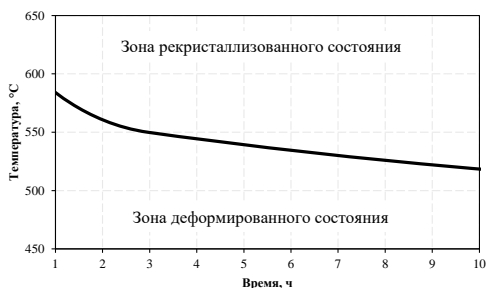


Рис. 1. Диаграмма рекристаллизации стали 30Г2, степень деформации 40 %

### Список литературы

1. Ворошнин Л.Г., Менделеева О.Л., Сметкин В.А. Теория и технология химико-термической обработки : учеб. пособие. – М.: Новое знание ; Мн. : Новое знание, 2010. – 304 с.
2. Каменичный И.С. Спутник термиста. – 2-е изд., испр. и доп. – Киев: Техника, 1978. – 230 с.
3. Константинов В.М., Лешок В.А., Штемпель О.П. Анализ влияния предварительной и циклической пластической деформации на химико-термическую обработку конструкционных сталей // Механика машин, механизмов и материалов. – 2024. – № 1(66). – С. 37–42.
4. Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина Л.М. Рекристаллизация металлов и сплавов. – 3-е изд. – М.: МИСиС, 2005. – 432 с.
5. Рогельберг И.Л., Шпичинецкий Е.С. Диаграммы рекристаллизации металлов и сплавов: справочник. – М.: Металлургиздат, 1950. – 280 с.

## ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ФАКТОРА ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗАХВАТ И УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ

**Мелентьев С.Ю., Чигиринский В.В., Кузьмин С.Л.**  
*Рудненский индустриальный университет, Рудный, Казахстан*  
*e-mail: melentev.98@inbox.ru*

Анализ захватывающей способности запредельного очага деформации при прокатке показал, что известный метод определения захвата металла валками, путем установления соотношений между втягивающими силами трения и выталкивающими нормального давления, характеризует процесс захвата не в достаточной степени, т.к. не объясняются некоторые особенности процесса прокатки. Поэтому авторами предлагается дополнить модель захвата еще одним фактором – растягивающим действием со стороны зоны отставания взаимодействующих сил.

Переход от запредельного захвата к захвату переходного процесса прокатки сопровождается появлением нового качества. Возникает новый процесс прокатки с реализацией захвата при отсутствии зоны опережения. Исследования показали, что такой процесс возможен, и он изменяется при многопараметрическом воздействии на очаг деформации. С изменением угла захвата изменяется величина силы растяжения. Это позволяет использовать данное воздействие как регулирующей фактор переходного процесса прокатки. Наглядным примером реализации переходным процессом эффекта пластического формоизменения (прокатки) является эпюра напряжений при максимальном угле захвата 0,168 радиан, представленная в работе [1]. Также в работе [1] представлены обнуляющие кривые в зоне отставания, в которых относительные значения нормальных напряжений меньше единицы, что свидетельствует об отсутствии пластической деформации. В этом случае эффект снижения контактных напряжений максимальный, но процесс прокатки идет на грани устойчивости процесса.

Известен еще один процесс прокатки, который характеризуется не достижением предельного очага деформации, а, наоборот, усилением захватывающей способности валков и устойчивости процесса прокатки. При реализации данного процесса обнуляющее действие сил растяжения уменьшается, но не исчезает. Он не является однозонным, он имеет зону опережения и характеризуется противонаправленным течением металла. В данном случае нет и усиления растягивающих напряжений, наоборот, их действие частично подавляется. Такой процесс реализуется при возрастающем действии контактных сил трения. В этом случае подавляющее действие растяжения определяется зоной опережения, отсутствием обнуляющих эпюр нормальных напряжений, а, следовательно, присутствием пластической деформации в зоне отставания и увеличением касательных напряжений, т.е. усилением захватывающей способности валков и т.д. Такой режим стабилизирует прокатку, но отходит от процесса минимальной устойчивости, несмотря на присутствие зон достижимости предельного очага деформации, определяемых большими углами захвата.

Проведенные исследования показывают, что присутствие силы растяжения в процессах захвата и устойчивости приводит к эффекту пластического формоизменения, определенному зонами достижимости предельного очага деформации или эффектом снижения нагрузки при увеличении деформационного воздействия.

*Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № AP23488953).*

### **Список литературы**

1. Identifying a mechanism for the gripping ability of rolls and rolling at a stability limit under asymmetric loading / Chigirinsky V., Naizabekov A., Lezhnev S., Naumenko O., Kuzmin S., Melentyev S. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2025. - Vol. 5(1 (137)). - P. 31–54.

УДК 621.771.016

## **ХОЛОДНАЯ ПРОКАТКА ВЫСОКОКРЕМНИСТОЙ ДИНАМНОЙ СТАЛИ**

**Мелихова Э.Н., Черный В.А., Мазур И.П.**

*Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия  
e-mail: melihovaeleanor@yandex.ru*

В данной статье представлены результаты разработки режимов и расчет энергосиловых параметров процесса холодной прокатки высококремнистой динамной стали (Si 2,8-3,2%) на реверсивном стане 1400.

Постоянное ужесточение требований потребителя к характеристикам динамной стали вынуждают непрерывно совершенствовать технологию её производства. Резко увеличился спрос на высококремнистую сталь с низкими удельными электромагнитными потерями, которые снижаются с увеличением содержания кремния и уменьшением её толщины.

В настоящее время прокатка динамной стали на ПАО «НЛМК» производится на 4-клетьевом стане 1400 с диаметрами рабочих валков 440 мм на толщину 0,5 мм [1]. Прокатка высококремнистой стали на меньшие толщины возможна в цехе динамной стали на реверсивном стане 1400, который может работать как в четырёхвалковом варианте с диаметром рабочих валков 290 мм [2], так и в шестивалковом варианте с диаметром рабочих валков 150 мм [3].

Разработана программа расчета энергосиловых параметров процесса прокатки по методике А.И. Целикова и проведена оценка адекватности данной методики расчётами процесса прокатки динамной стали 4-й группы легирования на непрерывном и реверсивном станах 1400 по режимам, для которых имелись значения энергосиловых параметров.

Сравнения рассчитанных и фактических значений усилий прокатки показало, что расхождение между ними не превышает 15%, что говорит о возможности использования данной методики для расчётов энергосиловых параметров процесса прокатки на реверсивном стане 1400.

При разработке режимов прокатки на реверсивном стане (табл.1, 2) исходили из условия минимизации количества проходов и использования режима

натяжений, применяемого в настоящее время при прокатке высококремнистой динамной стали. Расчет энергосиловых параметров при прокатке стали толщиной 0,35 мм за 5 проходов на стане 1400 в четырёхвалковом варианте показывает, что среднее давление металла на валки максимальное в последнем проходе и составляет 1514 Н/мм<sup>2</sup>.

Прокатку высококремнистой динамной стали с толщины 2,0 мм на 0,27 мм для обеспечения максимальных значений среднего удельного давления в последних проходах 1400-1500 Н/мм<sup>2</sup> необходимо проводить за 7 проходов, чтобы предельные значения давления металла на валки для нормальных условий эксплуатации рабочих валков не превышало 2100 Н/мм<sup>2</sup>.

Таблица 1 – Режим прокатки полосы 2,2-0,35/1030 мм

| Номер прохода | h, мм | ε, %  | V, м/с | $\frac{\sigma_0, \text{Н}}{\text{мм}^2}$ | $\frac{\sigma_1, \text{Н}}{\text{мм}^2}$ | μ     | $\frac{\sigma_{02}, \text{Н}}{\text{мм}^2}$ | $\frac{P_{\text{ср}}, \text{Н}}{\text{мм}^2}$ | P, МН |
|---------------|-------|-------|--------|------------------------------------------|------------------------------------------|-------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------|
|               | 2,2   |       |        |                                          |                                          |       | 560                                         |                                               |       |
| 1             | 1,48  | 32,55 | 3,5    | 42                                       | 151                                      | 0,043 | 857                                         | 792                                           | 9,4   |
| 2             | 0,95  | 35,98 | 4,0    | 151                                      | 191                                      | 0,043 | 994                                         | 978                                           | 10,5  |
| 3             | 0,63  | 33,68 | 4,6    | 191                                      | 203                                      | 0,042 | 1066                                        | 1181                                          | 10,7  |
| 4             | 0,42  | 33,33 | 4,7    | 203                                      | 200                                      | 0,042 | 1111                                        | 1403                                          | 11,6  |
| 5             | 0,35  | 16,67 | 5,0    | 200                                      | 82                                       | 0,036 | 1126                                        | 1514                                          | 9,6   |

Таблица 2 – Режим прокатки полосы 2,0-0,27/1030 мм

| Номер прохода | h, мм | ε, %  | V, м/с | $\frac{\sigma_0, \text{Н}}{\text{мм}^2}$ | $\frac{\sigma_1, \text{Н}}{\text{мм}^2}$ | μ     | $\frac{\sigma_{02}, \text{Н}}{\text{мм}^2}$ | $\frac{P_{\text{ср}}, \text{Н}}{\text{мм}^2}$ | P, МН |
|---------------|-------|-------|--------|------------------------------------------|------------------------------------------|-------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------|
|               | 2,0   |       |        |                                          |                                          |       | 560                                         |                                               |       |
| 1             | 1,30  | 35,00 | 2,5    | 42                                       | 151                                      | 0,038 | 872                                         | 974                                           | 11,7  |
| 2             | 0,85  | 34,62 | 4,3    | 151                                      | 191                                      | 0,035 | 997                                         | 1063                                          | 10,8  |
| 3             | 0,56  | 34,12 | 5,2    | 191                                      | 203                                      | 0,034 | 1069                                        | 1198                                          | 10,6  |
| 4             | 0,38  | 32,14 | 6,1    | 203                                      | 200                                      | 0,033 | 1112                                        | 1357                                          | 10,6  |
| 5             | 0,320 | 15,79 | 7,0    | 200                                      | 200                                      | 0,029 | 1126                                        | 1390                                          | 8,2   |
| 6             | 0,290 | 9,38  | 7,5    | 200                                      | 200                                      | 0,028 | 1133                                        | 1398                                          | 7,3   |
| 7             | 0,27  | 6,90  | 7,6    | 200                                      | 82                                       | 0,027 | 1137                                        | 1495                                          | 7,8   |

Прокатка высококремнистой динамной стали на толщину 0,22 мм возможна на реверсивном стане 1400 в шестивалковом варианте при толщине подката 2,0-2,3 мм за шесть проходов. Величина среднего удельного давления в последних проходах составляет 1300-1450 Н/мм<sup>2</sup>.

### Список литературы

1. Автоматизированное проектирование и реализация технологии холодной прокатки электротехнической стали /А.П. Долматов, В.Н. Скороходов, В.П. Настич, А.Е. Чеглов. – М.: Наука и технологии, 2000. - 448 с.; ил.

2. Освоение технологии прокатки тончайшей полосы из высококремнистой стали на реверсивном стане с осевой сдвижкой рабочих валков / Третьяков В.А., Варшавский Е.А., Мирошников Ю.В., Барышев В.В., Седых М.О. // Труды X конгресса прокатчиков, Липецк. - 2015. – Т.1. – С. 84-90.

3. Мелихова Э.Н., Черный В.А., Мазур И.П. Расчет энергосиловых параметров холодной прокатки полосы из трансформаторной стали с содержанием кремния 3,10-3,20% на реверсивном стане // Заготовительные производства в машиностроении. - 2026. - Т. 24. - №2. - С. 69-73.

УДК 621.778

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ШПОНОЧНОЙ СТАЛИ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ

**Морозов В.С., Непряхин С.О.**

*ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия  
e-mail: s.o.nepriakhin@urfu.ru*

Шпоночная сталь – это специализированный калиброванный металлопрокат, используемый для изготовления шпонок, предназначенных для передачи крутящего момента между валом и деталью, насаженной на него (например, шестерней, шкивом, муфтой).

В работе ставится цель исследовать равномерность распределения напряжений в профиле с целью повышения точности размеров шпоночной стали.

Для прямоугольного профиля размерами  $B_1=16h9(-0,043)$  мм,  $H_1=10h11(-0,09)$  мм по ГОСТ 8787-68 [1] более естественной и удобной является заготовка с прямоугольным профилем поперечного сечения размерами  $B_0=17,5\pm 0,5$  мм,  $H_0=11\pm 0,5$  мм (рис. 1).

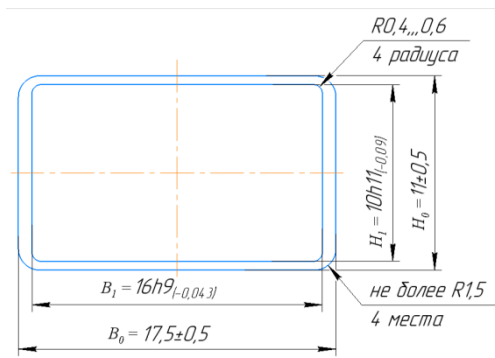


Рис. 1. Деформация прямоугольной полосы из прямоугольной заготовки

Для характеристики деформации при волочении прямоугольных полос важны не только показатели деформации всего профиля в целом, но и величина обжатия по каждой стороне [2]: абсолютные обжатия по ширине и высоте для

нашего случая соответственно равны  $\Delta B = B_0 - B_1 = 17,5 - 16 = 1,5$  мм,  $\Delta H = H_0 - H_1 = 11 - 10 = 1$  мм; их соотношение в виде показателя

$$a = \frac{\ln(B_0/B_1)}{\ln(H_0/H_1)} = \frac{\ln(17,5/16)}{\ln(11/10)} = \frac{0,09}{0,09} = 1.$$

Эффективность волочения прямоугольного профиля во многом определяется формой и размерами выбранной прямоугольной заготовки размерами  $B_0=17,5\pm 0,5$  мм и  $H_0=11\pm 0,5$  мм. Заготовка должна обеспечить наименьшую неравномерность деформации по сечению, наименьшую кривизну и скручивание полосы на выходе из волочильного инструмента.

Как и при волочении круглых профилей, существуют оптимальные углы волоки, значения которых увеличиваются при возрастании обжатия  $\delta$  и коэффициента вытяжки  $\lambda$ .

Длина рабочего конуса волоки принимается равной 6 мм. Тогда угол рабочего конуса: по широкой стороне при соотношении сторон  $B_0/B_1$  равен  $8,5^\circ$ , по узкой стороне при соотношении сторон  $H_0/H_1$  равен  $5,7^\circ$ .

С целью исследования распределения напряжений заготовки в очаге деформаций выполнено моделирование в программе Deform 3D. По итогам моделирования оценили равномерность распределения напряжений в поперечном сечении профиля (рис. 2).

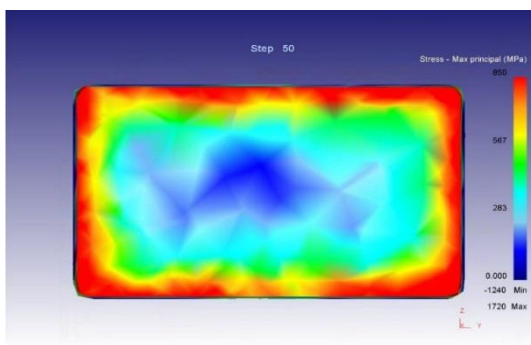


Рис. 2. Распределение напряжений после волочения

В очаге деформации в центральной области профиля возникают максимальные растягивающие напряжения, параллельные оси волочения, в периферийной — максимальные сжимающие напряжения, перпендикулярные образующей конуса волоки.

Максимальные сжимающие напряжения на поверхности профиля распределены равномерно.

Подобранная горячекатаная заготовка для шпоночной стали позволяет получать высокую точность размеров и качество поверхности после волочения за счет равномерного распределения напряжений по ширине и высоте профиля при разных углах наклона образующей волоки.

### Список литературы

1. ГОСТ 8787-68. Сталь чистотянутая для шпонок. Сортамент. – М.: Стандартинформ, 2012.

2. Рудской А.И., Лунев В.А., Шаболдо О.П. Волочение: учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 126 с.

УДК 621.778.07

## **МНОГОПРОХОДНОЕ ВОЛОЧЕНИЕ ПРОВОЛОКИ ИЗ СТАЛИ С МЕТАСТАБИЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ: ВЫЗОВЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

**Огнева Е.М., Корчунов А.Г., Константинов Д.В.**  
*ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия*  
*e-mail: const\_dimon@mail.ru*

На основе предыдущих работ коллектива [1, 2] наглядно продемонстрировано, что метизное производство с применением сталей с трип-эффектом, с одной стороны, предоставляет широкий спектр возможностей по гибкому управлению структуро- и свойствообразованием конечного изделия, а с другой – является сложной наукоемкой задачей, требующей комплексной проработки с учетом микромеханики деформирования рассматриваемого материала и особенностей процесса обработки.

Полученные результаты моделирования подтверждают перспективность процесса многократного волочения проволоки из стали с трип-эффектом. В отличие от классического применения подобных материалов в области листовой прокатки и штамповки процесс многократного волочения предоставляет широкие возможности по управлению структуро- и свойствообразованием готовой проволоки в зависимости от ее эксплуатационного назначения. Вместе с тем следует принимать во внимание необходимость более тщательного поиска компромисса между параметрами процесса волочения, а также дальнейшего изучения вариантов процесса в рамках промышленных сквозных технологических схем с применением, например, воздействий различной физической природы, которые широко на данный момент используются для проволоки из рядовых марок стали.

Таким образом, с целью максимального сохранения остаточного аустенита в микроструктуре стали, позволяющего получить новые эксплуатационные характеристики проволоки (в частности, самоадаптирующегося потенциала для сложно прогнозируемых условий эксплуатации [3-6]), волочение необходимо осуществлять по маршрутам с линейным или комбинированным распределением единичных обжатий при пониженных скоростях и малых углах волочильного инструмента. Волочение на повышенных скоростях с применением максимально возможных углов волоки и повышенными единичными обжатиями позволит полностью преобразовать пластичный остаточный аустенит в микроструктуре стали в более прочный мартенсит, что обеспечит получение более высоких прочностных показателей проволоки относительно рядовых и широко применяемых на данный момент средне- и низкоуглеродистых сталей. Открытым и требующим детального будущего изучения остается вопрос учета влияния и рационального применения, возникающего при волочении деформационного нагрева и внедрения в технологическую схему уже достаточно изученных для листовой продукции режимов термообработки [7-10].

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (соглашение № 25-29-20042 от 14.05.2025, <https://rscf.ru/project/25-29-20042/>) и финансовой поддержки Правительства Челябинской области (Соглашение № 30-2025-002767 от 07.07.2025г.).*

### **Список литературы**

1. Мультимасштабное компьютерное моделирование производства и эксплуатации самоадаптирующегося крепежа из стали с трип-эффектом / Корчунов А.Г., Константинов Д.В., Огнева Е.М., Олейник Д.Г., Денисов С.В. // Черные металлы. – 2025. – № 11. – С. 27–33.
2. Multiscale computer simulation of drawing with statistical representation of TRIP steel microstructure / Konstantinov D.V., Korchunov A.G., Kuznetsova A.S., Shiryayev O.P., Zaitseva M.V. // Steel in Translation. – 2018. – Vol. 48. – No. 4. – Pp. 262-267.
3. Bleck W., Guo X., Ma Y. The TRIP effect and its application in cold formable sheet steels // Steel Research International. – 2017. – Vol. 88. – Iss. 10. – Pp. 1–10.
4. A comparative study of the compressive behaviour of AISI 321 austenitic stainless steel under quasi-static and dynamic shock loading. / A.A. Tihamiyu, M. Eskandari, M. Nezakat, X. Wang, J.A. Szpunar, A. G. Odeshi // Materials & Design. – 2016. – Vol. 112. – Pp. 309–319.
5. Features of the properties of steel with the TRIP effect under various types of deformation loading / A.E. Gulin, A.G. Korchunov, D.V. Konstantinov, M.A. Shekshuev, M. Polyakova // Materials Physics and Mechanics. – 2023. – Vol. 51. – No. 5. – Pp. 152-164.
6. Исследование 3D-печати деталей машиностроения порошком из стали с TRIP-эффектом / Константинов Д.В., Корчунов А.Г., Огнева Е.М., Полякова М.А. // Черные металлы. – 2023. – № 9. – С. 82-88
7. Wiewiórowska S. The influence of strain rate and strain intensity on retained austenite content in structure of steel with TRIP effect // Solid State Phenomena. – 2010. – Vol. 165. – Pp. 216-220
8. Kusiak J., Szeliga D., Sztangret L.. Modelling techniques for optimizing metal forming processes // Microstructure evolution in metal forming processes. – 2012. – Pp. 35-66.
9. Bonte M.H.A., Van Den Boogaard A.H., Huétink J. A metamodel based optimization algorithm for metal forming processes // Advanced Methods in Material Forming. – 2007. – Pp. 55-72.
10. Saanouni K., Devalan P. Damage mechanics in metal forming: advanced modeling and numerical simulation // Springer. – 2013. – 523 p.

УДК 669.715

### **РОЛЬ СДВИГОВОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРЕССОВАНИИ ТРУБЫ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА**

**Альсаймари Нардин Мункит Часиб, Логинов Ю.Н., Хотиннов В.А.**  
*ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента  
России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия  
e-mail: mnardeenn@gmail.com*

Большая часть труб изготавливается из стали различных марок. Но часть труб изготавливается из алюминиевых сплавов в том случае, если требуется

обеспечить легкость конструкции трубопровода или повышенную коррозионную стойкость. Заготовительным процессом для изготовления таких труб является прессование. Этот процесс отличается от прокатки тем, что удается создать мягкую схему напряженного состояния, что позволяет обрабатывать различные металлические материалы, обладающие пониженными пластическими свойствами. Но несмотря на это, из-за недостаточной стационарности процесса в трубах могут возникать трещины на определенной стадии прессования, что отмечается в работе [1]. Возможно также появление других дефектов. С причинами их возникновения помогает разобраться метод конечных элементов, который получил широкое распространение при анализе напряженно-деформированного состояния в процессах пластической обработки [2, 3]. Кроме дефектообразования, удастся также обеспечить прогноз потребительских свойств продукции [4].

В данной работе для описания деформированного состояния при прессовании трубы из алюминиевого сплава применен программный продукт РАПИД-2D, разработанный в Уральском федеральном университете (Copyright © Полищук Е.Г., Жиров Д.С., 2000 - 2004).

На рис. 1 приведена схема процесса прессования. Пуансон 1 воздействует на полую заготовку 2 из сплава АМг6 и выдавливает ее через отверстие матрицы 3 с получением трубы 4. Внутренний контур очага деформации контролирует игла 5, а внешний контур – стенка контейнера 6. На рис. 1 показано поле распределения степени деформации сдвига  $\Lambda$  (обозначено как D).

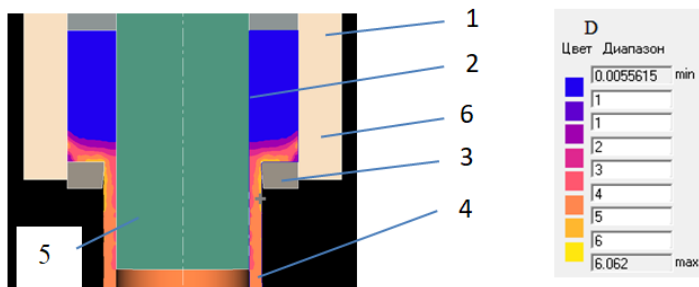


Рис. 1. Очаг деформации при прессовании с распределением степени деформации сдвига

На рис. 1, в частности, видна конфигурация очага деформации с разделением на жесткую и пластическую зоны. Справа приведена цветовая гамма для оценки величины  $\Lambda$ . Выявлено, что максимум степени деформации сдвига равен 6.

На рис. 2 отображено поле степени сдвиговой деформации. В цилиндрической системе координат  $r\varphi z$  это компонента тензора деформации  $\epsilon_{rz}$  (обозначено в программном модуле как Drz).

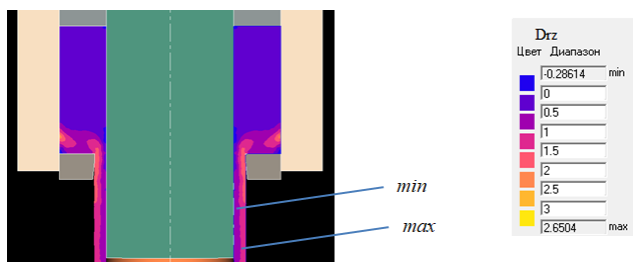


Рис. 2. Распределение компоненты тензора сдвиговой деформации

Здесь видно, что максимальное значение компоненты равно 2,6, что составляет значимую долю в величине степени деформации сдвига. Кроме того, выявлено, что максимальные значения (обозначено как max) характерны для слоя металла, примыкающего к наружной поверхности трубы, а минимальные значения наблюдаются в слое металла, примыкающего к внутренней поверхности (обозначено как min).

### Список литературы

1. Логинов Ю.Н., Антоненко Л.В. Изучение напряженно-деформированного состояния для предупреждения образования продольных трещин в прессованных трубах. // Цветные металлы. - 2010. - № 5. - С. 119-122.
2. Логинов Ю.Н., Котов В.В. Метод конечных элементов в описании напряженно-деформированного состояния процесса прессования. Екатеринбург: УрФУ, 2010. 320 с.
3. Логинов Ю.Н., Костоусова Н.Ф. Перемещения и деформации при прессовании трубной заготовки // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. - 2016. - Т. 16. - № 1. - С. 78-81.
4. Логинов Ю.Н., Дегтярева О.Ф., Антоненко Л.В. Особенности формирования свойств горячепрессованной трубной заготовки из сплава АМg6 // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2008. - № 7. - С. 14-17.

УДК 669.14.018.29

## ВЛИЯНИЕ МАРШРУТА ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ И ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ НАВИВКИ ПРУЖИН ИЗ СТАЛИ 54SiCr6

Пивоварова К.Г., Тагирова В.М., Тухветова Л.М.  
 ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия  
 e-mail: odinaeva.vm@mmk-metiz.ru

В современной автомобильной промышленности пружины подвески являются одними из наиболее ответственных элементов, напрямую влияющих на безопасность движения, управляемость автомобиля и комфорт пассажиров [1]. Эти компоненты подвергаются многократным циклическим нагрузкам, вызываемым неровностями дорожного полотна, что делает их подверженными

усталостному разрушению. Для обеспечения долговечности и надежности таких пружин применяются высокопрочные легированные стали, среди которых сталь марки 54SiCr6 занимает лидирующие позиции благодаря своему оптимальному сочетанию высокой прочности, пластичности и релаксационной стойкости при повышенных температурах [2-4].

На сегодняшний день в России ведется активное освоение производства закаленно-отпущенной проволоки из данной марки стали, предназначенной непосредственно для холодной навивки пружин [5]. Однако простой перенос известных технологий невозможен без глубокого понимания того, как различные схемы термомеханической обработки влияют на формирование дефектов структуры и последующее поведение материала при эксплуатации, что требует проведения фундаментальных исследований закономерностей разрушения.

Данное исследование направлено на сравнительный анализ влияния маршрута термомеханической обработки на комплекс механических свойств, качество поверхности и усталостную долговечность пружин. Экспериментальная часть включала производство опытных партий калиброванного проката диаметрами 12,2 и 13,2 мм из горячекатаной заготовки диаметром 14,0 мм. Исследовались два принципиально различных технологических маршрута:

- 1) холодная пластическая деформация (нагартовка) с последующей закалкой готовой пружины;
- 2) предварительная сквозная термообработка заготовки (закалка-отпуск) перед холодной навивкой.

Комплекс исследований включал металлографический анализ фазового состава и глубины обезуглероженного слоя, оценку качества поверхности, определение механических характеристик при статическом растяжении и циклических испытаниях пружин до разрушения. Критерием эффективности служили ресурс до отказа (число циклов) и стабильность геометрии изделия.

По результатам испытаний установлено, что использование нагартованного проката с последующей закалкой готовых пружин сложной формы приводит к значительным искажениям геометрии изделий в процессе термообработки. Это обуславливает высокий уровень отбраковки — до 60% по геометрическим параметрам, несмотря на то, что отобранные образцы продемонстрировали высокий ресурс (642 тыс. циклов). В свою очередь, применение предварительно термообработанного проката обеспечило стабильность формы пружин после навивки, однако их усталостная прочность оказалась ниже норматива (226–258 тыс. циклов вместо требуемых 500 тыс.). Причинами низкого ресурса являются физико-механические свойства прутка в состоянии поставки и неоптимальные параметры процессов термообработки.

На основании проведенного исследования обоснована необходимость перехода от традиционной технологии навивки с последующей закалкой к производству предварительно термообработанного калиброванного проката. Технологический маршрут должен включать обязательную операцию механического удаления поверхностного слоя (обточку) перед калиброванием и сквозную термообработку в режиме «закалка-отпуск». Реализация данного подхода позволит обеспечить стабильность геометрических параметров пружин и достичь нормативной усталостной долговечности.

## Список литературы

1. Enhanced spring steel's strength using strain assisted tempering / Nový Z., Salvetr P., Kotous J., Motyčka P., Gokhman A., Donik Č., Džugan J. // *Materials*. – 2022. – Vol. 15. – No. 20. – Art. 7354. – DOI: 10.3390/ma15207354.
2. Fatigue properties of spring steels after advanced processing / Procházka R., Stehlik A., Kotous J., Salvetr P., Bucki T., Stránský O., Zulić S. // *Materials*. – 2023. – Vol. 16. – No. 9. – Art. 3327. – DOI: 10.3390/ma16093327.
3. Influence of Si and Cu content on tempering and properties of 54SiCr6 steel / Salvetr P., Novy Z., Gokhman A., Dlouhy J. et al. // *Manufacturing Technology*. – 2020. – Vol. 20. – No. 4. – P. 516–520. – DOI: 10.21062/mft.2020.079.
4. Ходосовская Н. А., Ковалева И. А., Путеев В. С. Освоение производства пружинной катанки для автомобильной промышленности в условиях мелкосортно-проволочного стана 370/150 // Научно-практическая школа для молодых металлургов: сборник статей Международной конференции, посвященной 85-летию ИМЕТ РАН, Выкса, 18–22 сентября 2023 года. – Выкса: Копировально-множительный центр АО "Выксунский металлургический завод", 2024. – С. 306–311.
5. Дуденков С. В., Пономарева О. С. Маркетинговое исследование рынка потребителей закаленно-отпущенной заготовки в рамках импортозамещения // Современный менеджмент: теория и практика: материалы V Всероссийской научно-практической конференции / под общ. ред. Н.В. Кузнецовой. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2020. – С. 67–71.

УДК 621.774

## УНИФИЦИРОВАННАЯ УНИВЕРСАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ С УЧЕТОМ МАТЕРИАЛА ИЗДЕЛИЯ

**Пилипёнок И.И., Фруцкий В.А., Пилипенко С.В., Штемпель О.П.**  
*Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,  
Новополоцк, Беларусь  
e-mail: i.pilipenok@psu.by*

В ходе капитального и текущего ремонта прокатного и кузнечно-прессового оборудования иногда возникает потребность в восстановлении рабочих поверхностей тех или иных деталей. Часто, детали с грамотно восстановленными рабочими поверхностями проходят достаточно длительный срок эксплуатации, экономя ресурсы предприятия, благотворно решая экологические вопросы, вопросы ресурсосбережения и импортозависимости. В данной работе рассматриваются проблемы, связанные с выбором технологии восстановления рабочих поверхностей деталей из алюминиевых сплавов и чугуна. Наиболее распространенными повреждениями для деталей из чугуна и алюминиевых сплавов являются трещины и чрезмерный износ поверхности. Появление трещин связано с усталостью материала, термическими напряжениями, являются следствием аварийных ситуаций.

В ходе проведенных исследований была разработана и испробована на практике универсальная технология восстановления рабочих поверхностей деталей машин с учетом их материала (рис. 1) [1-3].

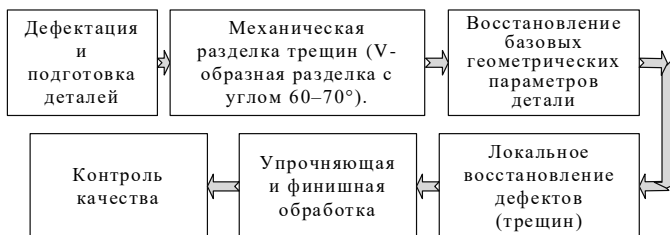


Рис. 1. Схема унифицированной универсальной технологии восстановления рабочих поверхностей деталей с учетом материала изделия

Технологический процесс начинается с дефектации, подготовки и механической разделки трещин. Подготовка заключается в зачистке и обезжиривании обрабатываемой поверхности.

Далее для детали из чугуна производят высокочастотную индукционную наплавку из композиционного порошка – Fe-Cu-B (рис. 2) [3]:

- нанесение на поверхность суспензии в виде композиционного порошка в жидком стекле (слой, до 1,5–2,0 мм);
- сушка, которая проводится при температуре от 80 до 120°C;
- следующим этапом является высокочастотная индукционная наплавка.

Подготовленную деталь помещают в поле высокочастотного индуктора, который производит разогрев поверхностного слоя металла 1100–1150°C. После разогрева порошковая композиция (нанесенная предварительно) расплавляется и сплавляется с основой, образуется биметаллическое соединение;

- с целью снятия термических напряжений деталь подвергают низкотемпературному отпуску (500–550°C).

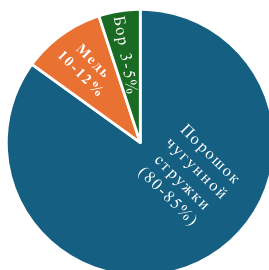


Рис. 2. Предложенный состав композиции, применяемой в ресурсосберегающей технологии восстановления чугунных корпусных деталей

Поверхности алюминиевых деталей восстанавливают трехфазной аргодуговой сваркой с локальным подогревом (от 180 до 200°C) и низкотемпературной термомеханической обработкой после сварки.

При необходимости восстановленные поверхности подвергают мехобработке с целью восстановления их первоначальных размеров.

### Список литературы

1. Константинов В.М., Фруцкий В.А. Интеллектуальные покрытия из металлоотходов – альтернатива антифрикционным бронзам // Ремонт, восстановление, модернизация. - 2002. - №6. - С. 36–39.
2. Авиационные материалы: справочник. Под. общ. ред. Е.Н. Каблова - М.: ВИАМ, 2021. Т.10
3. Wang, H., Chen, L., Li, Y. Boron-containing powder composites for low-temperature repair of cast iron // Journal of Thermal Spray Technology. - 2019. - Vol. 28. - P. 1234–1245.
4. Патент RU 2756784С1. Способ восстановления чугунных деталей композиционным материалом и устройство для его осуществления / В.А. Фруцкий, О.П. Штемпель. Оpubл. 05.10.2021.

УДК 621.669

## ПРОКАТКА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ В СОПРОВОЖДЕНИИ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА

**Столяров В.В.**

*Институт машиноведения РАН, Москва, Россия  
e-mail: vlstol@mail.ru*

Известно, что холодная прокатка хрупких и высокопрочных сплавов имеет ограничения, связанные с низкой деформируемостью. Повышение пластичности таких материалов достигается печным нагревом, недостатками которого являются окалина, трудность получения тонких листов и значительные энергозатраты. Перспективным методом, позволяющим избежать указанные недостатки, может быть прокатка в сопровождении импульсного тока [1].

Рассмотрены примеры использования импульсного тока при прокатке материалов различной природы: алюминиевый сплав АД33 [2], ультрамелкозернистый (УМЗ) титан Grade-2 и 4 [3, 4], сплавы с памятью формы TiNi [5] и TiNiHf [6].

В эвтектическом сплаве АД33 (рис.1,а) деформируемость при прокатке с током при  $j=30\text{А/мм}^2$  (рис.1,б) повышается с  $\epsilon=1,3$  до  $\epsilon=1,6$  за счет частичной рекристаллизации. Увеличение  $j$  до  $400\text{ А/мм}^2$  (рис.1,в) приводило к снижению деформируемости, обусловленному оплавлением эвтектики [2].

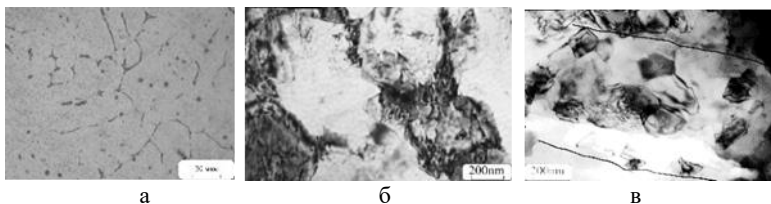


Рис.1. Микроструктура сплава АД33 до (а) и после (б, в) прокатки с током [2]

В РКУП УМЗ титане Grade 2 (рис.2, а) прямоугольного профиля с размером зерен 500 нм высокая деформируемость при прокатке достигается даже без тока  $\epsilon=2,1$  ( $\epsilon = 88\%$ ) с формированием полосовой наноструктуры (рис.2, б) [3].



Рис.2. Микроструктура УМЗ титана до (а) и после прокатки  $\epsilon = 88\%$  (б) [3]

Однако в прутке  $\varnothing 4$  мм УМЗ Grade 4 достичь приемлемую деформируемость при прокатке в калибрах удалось только с помощью импульсного тока [4]. В другом сплаве с памятью формы TiNi введение импульсного тока позволило повысить деформируемость с  $\epsilon=0,86$  до  $\epsilon=1,42$  (рис.3).

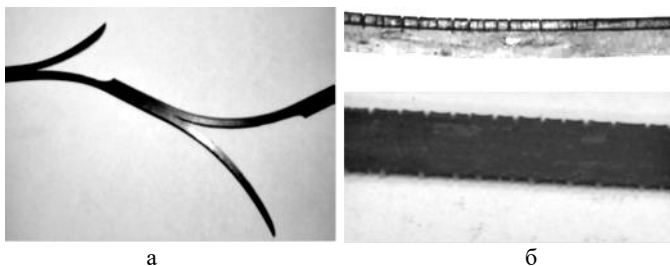


Рис. 3. Вид образцов TiNi после прокатки: а - без тока; б - с током [5]

Обсуждаются возможные причины повышения деформируемости, связанные со структурной эволюцией (динамической рекристаллизацией) или с тепловым эффектом тока.

*Работа выполнена за счет средств Государственного задания FFGU-2026-0003.*

### Список литературы

1. Столяров В.В. Структура и деформируемость сплавов в сопровождении импульсного тока // МиТОМ. – 2025. – 8. – С. 3–12. <https://elibrary.ru/item.asp?id=82810588>
2. Влияние импульсного тока на структуру алюминиевого сплава системы Al-Mg-Si при холодной деформации / Бродова И.Г. и др. // ФММ. – 2013. – 11. – Т.114. – С.1019–1025 <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20352564>
3. TEM investigations of Titanium processed by ECAP followed by cold rolling / B. Mingler, V.V. Stolyarov, M. Zehetbauer, W. Lacom, H.P. Karnthaler // Materials Science Forum Vols. 503-504 (2006) pp. 805-810. <http://www.scientific.net>

4. Мисоченко А.А. Исследование возможности повышения деформационной способности ультрамелкозернистого титана с помощью применения импульсного тока в процессе прокатки // ИТММ – 2025. - Пермь, 2025. - С. 293–298. <https://elibrary.ru/item.asp?id=88973555>

5. Столяров В.В. Деформируемость сплава с памятью формы при прокатке с током // Проблемы машиностроения и надежности. – 2025. – № 6 – С. 67–74.

6. Получение полос из сплава TiNiHf с высокотемпературным эффектом памяти формы / Карелин Р.Д., Комаров В.С., и др. // Деформация и разрушение материалов. –2025. –12. – С. 17–24.

УДК 621.771.06-589.4

## АПРОКСИМАЦИЯ ПРОФИЛЯ ИНСТРУМЕНТА СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ

Постыляков А.Ю.<sup>1</sup>, Королева И.Э.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> ПАО «Корпорация ВСППО-АВИСМА», Верхняя Салда, Россия  
e-mail: a.i.postyliakov@urfu.ru

Одним из основных путей повышения качества холоднотемпературно деформированных труб является совершенствование калибровок рабочего инструмента и режимов прокатки. Ключевым аспектом при этом является определение истинного режима обжатий по стенке  $\varepsilon_s$  и диаметру  $\varepsilon_D$ . В случае когда известна методика, по которой выполнена конкретная калибровка, эта задача не представляет существенных сложностей [1], поскольку задана сама форма зависимости.

Однако на практике часто приходится работать только с геометрическими данными, содержащими информацию о значениях диаметра ручья и оправки в некотором количестве контрольных сечений. Кроме того, типовые методики расчета калибровок, применяемые на конкретном предприятии, могут быть в той или иной мере изменены. Это определяет актуальность описания формы деформирующего инструмента станов холодной прокатки труб в функции продольной координаты конуса деформации  $x$ . Основными требованиями к уравнению являются: непрерывность, монотонное убывание и высокая точность аппроксимации. В работе [2] показана возможность аппроксимации профиля ручья и криволинейной оправки с использованием кривых Безье второго порядка. В настоящей работе целью было получение единой функции более простого вида.

В результате опробывания различных форм было определено подходящее под вышеобозначенные требования выражение дробно-рациональной функции второй степени вида

$$R(x) = \frac{a_1x^2 + a_2x + a_3}{b_1x^2 + b_2x + b_3},$$

где  $R(x)$  – текущий радиус инструмента;  $a_{1...3}, b_{1...3}$  – числовые коэффициенты, определяемые по принципу метода наименьших квадратов.

Для более простой геометрии, степень знаменателя может быть уменьшена на один порядок. Для оправки с прямолинейной образующей следует использовать простое уравнение прямой  $R_0(x) = c_1x + c_0$ .

В качестве примера приведена (рис.1, а) функция развертки ручья калибровки МИСиС при прокатке трубы 38x5,65 мм по длине рабочего конуса  $l$ . Точками отмечен радиус калибра в 16-ти контрольных сечениях, сплошной кривой – функция аппроксимации. Видно, что наблюдается практически полное совпадение расчетных и контрольных значений, сумма квадратов ошибок составляет 0,002195. Из графика 1-й производной (рис.1, б) следует, что функция является строго убывающей на всем интервале ( $f'(x) < 0$ ), из графика 2-й производной (рис.1, в) – что функция является выпуклой вниз ( $f''(x) > 0$ ).

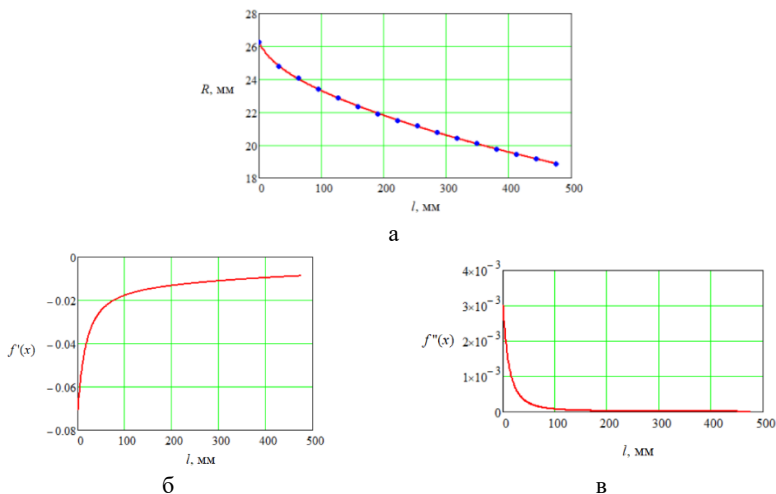


Рис.1. Результаты аппроксимации для калибровки МИСиС:

- а - функция аппроксимации (линия) и контрольные значения (точки);
- б - первая производная функции; в - вторая производная функции

Аналогичные результаты были получены при аппроксимации для 4-х калибровок, построенных по различным методикам. Коэффициент достоверности аппроксимации во всех случаях составил  $R^2 = 0,999$ .

Аппроксимирующие функции могут быть использованы как для анализа действующих калибровок, так и построения геометрических моделей инструмента в САД-системах.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (тема № FEUZ-2026-0013)*

### Список литературы

1. Орлов Г.А. Основы теории прокатки и волочения труб: учебное пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 204 с.
2. Пилипенко С.В. Теоретические основы холодной пильгерной прокатки труб: монография. – Полоцк: Учреждение образования «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой», 2022. – 288 с.

## УВЕЛИЧЕНИЕ МАССЫ ЗАГОТОВОК ПОД ПЕРЕКОВ ПУТЕМ МОДЕРНИЗАЦИИ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ЭШП

**Фриккель А.А.<sup>1</sup>, Служин Е.Ю.<sup>1</sup>, Упоров С.В.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия.

<sup>2</sup> АО «ЦНИИМ», Екатеринбург, Россия.  
e-mail: vtometm@gmail.com

АО «ЦНИИМ» располагает выпускавшейся ранее серийно лабораторной установкой электрошлакового переплава А-550, обеспечивающей получение слитков массой до 50 кг и диаметром до 180 мм. Для выполнения долгосрочного заказа в рамках выполняемого им договора поставки поковок из специальных сталей у используемых для этого ЭШП-заготовок потребовалось увеличить массу производимой заготовки до 100 кг без замены существующего оборудования.

Решение поставленной задачи было выполнено специалистами и студентами ИНМиТ УрФУ в рамках долгосрочного двустороннего сотрудничества между этими организациями.

Схема вертикального перемещения подвижных частей установки А-550 приведена на рис 1.

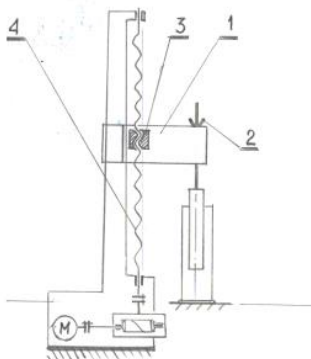


Рис.1. Схема механизма подъема электрододержателя

Подвижная траверса 1 с электрододержателем 2 перемещается по высоте посредством закрепленной в траверсе неподвижно гайкой 3 и вращающимся через понижающую передачу от электродвигателя в подшипниках на неподвижной колонне ходовым винтом 4.

Ввиду значительного расстояния между ходовым винтом и закрепляемым на траверсе переплавляемым электродом увеличение массы последнего свыше 50 кг приводит вследствие упругого изгиба ходового винта и перекосу траверсы в направляющих колонны к рывкам при работе механизма подачи электрода и нарушению режима переплава, а также интенсивному износу винтовой пары. Для

исключения подобных явлений был спроектирован и изготовлен уравнивающий механизм с применением быстротъемных контргрузов и полиспаста. Согласно поставленной заказчиком задаче, детали создаваемого узла должны быть быстротъемными, а его основная часть должна устанавливаться на верхнюю часть колонны действующей установки ЭШП без какой-либо доработки последней.

Устройство уравнивания и его детали проектировались исходя из имеющейся в распоряжении авторов конструкторской документации на установку А-550 с учётом результатов кинематического и прочностных расчетов, а также расчета на жесткость, выполненных авторам по методикам, приведенным в работах [1-3]. По разработанной конструкторской документации на производственной базе АО «ЦНИИМ» были изготовлены необходимые детали спроектированного узла и закуплены требуемые комплектующие, после чего уравнивающее устройство подвижной траверсы было смонтировано непосредственно на рассматриваемой установке А -550 (рис.2).



Рис.2. Уравнивающее устройство

По завершении успешных испытаний модернизированная установка ЭШП была сдана в постоянную эксплуатацию и в настоящее время обеспечивает производство поковок из специальных сталей необходимых размеров. Выполненная модернизация лабораторной установки ЭШП А-550 позволила производить на ней ЭШП-слитки массой до 110 кг включительно.

### Список литературы

1. Поляков А. А. Сопротивление материалов. - Екатеринбург: УрФУ, 2011. - 335 с.
2. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: справочник. - М: Машиностроение, 1979. - 702 с.
3. Гузенков П.Г. Детали машин. - М: Высшая школа. 1986. -360 с.

**МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ БРИКЕТОВ****Шишин Н.Н.<sup>1</sup>, Бабайлов Н.А.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (филиал),  
Верхняя Салда, Россия<sup>2</sup> Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Россия  
e-mail: n.a.babaylov@urfu.ru

В проекте выполнено изучение механических свойств металлургических брикетов для электрометаллургии и огнеупорного производства, полученных методом валкового брикетирования на брикетировочных прессах (с использованием технологий сухого брикетирования).

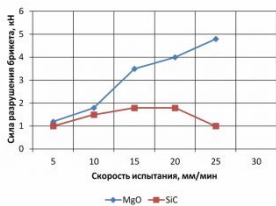
Валковое брикетирование широко используется в промышленности как метод окускования мелкодисперсных материалов, например в черной и цветной металлургии, для подготовки сырья к дальнейшему переплаву, а также для утилизации техногенных отходов производства. Валковое брикетирование мелких отсевов материалов, используемых в металлургическом производстве, повышает экономическую эффективность их использования [1 – 3].

В работе представлены результаты испытаний изготовленных методом валкового брикетирования брикетов из оксида магния и карбида кремния. Определение механических свойств брикетов выполнено на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z050, расположенной в студенческой исследовательской лаборатории филиала УрФУ в г.Верхняя Салда.

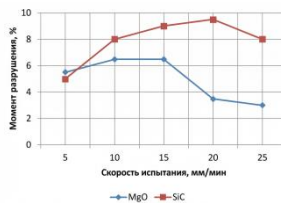
В испытаниях регистрировалась максимальная нагрузка, при которой испытуемый брикет разрушается. Определены зависимости силы разрушения брикетов от скорости испытания (сжатия) образцов в интервале скоростей 5 – 30 мм/мин. В соответствии с требованиями ГОСТ 24765-81 «Окатыши железорудные. Метод определения прочности на сжатие» проведено по 7-ми испытаниям на одну точку на графике. Средние результаты обработки диаграмм сжатия для скоростей испытания 5 - 30 мм/мин приведены на рис. 1.

Приведены результаты обработки экспериментальных исследований в опытах на сжатие брикетов. На рис.1, а приведена зависимость силы разрушения брикетов из оксида магния, карбида кремния от скорости сжатия, а на рис.1, б приведены значения момента разрушения брикетов из различных материалов в зависимости от скорости сжатия,

За момент разрушения принято относительное обжатие брикета по высоте в момент разрушения по формуле  $\varepsilon = h_0/h$ , где  $h_0$  и  $h$  – высота брикета до и после деформации (разрушения) соответственно.



а



б

Рис. 1. Зависимость силы разрушения брикетов от скорости сжатия в интервале скоростей испытания 5 – 25 мм/мин (а); момент разрушения брикета (б)

В работе выполнено определение механических свойств для металлургических брикетов, которые были получены с использованием технологий сухого брикетирования (т.е. без применения связующего и влаги) некомпактных материалов в виде мелких отсевов отходов промышленного производства, следующих материалов: оксида магния, карбида кремния и хлорида калия.

Результаты исследований использованы при разработке технологий процесса валкового брикетирования для повышения выхода годного и производительности процессов брикетирования.

#### Список литературы

1. Равич Б.М. Брикетирование руд. – М.: Недра, 1982. – 183 с.
2. Бабайлов Н.А., Логинов Ю.Н., Полянский Л.И. Изучение механических свойств брикетов из хромовых концентратов // Обогащение руд. – 2019. – №6. – С.30-34.
3. Полянский Л. И., Бабайлов Н. А., Логинов Ю. Н. Оптимальные размеры брикетов из оксида магния // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2025. – Iss. 1. – P. 36–43.

УДК 621.7.079

### ВЫБОР ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В РАМКАХ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ

**Файфер И. Н.**

*ПАО «Машиностроительный завод им. М. И. Калинина», Екатеринбург, Россия  
e-mail: faifer\_igor@mail.ru*

При нагреве под штамповку выше 700°C поверхностные слои заготовок из титановых сплавов интенсивно насыщаются водородом и кислородом из воздуха, образуется так называемый альфа-слой. Из-за него пластичность титана и титановых сплавов резко понижается, что приводит в процессе обработки к появлению трещин. Нагрев в среде защитных газов и специальные теплозащитные и смазочные покрытия значительно уменьшают образование альфа-слоя и дефектов поверхности заготовок [1, 2].

До последнего времени для штамповки титана и титановых сплавов на предприятиях широко применяли импортные теплозащитные и смазочные покрытия, в частности стеклосмазку Condaero 228 (производитель CONDAT S.

А., Франция). В связи с ужесточением санкционного режима прямые поставки в нашу страну затруднены либо вообще прекращены, поэтому стоит рассмотреть некоторые отечественные аналоги.

Изучение различных смазок и защитных покрытий для горячей штамповки титана и титановых сплавов представляют значительный интерес и неоднократно становились предметом исследований [3-6].

Например, в работе [6] авторами проведено сравнение импортного теплозащитного покрытия Condaero 228 с двумя отечественными образцами покрытий: водной суспензии на основе коллоидного графита и водной суспензии на основе алюмосиликатов. Отмечено, что на адгезию, толщину и прочность защитного слоя оказывают влияние в равной степени шероховатость поверхности заготовки и концентрация покрытия.

В работе [7] автор детально рассматривает основные достоинства и недостатки известных отечественных и зарубежных технологических смазок, используемых для прессования и штамповки титановых сплавов.

В рамках работ по импортозамещению на ПАО «МЗИК» был проведён эксперимент по сравнению стеклосмазок Политрен ТЛ-4 (производитель НПП «Полихим», Россия), ЭВТ-24 (производитель Курчатовский институт - ВИАМ, Россия) и Condaero 228 (Франция).

Из титанового сплава ВТ6С были подготовлены пять групп по пять образцов каждая. Все образцы подвергались пескоструйной обработке, после чего на них наносились вышеперечисленные защитные покрытия в два слоя с промежуточной сушкой. Покрытия разводились до нужной концентрации в соответствии с рекомендациями производителей. На пять образцов покрытия не наносились для определения глубины альфа-слоя без дополнительной защиты. В каждой группе присутствовали образцы с разными покрытиями (табл. 1).

Таблица 1 – Глубина альфа-слоя в зависимости от времени выдержки и концентрации покрытия

| Группа образцов                | ТЛ-4<br>(2 слоя, 1:1) | ТЛ-4<br>(2 слоя, 1:1,5) | ЭВТ-24<br>(2 слоя) | Condaero-<br>228 (2 слоя) | Без покрытия |
|--------------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------|---------------------------|--------------|
| Первая<br>(выдержка 10 мин)    | 0,027                 | 0,018                   | 0,024              | 0,027                     | 0,04         |
| Вторая<br>(выдержка 15 мин)    | 0,023                 | 0,019                   | 0,021              | 0,03                      | 0,033        |
| Третья<br>(выдержка 20 мин)    | 0,026                 | 0,012                   | 0,032              | 0,028                     | 0,033        |
| Четвёртая<br>(выдержка 25 мин) | 0,025                 | 0,018                   | 0,043              | 0,016                     | 0,04         |
| Пятая<br>(выдержка 30 мин)     | 0,035                 | 0,023                   | 0,043              | 0,024                     | 0,042        |

Все группы образцов одновременно загружались в камерную печь, разогревую до 830-850°C. После выхода печи на рабочую температуру засекали время и поочерёдно доставали группы образцов (первая группа находилась в печи 10 мин, вторая группа – 15 мин, третья группа – 20 мин, четвёртая группа – 25 мин, пятая группа – 30 мин). После остывания образцы подвергались

пескоструйной обработке для удаления остатков покрытия, после чего определялась глубина альфа-слоя.

Альфа-слой был обнаружен на всех образцах. Однако на графиках (рис. 1) можно увидеть, что при небольшом времени выдержки использование отечественных покрытий показало лучшие результаты, глубина альфа-слоя меньше, чем при использовании Condaero 228.

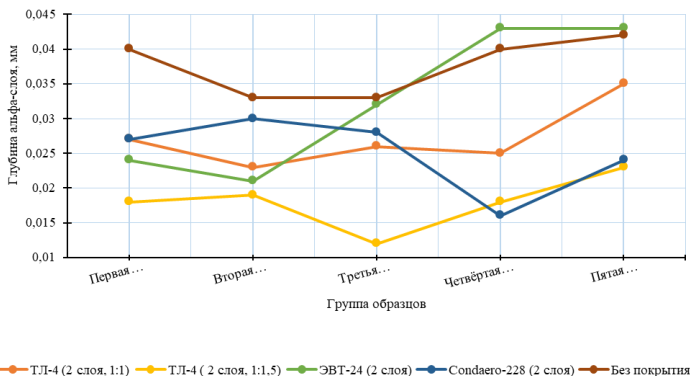


Рис. 1. Глубина альфа-слоя в зависимости от покрытия, концентрации и времени выдержки

На основе приведённых выше данных сделан вывод, что при правильно подобранных параметрах технологического процесса отечественные образцы теплозащитных и смазочных покрытий не уступают, а по некоторым показателям превосходят импортные аналоги.

### Список литературы

1. Илларионов А.Г., Попов А.А. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014 - 137 с.;
2. Горынин И.В., Чечулин Б. Б. Титан в машиностроении: монография. — М.: Машиностроение, 1990. — 400 с.;
3. Головкин П. А. Повышение качества штампованных поковок типа диск из титанового сплава VT20 // Титан. – 2023. – № 3(79). – С. 34-39.
4. Малинина Г.А., Солнцев С.С., Денисова В.С. Влияние неоксидных добавок на свойства стеклокерамических покрытий для деталей из жаропрочных сплавов (обзор) // Труды ВИАМ. – 2021. – № 3(97). – С. 109-117.
5. Логинов Ю.Н., Ершов А.А. Аналитическое исследование с использованием МКЭ прессования а-титановых сплавов и прогнозом ориентации текстуры // Технология лёгких сплавов. – 2012. – № 3. – С. 79-87.
6. Петров А.Н., Логинов Б.А., Петров М.А. Исследование шероховатости и толщины теплозащитных покрытий для заготовок из никелевых сплавов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. – № 4. – С. 42-46.
7. Ерманок М.З. О составах, особенностях и принципах выбора смазок для прессования титановых сплавов (Из архива неопубликованных работ) // Технология легких сплавов. – 2019. – № 3. – С. 66-75.

## СЕКЦИЯ 2 – Моделирование и экспериментальные исследования процессов обработки давлением современных металлических материалов

УДК 621.771.251

### ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ САПР KALIBER

Алимов И.С., Стебунов С.А., Белугин В.С., Мальцев П.А., Гладков Ю.А.  
ООО «КванторФорм», Москва, Россия  
e-mail: igor.alimov@qform3d.ru

Сортопрокатное производство, как неотъемлемая часть металлургической отрасли, представляет собой масштабный и энергоемкий процесс. Значительная доля заготовительного производства в области обработки металлов давлением приходится именно на сортовую прокатку. Изделия сортового проката находят широкое применение в строительстве, железнодорожной отрасли и других сферах промышленности. В статье рассматривается использование САПР Kaliber, интегрированной с программным комплексом QForm, для автоматизированного проектирования и оптимизации процессов сортовой прокатки [1].

Одним из ключевых факторов при создании технологий и совершенствовании металлургического производства является обеспечение высокого качества проката при одновременном снижении его себестоимости и достижении максимальной производительности [2]. Такие результаты могут быть достигнуты разными путями, в том числе серией опытных прокаток, однако более экономичным способом является применение методов проектирования, моделирования и оптимизации технологических процессов.

Отметим наиболее распространенные критерии оптимизации процессов прокатки:

1. Производительность прокатного стана:

$$П = \frac{3600}{T_T} G k_n \rightarrow \max, \quad (1)$$

где  $T_T$  - такт прокатки (время, за которое выполняется один цикл прокатки);  $k_n$  - коэффициент использования стана;  $G$  - масса прокатываемого материала за единицу времени.

2. Сечение исходной заготовки:

$$\omega_0 = \omega_T \lambda_\Sigma \rightarrow \max, \quad (2)$$

где  $\omega_0$  - площадь исходной заготовки;  $\omega_T$  - площадь поперечного сечения готового проката;  $\lambda_\Sigma$  - суммарный коэффициент вытяжки.

3. Число проходов для прокатки заданного профиля:

$$n_{пр} = \frac{\lg \lambda_\Sigma}{\lg \lambda_{ср}} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где  $\lambda_{cp}$  – средний коэффициент вытяжки по калибровке.

4. Расход электроэнергии на прокатку одного раската:

$$Q = \sum_{i=1}^n \frac{2M_{прi} U_i \tau_i}{D_{ki}} \rightarrow \min, \quad (4)$$

где  $M_{прi}$  – крутящий момент в  $i$ -м калибре;  $U_i$  – скорость прокатки в  $i$ -м калибре;  $\tau_i$  – время прокатки в  $i$ -м калибре;  $D_{ki}$  – катающий диаметр.

5. Расход (износ) валков:

$$B = \sum_{i=1}^{n_{пр}} b_i \rightarrow \min, \quad (5)$$

где  $b_i$  – удельный расход калибров в  $i$ -й клетки.

6. Вытяжная способность применяемых калибров:

$$C_B = \frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_{\Sigma max}} \rightarrow \max, \quad (6)$$

где  $\lambda_{\Sigma}$  – сумма коэффициентов вытяжки всех проходов;  $\lambda_{\Sigma max}$  – сумма допустимых коэффициентов вытяжки всех проходов.

В решении задач оптимизации процесса и сокращения себестоимости готовой продукции существенную помощь оказывает программное обеспечение Kaliber. Эта система использует современные математические алгоритмы, позволяя быстро и точно рассчитывать параметры технологического процесса. В связке с программным комплексом QForm обеспечивается возможность верификации процесса с использованием метода конечных элементов, что улучшает анализ результатов. Примером успешной оптимизации является снижение температуры нагрева заготовки с одновременным увеличением скорости прокатки. Такой подход позволяет уменьшить окалинообразование, повысить производительность и улучшить качество поверхности готового проката.

#### *Метод оптимизации калибровок в системе Kaliber*

САПР Kaliber представляет собой эффективный инструмент для проектирования и оптимизации технологических процессов сортовой прокатки [3]. Программное обеспечение позволяет выполнять расчет всех ключевых параметров процесса сортовой прокатки. Среди возможностей системы - анализ формоизменения, температурных и скоростных параметров, а также энергосиловых. Дополнительно предоставляется возможность расчета прочности рабочих валков и автоматизированного проектирования калибровок в направлении против хода прокатки. Одной из главных особенностей программы является интеграция с программным комплексом QForm, основанным на методе конечных элементов [4]. Используя программу, можно не только быстро спроектировать и оптимизировать калибровку, но и верифицировать её параметры с помощью моделирования в 3D.

В системе Kaliber можно использовать следующие параметры для оптимизации процессов по заданным критериям:

- скоростной режим с учетом допускаемых значений оборотов вала двигателя;
- условия захвата и устойчивости раската;
- по степени загрузки электродвигателей привода клетей;
- по прочности оборудования клетей;
- формы калибров и их влияние на параметры формоизменения, в том числе уширение и вытяжная способность;
- формы и размеры сечения металла, в том числе чистового профиля.

#### *Оптимизация существующей технологии*

В качестве примера разобран вариант оптимизации процесса прокатки круглой стали из прямоугольной заготовки с целью улучшения механических свойств проката, снижения окалинообразования и снижения потерь на нагрев заготовок. Решается задача подбора температурно-скоростного режима.

Прокатка осуществляется на непрерывном пятиклетевом стане с диаметрами валков 400 мм. Исходная заготовка – прямоугольное сечение 32x15 мм, чистовой профиль – круглая сталь 12 мм. Температура нагрева заготовки 1200 °С. На производстве отмечалось, что текущая температура нагрева приводит к повышенному окалинообразованию в печи и значительным потерям массы (до 6%). Кроме того, происходит выгорание углерода, что негативно сказывается на механических свойствах готовой продукции.

Целевая функция с ограничениями представлена следующим образом:

$$T_0 \rightarrow \min;$$

$$P_i < P_{i\text{доп}};$$

$$k = \left( \frac{M_i}{M_{i\text{дв}}} \right) < 1;$$

$$n_{i\text{min}} < n_i < n_{i\text{max}};$$

где  $T_0$  – температура нагрева заготовки, °С;  $i$  – номер прохода;  $P_i$  и  $P_{i\text{доп}}$  – расчетные и допускаемые усилия на валки;  $M_i$  и  $M_{i\text{дв}}$  – расчетные и допускаемые моменты на валу двигателя;  $n_i, n_{i\text{min}}, n_{i\text{max}}$  – расчетные, минимальные и максимальные обороты вала двигателя.

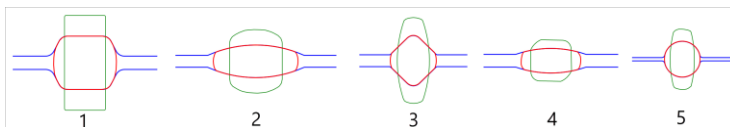


Рис.1. Калибровка круга диаметром 12 мм в САПР Kaliber  
(указаны порядковые номера клетей)

При моделировании технологии по регламентированным режимам все ограничения выполняются. При этом наиболее нагруженной является клетка №2 - момент на двигателе равен 660 кН/м, что меньше допускового значения 1033 кН/м.

В результате оптимизации удалось снизить температуру нагрева с 1200 до 1100 °С и увеличить скорость прокатки с 4,5 до 4,97 м/с.

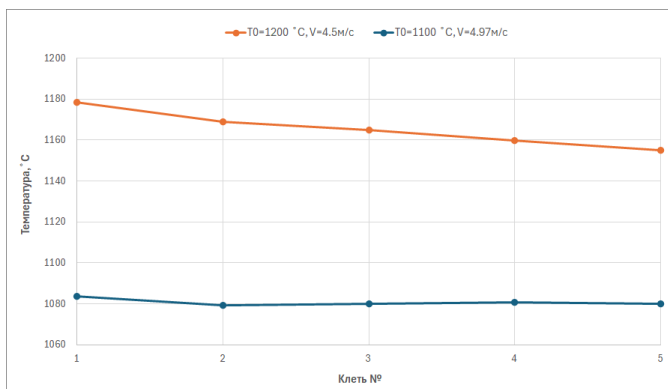


Рис. 2. Температурные режимы прокатки круглой стали диаметром 12 мм

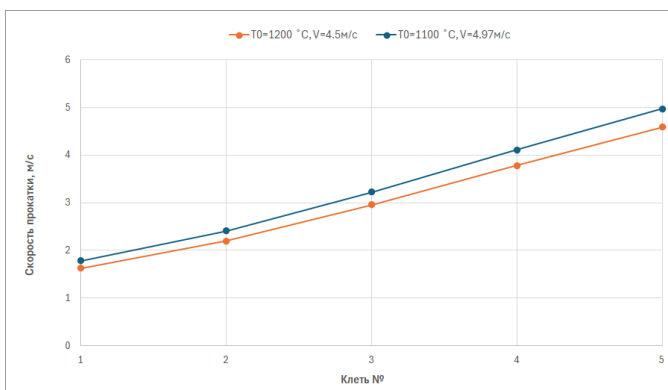


Рис. 3. Скоростные режимы прокатки круглой стали диаметром 12 мм

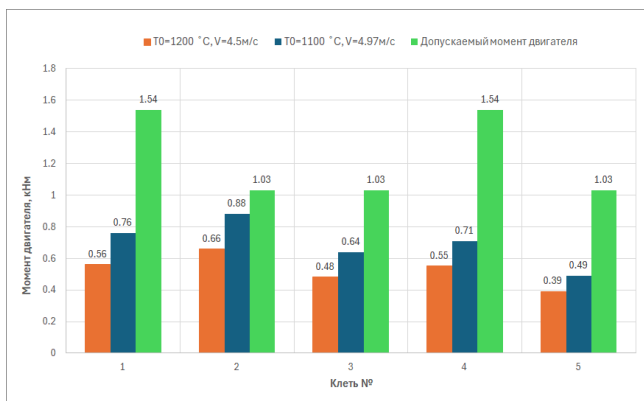


Рис. 4. Моменты на валу двигателя

Применение систем автоматизированного проектирования, таких как САПР Kaliber, позволяет эффективно анализировать технологические процессы прокатки, выявлять в них несовершенства и определять пути улучшения без проведения дорогостоящих опытов. В частности, в данной работе анализ процесса производства круглой стали в САПР Kaliber позволил найти пути его оптимизации за счет снижения температуры нагрева заготовки и повышения скорости прокатки. Такие решения позволяют получать готовую продукцию с более высоким качеством механических свойств, снизить себестоимость и повысить производительность. Кроме того, использование интеграции с программным комплексом QForm дает возможность проводить точную верификацию процессов.

### Список литературы

1. QuantorForm Ltd. QForm — программное обеспечение для моделирования процессов обработки металлов давлением. Руководство пользователя. — М.: ООО «КванторФорм». — Электрон. ресурс. — Режим доступа: <https://qform3d.ru> (дата обращения: 08.10.2025).
2. Александров П.А., Писанко В.А., Богатырев С.Т. Рационализация калибровок валков сортовых прокатных станков. — Харьков: ДНТБУ, 1938. — 260 с.
3. Моделирование и проектирование сортовой прокатки в условиях промышленного производства с применением QForm и Калибер / Стебунов С. А., Мальцев П. А., Гладков Ю. А., Белугин В. С., Алимов И. С. // Труды конгресса прокатчиков. - 2024. - Т. 1.
4. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объёмной штамповки: учебное пособие / Власов А. В., Стебунов С. А., Евсюков С. А., Биба Н. В., Шитиков А. А.; под ред. А. В. Власова. — Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — 384 с. — ISBN 978-5-7038-5101-2.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ КАЛИБРА НА РАВНОМЕРНОСТЬ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ БЕЗОПРАВОЧНОЙ ПРОКАТКЕ

**Фарукшин И.К.<sup>1,2</sup>, Выдрин А.В.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ООО «Исследовательский центр ТМК», Челябинск, Россия

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», Челябинск, Россия  
e-mail: Plya.farukshin@mail.ru

Непрерывные безоправочные станы используются на заключительной стадии трубопрокатных агрегатов и определяют конечную геометрию труб, прежде всего точность толщины стенки [1]. Одним из ключевых факторов, влияющих на формирование геометрии проката, является форма калибра, однако задачи ее оптимизации для условий безоправочной прокатки до настоящего времени проработаны недостаточно [2]. В работе поставлена задача комплексного исследования влияния геометрии калибра на разнотолщинность стенки трубы с использованием компьютерного моделирования.

Для количественной оценки качества трубной продукции использован обобщенный критерий качества. Критерий сформирован как скалярная норма двумерного вектора, компоненты которого описывают отклонения толщины стенки по длине и по поперечному сечению трубы. В качестве управляющих параметров выбраны геометрические характеристики калибра: эксцентриситет и угол выпуска.

Оптимизацию формы калибра выполняли с использованием компьютерного моделирования в программном комплексе QForm для одной двухвалковой клетки непрерывного стана. Исходные параметры моделирования соответствовали промышленным условиям: заготовка диаметром 172,5 мм, толщиной стенки 8,5 мм и длиной 1000 мм из стали 20, температура заготовки 980 °С, инструмента 200 °С, коэффициент трения по Зибелло 0,4, скорость вращения валков 78 об/мин. При этом в качестве точки первого приближения использовалась действующая калибровка валков.

Согласно полученным в ходе компьютерного моделирования результатам выявлено, что наилучшим результатом является калибр с эксцентриситетом порядка 0,07 мм и углом выпуска 9,63°, при которых обобщенный критерий уменьшается на 10% по сравнению с исходной формой калибра. При этом отмечено выравнивание распределения толщины стенки по длине трубы, снижение амплитуды колебаний по длине, а также более равномерное распределение толщины в поперечном сечении.

Несмотря на положительные результаты оптимизации, при анализе поперечного сечения с использованием трассирующих точек (шаг 5° от 0 до 90°, где 90° – вершина калибра) выявлено, что в зоне 75-85° сохраняется локальный пик утолщения.

Для устранения выявленной неоднородности был предложен переход к много радиусной калибровке (рис. 1), при которой участок основной окружности в зоне пика заменяется дугой иного радиуса ( $r$ ).

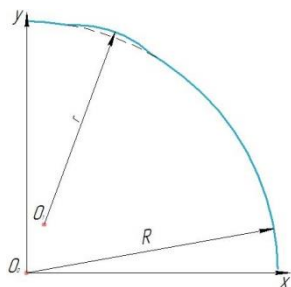


Рис. 1. Схема многорадиусного калибра

Для определения рациональных значений параметров новой калибровки проведено параметрическое исследование с варьированием угловой зоны дополнительного радиуса и степени изменения радиуса. В качестве критерия равномерности принят коэффициент вариации толщины стенки CV

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{s}} * 100 \%, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение толщины стенки;  $\bar{s}$  – среднее значение толщины стенки.

По результатам моделирования установлено, что локальное расширение калибра снижает коэффициент вариации на 5-20% и размах толщины стенки на 16-41% по сравнению с однорадиусной калибровкой. Рациональные параметры включают угловую зону 15° и изменение радиуса 2,5-7,5%, что улучшает показатели без риска образования гранености.

Комплексное исследование в QFогm показало, что оптимизация однорадиусной калибровки снижает обобщенный критерий качества на 10% относительно промышленной калибровки, а предложенная многорадиусная форма калибра эффективно подавляет локальный пик утолщения. Полученные результаты могут быть использованы при разработке и корректировке систем калибров непрерывных безоправочных станов.

### Список литературы

1. Коликов А.П., Романцев Б.А., Алещенко А.С. Обработка металлов давлением. Теория процессов трубного производства: учебник. – Москва: МИСиС, 2019. – 502 с.
2. Теория редуцирования труб: новые исследования процесса / В. В. Ериклинцев, Ю. И. Блинов, Д. С. Фридман, Л. М. Грабарник. – Свердловск: Сред.-Урал. кн. изд-во, 1970. – 230 с.

## ВЛИЯНИЕ РОТАЦИОННОЙ КОВКИ НА СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Mg-Si

Шагимуратова А.Р.<sup>1</sup>, Хафизова Э.Д.<sup>1,2</sup>, Мартыненко Н.С.<sup>2</sup>, Темралиева Д.Р.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия  
<sup>2</sup>Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН), Москва, Россия  
e-mail: Haandah2@gmail.com

Сплавы системы Al-Mg-Si широко используются в авиационной и автомобильной промышленности благодаря хорошему сочетанию прочности, легкости и коррозионной стойкости. Однако при нагреве выше 150 °С, что неизбежно происходит при сварке или в процессе эксплуатации, эти сплавы теряют прочность из-за рекристаллизации и роста зерен. Поэтому актуальной задачей является поиск способов повышения термической стабильности таких сплавов.

Одним из перспективных методов является дополнительное легирование марганцем (Mn), который позволяет сдерживать рост зерен при нагреве. Однако легирование само по себе не решает проблему — для получения качественного материала необходим подходящий метод обработки. В данной работе использовалась ротационная ковка — это метод обработки металлов давлением, при котором заготовка обжимается со всех сторон четырьмя бойками, движущимися с высокой частотой. Такой подход позволяет получить мелкозернистую структуру и улучшить механические свойства изделия.

Объектом исследования являлся алюминиевый сплав системы Al-Mg-Si-Mn после ротационной ковки. Микроструктуру образцов анализировали с использованием инвертированного микроскопа Axio Observer Alm. Измерения микротвердости проводили на твердомере Durascan 50 по методу Виккерса согласно ГОСТ 9450-76.

Результаты показали, что после ротационной ковки микротвердость сплава увеличилась до 100±5 HV по сравнению с исходным состоянием (78,32±5 HV). Структура сплава стала волокнистой, зерна вытянуты вдоль направления обработки.

Таким образом, применение ротационной ковки и легирование Mn для сплавов системы Al-Mg-Si является эффективным способом улучшения их структуры и свойств, что позволяет использовать полученный материал в более ответственных конструкциях.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТНОЙ АСИММЕТРИИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ СТАЛИ МАРКИ 09Г2С

Лукиянов Е.Д., Харитонов В.А., Локотунина Н.М., Песин И.А.  
*ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия*  
*e-mail: edlukyanov@png8.ru*

Асимметричная прокатка играет значительную роль в создании ресурсосберегающих технологий для производства длинномерных металлических изделий и является одним из перспективных способов получения улучшенных механических свойств металлов и сплавов.

В настоящее время исследования в области асимметричной прокатки проводятся в МГТУ им. Г.И. Носова в лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» с использованием стана 400 листовой прокатки с индивидуальным приводом рабочих валков. Высокий градиент деформации сдвига в сочетании с повышением температуры при асимметричной прокатке обеспечивает термомеханически активированное зародышеобразование и прохождение динамической рекристаллизации с формированием в обрабатываемых металлах и сплавах градиентной структуры и улучшенных пластических свойств [1-3].

Среди многих реализуемых схем асимметричной прокатки выделяется скоростная асимметрия, создаваемая для регулирования процесса деформации. В отличие от других видов асимметрии она более эффективна и проста в реализации на практике.

Целью исследования на данном этапе являлось изучение влияния скоростной асимметрии валков на характеристики процесса деформации металла. В рамках исследования проведено сравнительное моделирование процесса симметричной и асимметричной прокатки круглой заготовки из стали марки 09Г2С в двухвалковой клетки.

Аналитические исследования показали, что с увеличением соотношения скоростей валков снижается усилие прокатки и повышается значение накопленной степени деформации по сечению заготовки. Более высокий уровень накопленной степени деформации отмечается в заготовке со стороны валка, имеющего большую скорость. Полученные данные были подтверждены экспериментальными исследованиями.

Использование процесса асимметричной прокатки при получении длинномерных металлических изделий позволит улучшить механические свойства металла за счет получения более мелкозернистой структуры, что доказывает эффективность использования асимметричной прокатки по сравнению с симметричной.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-20026, <https://rscf.ru/project/24-19-20026/>*

## Список литературы

1. Наноструктурирование металлов и сплавов методами интенсивной пластической деформации / А.М. Песин, А.П. Жилияев, Г.И. Рааб и др. // Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2021. – 259 с.
2. Асимметричная прокатка листов и лент: история и перспективы развития / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, О.Д. Бирюкова и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия Металлургия. — 2020. — № 3(20). — С. 81-96. — DOI: 10.14529/met200309.
3. Пустовойтов Д.О. Исследование формирования мелкозернистой структуры при асимметричной горячей прокатке низкоуглеродистых сталей // Черные металлы. — 2025. — № 1. — С. 49-56. — DOI: 10.17580/chm.2025.01.09.

УДК 621.7

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНОЙ ДЕТАЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВА ЗАГОТОВКИ

**Файрузова З.Р., Лавриненко В.Ю.**

*ФГАОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана», Москва, Россия  
e-mail: fairuzovaz@mail.ru*

Одна из основных проблем при изготовлении крепежных и сложнопрофильных изделий из различных материалов холодной объемной штамповкой (ХОШ) - разрушение и низкая стойкость рабочего инструмента вследствие высоких нагрузок и износа (средняя стойкость до 2000-6000 деталей) [1, 2].

В ранее проведенных исследованиях [3 - 5] были показаны возможности снижения сопротивления деформирования и сил деформирования при ХОШ и, как следствие, уменьшение нагрузок на инструмент и его повышение путем применения низкотемпературного нагрева заготовок до температуры не более 300°C.

В данной работе были проведены экспериментальные исследования на сжатие образцов из нержавеющей стали 08X13 ( $h_0=15$  мм,  $d_0=9$  мм) на машине УТС-250 (по ГОСТ 25.503) при температурах 20, 200, 225, 245, 250, 270°C и скорости деформации  $10\text{ с}^{-1}$  для стали 08X13. Также подобные исследования были проведены для латуни Л63.

Далее с использованием программного комплекса QFORM было проведено компьютерное моделирование действующего технологического процесса штамповки деталей «Ось» из стали 08X13 (рис.1) и «Втулка» из латуни Л63 с использованием кривых упрочнения материала детали при температурах 20, 200°C и 20, 225°C соответственно. При этом согласно существующей технологии, стойкость рабочего инструмента составляет не более 1500-2000 деталей (по данным ООО «Сатурн», г. Набережные Челны).

На рис. 2 представлена действующая технология холодной объемной штамповки детали «Ось» на холодновысадочном автомате NH612, номинальная сила 800 кН. Стойкость инструмента при данной технологии и температуре



автоматическая линия холодной объемной штамповки с использованием низкотемпературного нагрева в среде SolidWorks.

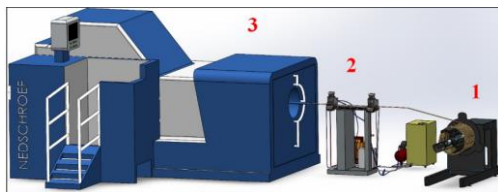


Рис. 4. Общий вид автоматизированной линии для ХОШ с предварительным низкотемпературным нагревом:

1 - размоточное устройство; 2 - УКН;

3 - холодновысадочный автомат Nedschroef Herentals NH612

По итогам исследований можно сделать вывод о том, что снижение энергосиловых параметров процесса позволяет уменьшить нагрузки на инструмент холодновысадочного автомата и повысить его стойкость, по предварительным оценкам, до 1,96 раз, что особенно актуально при штамповке сложнопрофильных деталей, таких как оси.

В результате проведенного компьютерного моделирования разработанного технологического процесса штамповки детали «Ось» из стали 08X13 в программном комплексе QFORM было установлено существенное снижение максимальной силы деформирования (до 2 раз) при предварительном нагреве заготовки до температуры 200°C по сравнению со штамповкой при температуре 20°C, что может привести к существенному повышению стойкости рабочего инструмента.

Увеличение стойкости инструмента по результатам расчетов ожидается не менее чем в 2-4 раза.

### Список литературы

1. Heinz Tschaetsch, Metall Forming Practise. Springer, 2005. 405 p.
2. Лавриненко Ю.А., Евсюков С.А., Лавриненко В.Ю. Объемная штамповка на автоматах: учебное пособие. - Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. - 5 с.
3. Экспериментальные исследования влияния предварительного низкотемпературного нагрева заготовок из легированных сталей на сопротивление деформированию при холодной объемной штамповке / Лавриненко В.Ю., Лавриненко Ю.А., Айрапетян А.С., Файрузов Р.С., Кирсанов А.С. // Заготовительные производства в машиностроении. - 2021. - Т. 19. 9. - С. 396-399.
4. Лавриненко В.Ю., Лавриненко Ю.А., Файрузов Р.С., Кирсанов А.С., Габдулхаков И.И. Снижение сил деформирования и нагрузок на инструмент при холодной объемной штамповке сложнопрофильных деталей с использованием предварительного низкотемпературного нагрева заготовок // Заготовительные производства в машиностроении. 2022. Т. 20. № 1. С. 22-27.
5. Лавриненко В.Ю. Ушаков А.В. Экспериментальные исследования влияния предварительного низкотемпературного нагрева заготовок на механические свойства сталей 41X1, 20Г2Р и 38ХГНМ // Заготовительные производства в машиностроении. 2025. Т. 23. № 1. С. 14-19.

6. Дилхан Й. Теоретические исследования процесса холодной объемной штамповки детали «Втулка регулировочная» из латуни Л63 с использованием низкотемпературного нагрева заготовки [Электронный ресурс] // Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии»: материалы конференции, 14 – 18 апреля, 2025, Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана. – М.: ООО «КванторФорм», 2025.– URL: [studvesna.ru?go=articles&id=4273](http://studvesna.ru?go=articles&id=4273)

УДК 621.777

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОВМЕЩЕННОЙ ПРОКАТКИ-ПРЕССОВАНИЯ МАГНИЕВОГО СПЛАВА МА2-1**

**Парубок А.В., Сидельников С.Б., Лопатина Е.С., Голосов Д.Р.**  
*Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия*  
*e-mail: andrej.parubok@yandex.ru*

Длинномерные деформированные полуфабрикаты из магниевых сплавов, такие как прутки и проволока, занимают важное место в производстве деталей и конструкций из легких сплавов, находя применение как в качестве присадочного материала при сварке, так и в качестве конструкционного [1]. Несмотря на востребованность деформированных полуфабрикатов из магниевых сплавов, их производство традиционными методами (прокатка, волочение, прессование) сопряжено с рядом трудностей, обусловленных специфическим кристаллическим строением и физическими свойствами магния. Оптимальным решением для эффективного промышленного производства являются совмещенные технологии, такие как Конформ или совмещенная прокатка-прессование (СПП). Проведенные исследования позволили установить, что СПП выгодно отличается от способа Конформ за счет отсутствия сильного разогрева от трения заготовки о неподвижный инструмент, который ограничивает скорости прессования [2]. При этом полученные полуфабрикаты обладают высокими механическими характеристиками и не уступают прессованным по традиционной технологии.

Для оценки возможности получения деформированных полуфабрикатов из сплава МА2-1 способом СПП и изучения его влияния на структуру и свойства были проведены исследования по получению прутков диаметрами 5, 7 и 9 мм при скоростях вращения прокатных валков 4 и 8 об/мин и начальной температурой нагрева заготовки 400 °С. Для определения характера распределения температурных, деформационных и скоростных полей по длине очага деформации, а также установления энергосиловых параметров процесса проводили моделирование в программном комплексе QForm. Результаты моделирования верифицировали сопоставлением расчетных и экспериментально определенных сил, действующих на рабочий инструмент. В ходе моделирования установлено, что температурно-скоростные условия в исследуемых режимах позволяют получать пресс-изделия без риска возникновения температурных дефектов, а увеличение коэффициента вытяжки при прессовании приводит к более равномерному распределению накопленной деформации в сечении прутка. Экспериментальные исследования проводили на лабораторной установке СПП

200 [3]. В качестве заготовок использовали фрезерованные прутки квадратного сечения сто стороной  $13,5 \pm 0,3$  мм из вторичных отходов сплава МА2-1. Микроструктуру исследовали на микроскопе Axio Observer Al.m (Carl Zeiss) при увеличениях  $\times 50$  и  $\times 1000$  крат, механические свойства определяли путем испытаний на растяжение на универсальной машине LFM400.

Металлографические исследования недокатов (рис. 1, а) в различных зонах выявили, что рост степени деформации приводит к интенсивному развитию рекристаллизационных процессов, оказывающих, в свою очередь, влияние как на прочностные, так и пластические свойства получаемого пресс-изделия. В структуре прутка диаметром 9 мм (рис. 1, б), сохраняются единичные деформированные зерна, имеющие размер в долевом направлении 20-40 мкм, в то время как структура прутка диаметром 5 мм (рис. 1, в) характеризуется мелкозернистым рекристаллизованным строением с размером зерен 5-7 мкм.

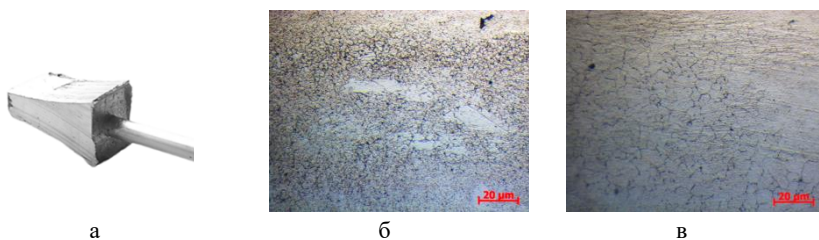


Рис. 1. Вид исследуемых образцов и их микроструктура:

- а – недокат; б – микроструктура прутка 9 мм;  
в – микроструктура прутка 5 мм,  $\times 1000$

В результате механических испытаний установлено, что наиболее благоприятная структура и оптимальное сочетание механических свойств достигается в прутках диаметром 5 мм, полученных при частоте вращения прокатных валков 8 об/мин. Предел прочности прутков, полученных по этому режиму, достигал 282 МПа, а относительное удлинение составило 10,2 %.

Таким образом, была установлена практическая реализуемость процесса СПП для магниевого сплава МА2-1. Механические испытания и металлографические исследования позволили сделать вывод о перспективности применения метода СПП для получения деформированных полуфабрикатов.

*Работа выполнена в рамках государственного задания на науку ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», номер проекта FSRZ-2020-0013.*

#### Список литературы

1. Li Y. и др. A review on wire arc additive manufacturing of magnesium alloys: wire preparation, defects and properties // *Metals and Materials International*. –2024. – Т. 30. –№ 12. – С. 3243–3267.
2. Sidelnikov S. В. и др. Determination and structural analysis of process parameters for combined rolling and extrusion of rods from magnesium ingots // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. –2024. –Т. 134. – № 5. – С. 2623–2636.

3. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Загиров Н.Н. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов. – М.: МАКС Пресс, 2005. 344 с.

УДК 621.771

## **КОЭФФИЦИЕНТ СКОРОСТНОЙ АСИММЕТРИИ КАК УПРАВЛЯЮЩИЙ ПАРАМЕТР ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ**

**Песин И.А., Пустовойтов Д.О., Песин А.М., Бирюкова О.Д.**  
*ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия*  
*e-mail: Ilya33392@bk.ru*

К числу основных технологических параметров, определяющих процесс прокатки, традиционно относят степень обжатия, температурно-скоростные условия и параметры трения, тогда как коэффициент асимметрии валков, как правило, не рассматривается в качестве управляющего параметра [1, 2].

Вместе с тем современные исследования, в том числе выполненные в лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева», показали, что использование скоростной асимметрии оказывает существенное влияние на напряженно-деформированное состояние металла и формирование его структуры [3-5]. В настоящей работе коэффициент асимметрии определяли как отношение окружных скоростей рабочих валков.

Численные и экспериментальные исследования показали, что увеличение коэффициента асимметрии приводит к снижению усилия прокатки, а также способствует росту технологической пластичности металлов и сплавов [4,5]. Установлено, что для углеродистых и нержавеющей сталей, а также алюминиевых сплавов даже незначительное увеличение коэффициента асимметрии приводит к интенсификации процессов пластической деформации и измельчению структуры. Так, для стали 65Г увеличение коэффициента асимметрии до 1,1 позволило сократить число технологических циклов (прокатка–отжиг) с трёх до одного.

При прокатке алюминиевого сплава АМг6 увеличение коэффициента асимметрии до 5 обеспечило возможность получения ленты толщиной 1 мм из заготовки толщиной 6 мм за один проход, при этом размер зерна снижался до 1,5 мкм [2]. При горячей прокатке стали 09Г2С увеличение коэффициента асимметрии до 1,5–1,7 позволило повысить предел текучести в 2 раза и обеспечить достижение класса прочности S700. Кроме того, применение асимметричной прокатки позволяет достигать значительных степеней деформации, включая до 80% при горячей и до 27% при холодной деформации высокопрочного чугуна [4].

Экспериментальная реализация процесса осуществлялась на стане 400 асимметричной прокатки, расположенном в научно-исследовательской лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Стан, изготовленный в 2020 году по техническому заданию сотрудников лаборатории и признанный в 2021 году уникальной научной

установкой, обеспечивает возможность прокатки с отношением скоростей рабочих валков в диапазоне от 1 до 10 [6].

*Исследования выполнены за счет гранта РФФИ (соглашение № 23-79-30015), <https://rscf.ru/project/23-79-30015/>*

### Список литературы

1. Kim W.J., Lee Y.S., Kim D.G. Microstructure and mechanical properties of Mg–Al–Zn alloy sheets severely deformed by asymmetrical rolling // Scripta Materialia. – 2007. – Т. 56. – № 4. – С. 309–312.
2. Asymmetric cryorolling for fabrication of nanostructural aluminum sheets / Yu H.L., Lu C., Tieu A.K., Li H.J. // Scientific Reports. – 2012. – Т. 2. – С. 772.
3. Ko Y.G., Hamad K. Structural features and mechanical properties of AZ31 Mg alloy warm deformed by differential speed rolling // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Т. 744. – С. 96–103.
4. Pustovoytov D.O., Pesin A.M., Tandon P. Asymmetric rolling of light alloys: a review // Metals. – 2021. – Т. 11. – № 6. – С. 956.
5. Pesin A.M., Pustovoytov D.O. Finite element simulation of shear strain during high-ratio differential speed rolling of aluminum alloy 5083 // Key Engineering Materials. – 2016. – Т. 716. – С. 700–707.
6. Nakayama Steel Co., Ltd. Product Information [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nakayama-steel.co.jp/menu/product/pdf/nfg.pdf> (дата обращения: 31.03.2026).

УДК 621.771.01:519.673

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИСКРИВЛЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОРОТКИХ ПОЛОС ПУТЕМ ЦИФРОВИЗАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ХОЛОДНОЙ НЕСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ

**Горбунова В.С.**

*ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», Челябинск, Россия  
e-mail: vika.salkova6039@gmail.com*

В настоящее время во многих областях промышленности наблюдается повышенный интерес к коротким полосам [1], состоящим из разнородных материалов [2], в особенности к тонким или тончайшим полосам [3]. Как известно, оптимальным процессом получения биметаллических коротких полос является несимметричная прокатка с рассогласованием окружных скоростей прокатных валков. Однако, вопрос прогнозирования кривизны полосы на выходе из очага деформации при заданных условиях остается незакрытым.

С целью окончательной доработки данного вопроса воспользуемся ранее разработанной математической моделью холодной несимметричной прокатки подобных полос [4] и произведем её первую цифровизацию. Так, на рис. 1 изображена часть кода разрабатываемой программы для ЭВМ.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <pre> import numpy as np import sympy as sp from scipy import integrate  # ----- 1. Задание параметров ----- l = 0.002846 # длина очага деформации m0 = 0.0001 # параметр m0 m1 = 0.00008 # параметр m1 q1 = 0.00023 # параметр q1 h1 = 0.00031 # толщина на выходе h0 = 0.0004 # толщина на входе v0 = 0.03 # скорость на входе v1 = 0.02 # скорость на выходе b = 0.04 # ширина полосы tga = 0.016 # тангенс угла alpha tgb = -0.008784 # тангенс угла beta cosa = 0.9999 # косинус угла alpha t0 = 150000000.0 # напряжение на входе t1 = 200000000.0 # напряжение на выходе k0 = sp.Symbol('k0') # неизвестный параметр k0 (будем искать)  # Предварительный расчет k1 через k0 (символически) k1_expr = (v0/v1) * (h1 - q1 + (tga + tgb) * k0) / (h1 - q1 + (tga + tgb))  print("Параметры заданы") print(f"к1 выражение: {k1_expr}")  # ----- 2. Первый интеграл ----- def integrand(x, y, k0_val):     """Подынтегральная функция первого интеграла"""     q_tx = q1 + (tga - tgb) * k0_val     denominator = (q1 + (tga - tgb) * x) ** 3     sqrt_term = np.sqrt((q1 + (tga - tgb) * x) ** 2 + (tga - tgb) ** 2)     return (b * t0 ** 2 * v0 * abs(tga - tgb) * cosa * abs(q_tx) *            sqrt_term / denominator) </pre> | <pre> # Радиус кривизны if abs((V1m - V1t) &gt; 1e-10):     R_kr = (V1t * h1) / (V1m - V1t)     Kp = 1 / R_kr else:     R_kr = float('inf')     Kp = 0  print(f"\n7. Кривизна полосы:") print(f"V1t (верхний слой): {V1t:.6f}") print(f"V1m (нижний слой): {V1m:.6f}") print(f"Радиус кривизны Rkp: {R_kr:.6f}") print(f"Кривизна Kp = 1/Rkp: {Kp:.6f}")  # ----- Вывод всех результатов ----- print("\n" + "="*50) print("Итоговые результаты:")  print("\n" + "="*50) print(f"k0 = {k0_solution:.6f}") print(f"k1 = {k1_solution:.6f}") print(f"Мощность на входе: {W_in_final:.3f}") print(f"Мощность на выходе: {W_out_final:.3f}") print(f"Мощность формоизменения: {W_form_final:.3f}") print(f"Суммарная мощность: {total_power_check:.3e}") print(f"Кривизна Kp: {Kp:.6e}") print("\n" + "="*50) </pre> |
| а                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | б                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

Рис. 1. Программный код: а - исходные данные; б - результаты расчета

Стоит отметить, что программа требует доработок и универсальности. Однако на сегодняшний день она позволяет прогнозировать искривления биметаллических коротких полос, больший слой которых - мягкий. Это связано с тем, что изначально модель создана под наиболее перспективный вариант прокатки ( $h_{0M} > h_{0Tb}$ ).

В результате работы разработана программа для ЭВМ, основанием для которой стала полученная ранее математическая модель несимметричной прокатки биметаллических полос без продольных усилий. По предварительным данным, процент погрешности данной программы составляет приблизительно 2 %.

### Список литературы

1. Graça A. A., Vincze G. Short Review on the Finite Element Method for Asymmetric Rolling Processes // Metals. – 2021. - 11(5). – 762 p.
2. Пелленен А.П. Об использовании несимметричной прокатки для производства лент и полос // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2020. – Т. 20. - №1. – С. 87-93.
3. Горбунова В.С., Выдрин А.В. Экспериментальное исследование процесса холодной несимметричной прокатки тонких полос из труднодеформируемых сплавов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. — 2025. — Т. 23, № 4. — С. 48-53.
4. Горбунова В.С., Выдрин А.В., Пелленен А.П. Математическая модель очага деформации при холодной несимметричной прокатке биметаллических полос // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». — 2025. — Т. 25, № 4. – С. 64-73.

## ВЫТЯЖКА И ОТБОРТОВКА ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ФУТОРКА»

Целевин Д.А

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия  
e-mail: pelevin75042@gmail.com

На данный момент в машиностроении активно применяются детали типа «футорка» из листовой стали 08кп толщиной 0,8 мм (рис. 1). При производстве данных деталей методом холодной листовой штамповки (за несколько переходов) не редко возникают проблемы, связанные с их качеством в целом, процентом брака, геометрическими размерами. На одном из предприятий Свердловской области процент брака подобных деталей доходил до 30%. Основной причиной брака является выход за рамки предельных отклонений размера  $11_{-1,0}^{+1,5}$ , ввиду отрыва цилиндрической части. В работе был проведен анализ причин образования дефектов при вытяжке и отбортовке, обозначены способы повышения пластичности листовой стали в процессах вытяжки и отбортовки, разобраны основные проблемы текущей технологии изготовления детали «футорка». В результате ознакомления с патентами и публикациями выявились следующие варианты решения проблем текущей технологии изготовления детали «футорка»:

1. Введение промежуточного отжига между операциями вытяжки.
2. Переработка текущего инструмента (штампа), выявление оптимальных зазоров и конструкции инструмента.
3. Проектирование и изготовление нового инструмента (штампа) совмещённого действия, изготовление детали за один переход.
4. Поиск альтернативных способов выполнения отверстия (сверление трением, выполнения отверстия лазерной резкой, применение специального сверла-зенковки и т.д).
5. Поиск и использование, наиболее подходящей смазки в операциях вытяжки. На данный момент смазка не используется.
6. Рассмотрение кардинального изменения текущей технологии, отказ от операции «отбортовка».

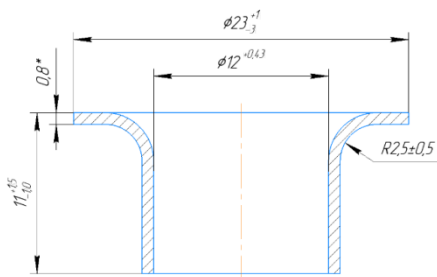


Рис. 1. Годная деталь «футорка»

## Список литературы

1. Бурдуковский В. Г. Технология листовой штамповки: учебное пособие. - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. — 224 с.
2. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1979. 520 с.
3. Ковалёв В.Г., Ковалёв С.В. Технология листовой штамповки Технологическое обеспечение точности и стойкости: учебное пособие. – Кнорус, 2016. – 224 с.
4. Патент RU2685624C2. МКП B21D 22/22. Способ листовой штамповки и дифференцированное прижимное устройство штампа листовой штамповки / Гильфанов Р. М., Князев С. Н., Трусов П. В., Янц А. Ю. // Заявка: 2017126796 опубликовано 22.04.2019 Бюл. № 12.
5. Патент RU94043601A1. МКП B21D19/08. Способ изготовления деталей с отбортовкой / Тарасов В.А., Бойцов В.В., Баранов А.Н. // Заявка: 2006112211/22, 17.07.1998. Опубликовано: 10.02.2099. Бюл. № 4.
6. Патент RU113184U1. МКП B21D19/08. Штамп для пробивки и отбортовки отверстий / Деулин К. Н. // Заявка: 2011141647/02, 13.10.2011. Опубликовано: 10.02.2012. Бюл. № 2.
7. Патент RU2105626C1. МКП B21D 19/00. Способ отбортовки отверстий / Танненберг Д.Ю., Марьин Б.Н., Фролов П.В., Петров А.М., Муравьев В.И., Макаров К.А., Урманов Р.Б. // Заявка: 93031927/02, 15.06.1993 Опубликовано: 10.03.2007 Бюл. № 7.

УДК 627.1

### РАСЧЕТ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ХОЛОДНОВЫСАДОЧНОЙ МАТРИЦЫ ДЛЯ БОЛТОВ С ФЛАНЦЕМ ПО ПРОДОЛЬНОМУ УСТАЛОСТНОМУ РАЗРУШЕНИЮ

**Олейник Д.Г.<sup>1</sup>, Корчунов А.Г.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ОАО «ММК-МЕТИЗ», Магнитогорск, Россия

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «МГТУ им Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия  
e-mail: oleynik.dmitrii@yandex.ru

Большую часть из общей массы крепежных изделий составляют болты, применяемые во всех сферах жизнедеятельности. Одним из таких видов изделий являются болты с фланцем, состоящие из шестигранной головки и бурта (фланца). Болты с фланцем активно применяются в машиностроении, авиа-, авто-, судостроении и являются прогрессивным видом крепежных изделий. Одним из наиболее рациональных способов изготовления данного вида крепежа является метод холодной объемной штамповки (ХОШ) [1].

В момент холодной объемной штамповки среди технологической оснастки основную нагрузку испытывают матрицы. Контактные давления на рабочих поверхностях холодновысадочных матриц зачастую превышают 2000 МПа, что влияет на долговечность и напрямую влияет на отказы технологического инструмента [2]. Прогнозирование долговечности матриц для холодной высадки болтов на сегодняшний день является одной из важных задач.

При ХОШ болтов с фланцем одна из самых распространенных причин отказа технологического инструмента является малоцикловое усталостное разрушение. Причиной возникновения малоциклового усталости является концентрация напряжений и деформаций в определенных участках технологического инструмента вследствие воздействия повторных нагрузок [3]. Так, в условиях предприятия ОАО «ММК-МЕТИЗ» при штамповке болтов с фланцем классом прочности 10.9 из стали марки 42CrMo4 наблюдался отказ технологического инструмента без выработки назначенного ресурса [1].

В работе методика прогнозирования долговечности матриц представлена в виде расчетов на продольное усталостное разрушение для инструментальных сталей и твердых сплавов.

### Список литературы

1. Повышение долговечности инструмента для производства болтов с фланцем на основе анализа напряженного состояния при холодной объемной штамповке / Д. Г. Олейник, А. Г. Корчунов, А. Ю. Столяров, А. Р. Базыков, О. А. Белан // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. - 2025. - № 4 (36). - С. 78–87.
2. Степанкин И. Н., Кенько В. М. Стойкость холодновысадочной оковки и методы ее повышения. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2014. – 197 с.
3. Степанский Л. Г. Прогнозирование надежности технологических процессов, инструмента и машин в обработке металлов давлением. – М.: Модерат, 2015. – 288 с.

УДК 539.4.014

## РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ, ОСНОВАННЫХ НА ФИЗИКЕ, ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОСЛЕ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ ПРОВОЛОК

Дёмин Д.О.<sup>1</sup>, Романенко Г.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> МИЭМ НИУ ВШЭ, Москва, Россия

<sup>2</sup> ФКН НИУ ВШЭ, Москва, Россия

e-mail: ddemin@hse.ru

Для составления прогнозов и дальнейшего анализа напряженно-деформированного состояния при проведении и завершении технологических операций обработки металлов давлением, в частности после процесса волочения проволок, активно применяются различные методы имитационного моделирования и методы машинного обучения [1, 2]. Наряду с классическими методами, такими как нейронные сети на базе многослойного перцептрона (Multilayer Perceptron, MLP) и модели градиентного бустинга (Gradient Boosting, GB), в последнее время активно используют нейронные сети, основанные на физике (Physics-Informed Neural Network, PINN) [3]. Данный подход за счет добавления различных уравнений в частных производных позволяет скорректировать функцию потерь во время обучения моделей, что, как правило, приводит к более корректным результатам составляемых прогнозов искомым величин.

На основе составленного ранее набора данных для низкоуглеродистой стали марки AISI 1020 и входного вектора параметров, используемого в работе [4], были составлены модели на базе MLP для компонент тензора остаточных напряжений  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$ ,  $\tau_{rz}$ . Функция потерь была дополнена уравнениями равновесия, которые в осесимметричной постановке задачи принимают вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= 0; \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} &= 0. \end{aligned}$$

В результате процесса обучения были получены для каждой компоненты тензора напряжений модели, которые оценивались с помощью метрик RMSE и  $R^2$ . Сами значения метрик для итоговых моделей представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Значения метрик при прогнозировании компонент тензора остаточных напряжений  $\sigma_{ij}$

|       | $\sigma_r$ | $\sigma_\theta$ | $\sigma_z$ | $\tau_{rz}$ |
|-------|------------|-----------------|------------|-------------|
| RMSE  | 3,067      | 11,945          | 5,928      | 0,004       |
| $R^2$ | 0,9944     | 0,9927          | 0,9921     | 0,9979      |

На рис.1 показаны результаты, получаемые с помощью обученных PINN моделей, которые демонстрируют хорошую согласованность с данными, представленными на тестовой выборке, и могут быть использованы для составления прогнозов компонент тензора остаточных напряжений.

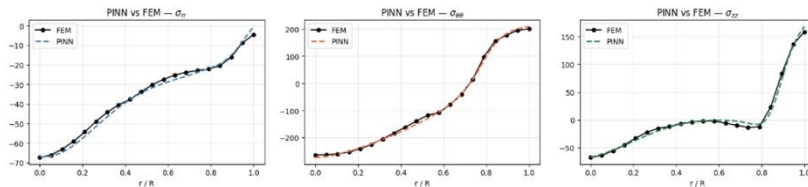


Рис. 1. Сравнение результатов прогнозов обученных моделей с результатами имитационного моделирования с применением метода конечных элементов

### Список литературы

1. Adjusting the residual stress state in wire drawing products via in-process modification of tool geometries / Baumann, M., Selbmann, R., Milbrandt, M., Kräusel, V., & Bergmann, M. // Materials. - 2021. - 14(9). - 2157. DOI: 10.3390/ma14092157.
2. Kim J. H. et al. Effect of a multiple reduction die on the residual stress of drawn materials // Materials. – 2021. – Т. 14. – №. 6. – С. 1358.
3. Modeling a typical non-uniform deformation of materials using physics-informed deep learning: applications to forward and inverse problems / Deng Y., Chen C., Wang Q., Li X., Fan Z., Li Y. // Appl. Sci. – 2023. – 13. - 4539. DOI: 10.3390/app13074539
4. Demin D., Grebenkin I., Barinov A. Forecasting the residual stress components in wires using an artificial neural network // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2025. – P. 1-12.

## **ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ВНУТРЕННЕЙ РЕЗЬБЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА КОНЕЧНОЕ КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ НА ПРИМЕРЕ КОРПУСОВ РУЛЕВЫХ НАКОНЕЧНИКОВ**

**Китев М.О.<sup>1</sup>, Гун И.Г.<sup>1</sup>, Сальников В.В.<sup>2</sup>, Столяров Ф.А.<sup>1</sup>**  
<sup>1</sup> *ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия*  
<sup>2</sup> *АО НПО «БЕЛМАГ», Магнитогорск, Россия*  
*e-mail: kitev@belmag.ru*

Формирование внутренней резьбовой поверхности – важный этап в производстве ответственных узлов и агрегатов, влияющий на безопасность их конструкции. Способ формирования резьбового профиля оказывает комплексное влияние на эксплуатационные свойства соединения. Он определяет уровень усталостной прочности, точность резьбового профиля и сопротивление пластической деформации. В условиях производства актуальны задачи повышения качества при снижении себестоимости обработки, что требует обоснованного выбора метода формирования резьбы.

Формирование внутренней резьбы представляет собой важную технологическую задачу. Исторически её реализация требовала значительных усилий и совершенствования инструментальной базы [1]. По мере развития отрасли появились различные способы создания внутреннего резьбового профиля, включая нарезание, фрезерование, накатывание, электроэрозионную обработку, шлифование и аддитивные технологии.

В настоящий момент в зависимости от назначения изделия к резьбовым поверхностям применимы различные требования, а их совокупность обеспечивает работоспособность и эксплуатационную безопасность изделий [2].

При производстве корпусов рулевых наконечников применяются два способа формирования внутренней резьбы: нарезание и накатка. В представленной работе предлагается описание технологических особенностей данных методов, описание влияния способа обработки на качество поверхности, сравнительные оценки точности резьбы, параметров шероховатости, стойкости инструмента и времени обработки при использовании каждого метода. Результаты дополнены данными экспертного опроса о приоритетности указанных параметров, что позволяет сформировать практические рекомендации по выбору оптимального метода для различных производственных сценариев.

### **Список литературы**

1. Новиков П. А. Историческая ретроспектива и новые технологии формирования внутренних резьб // Вестник современных технологий. – 2019. – № 2(14). – С. 29-36.
2. Завьялов В. С., Мальцева Н. К. Измерение параметров внутренней резьбы детали "гайка" роликвинтовой передачи электромеханического привода // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2019. – Т. 62, № 8. – С. 749-757. – DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-8-749-757.

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ ОПРАВКИ НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВИНТОВОЙ ПРОШИВКИ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ

**Григорьев Е.А.<sup>1</sup>, Нухов Д.Ш.<sup>2</sup>, Халезов А.О.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента  
России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> АО «Северский трубный завод», Полевской, Россия  
e-mail: egorik.grigirik@mail.ru

Процесс винтовой прошивки на станах поперечно-винтовой прокатки с целью получения из сплошной круглой заготовки пустотелую гильзу является наиболее прогрессивным способом получения бесшовных труб [1-3]. Интенсификация пластической деформации может происходить не только за счет выбора рациональных режимов деформации, но также за счет оптимально подобранной калибровки инструмента - валков, линеек и оправки [1]. В частности, форма и размеры короткой удерживаемой оправки оказывают значительное влияние на различные параметры процесса [2].

Рабочая поверхность применяемых оправок состоит из четырех участков: носка оправки, рабочего конуса, калибрующего участка и обратного конуса. Большинство исследователей основное внимание уделяли профилю рабочей части оправки и форме носка оправки [3, 4]. Влияние же длин этих участков на характер течения процесса недостаточно изучено.

Целью работы был поиск путей интенсификации процесса винтовой прошивки заготовки на основе изучения характера влияния длин участков оправки на качественные показатели процесса. В работе были поставлены и решены задачи конечно-элементного моделирования (МКЭ-моделирования) процесса винтовой прошивки заготовки на двухвалковом стане с грибовидными валками в программе Q-FORM. Диаметр заготовки составил  $d_3 = 360$  мм. Температура заготовки была принята 1250°C, а в качестве материала заготовки была выбрана сталь 45. Позиционирование инструмента проводилось исходя из принятых параметров настройки прошивного стана (табл.1).

Таблица 1 – Параметры настройки прошивного стана

| Расстояние между |               | Выдвижение<br>оправки за пережим<br>валков, мм | Угол            |                   |
|------------------|---------------|------------------------------------------------|-----------------|-------------------|
| валками, мм      | линейками, мм |                                                | подачи,<br>град | раскатки,<br>град |
| 324              | 358           | 100                                            | 10,5            | 12                |

Результаты решения задач МКЭ-моделирования процесса позволили получить характер полей температур, деформаций, напряжений, а также накоплений поврежденности металла при различной длине участков оправки прошивного стана (рис.1).

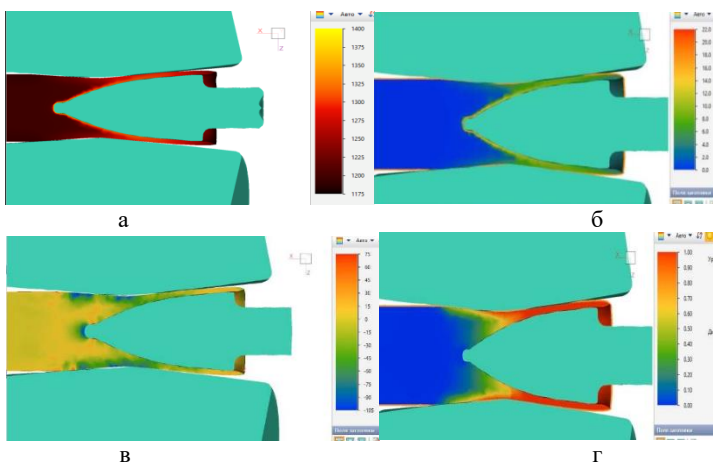


Рис. 1. Характер полей температуры (а), напряжений (б), деформаций (в) и накопления поврежденности (г) в программе QFORM при моделировании винтовой прошивки с различными длинами участков оправки

Температурные поля выявили значительные вариации в зависимости от формы и длин участков оправки. Оценка напряженного состояния показала высокий уровень растягивающих напряжений в определённых областях, что требует внимания при проектировании инструмента. Было установлено, что длина участков оправки значительно влияет на энергосиловые параметры процесса, что может иметь важные последствия для эффективности процесса прошивки. Эти результаты имеют важное значение для оптимизации процесса прошивки и повышения качества бесшовных труб.

### Список литературы

1. Швейкин В.В. Рациональная форма оправки прошивного стана // Известия вузов. Черная металлургия. – 1960. - № 8. – С. 81-87.
2. Смирнов В.С., Неужин М.Ф. Влияние формы оправки и валков на основные параметры процесса прошивки давлением // Труды ЛПИ: сборник «Обработка металлов давлением», Москва-Ленинград. – 1959. - № 201. – С. 58-76.
3. Богатов А.А. Винтовая прокатка непрерывнолитых заготовок из конструкционных марок стали: учебное пособие. - Екатеринбург: Изд. УрФУ, 2017. - 164.
4. Компьютерное моделирование процессов прошивки слитков из алюминиевого сплава в двухвалковом стане винтовой прокатки / М. М. Скрипаленко [и др.] // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2018. - № 6. - С. 42-50.

## ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ ЛЕНТЫ ИЗ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПРИ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКЕ

**Сверчков А.И., Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Локотунина Н.М.**  
*ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г. И. Носова», Магнитогорск, Россия*  
*e-mail: leshka-sverhc@rambler.ru*

В настоящее время основная задача развития черной металлургии заключается в улучшении качества и увеличении выпуска эффективных видов металлопродукции, в первую очередь холоднокатаного проката. В связи с этим выявление и реализация имеющихся резервов повышения качества проката и экономии затрат на его производство относятся к числу наиболее важных задач современного металлургического предприятия.

При производстве холоднокатаной ленты из высокоуглеродистых марок стали типа 65Г, 70 и т.д. в толщинах 0,5-1,5 мм на непрерывных станах холодной прокатки технологический процесс состоит из 2-3-х технологических циклов «холодная прокатка – промежуточный отжиг». Это связано с значительным упрочнением таких сталей при холодной прокатке и, как следствие, ограничениями прокатного оборудования по энергосиловым характеристикам. Для возможности обеспечения холодной прокатки и получения ленты заданной толщины 0,5-1,5 мм требуется проведение промежуточных отжигов. Промежуточный отжиг – это рекристаллизационный отжиг при температуре от 600 до 710 °С нагартованного металлопроката в печах с азото-водородной защитной атмосферой. Длительность одного промежуточного отжига составляет 38-44 часа. Таким образом, каждый технологический цикл «холодная прокатка – промежуточный отжиг» значительно увеличивает затраты на производство, снижает производительность технологического процесса.

Одним из перспективных нетрадиционных способов улучшения физико-механических свойств, точности геометрических размеров полос, а также снижения энергосиловых параметров процесса прокатки является скоростная асимметрия рабочих валков [1-3]. С уменьшением толщины лент и полос эффект снижения усилия возрастает [4]. Прокатка с различными окружными скоростями рабочих валков, когда оба валка приводятся в движение двумя независимыми двигателями, является наиболее подходящим способом реализации технологии асимметричной прокатки в промышленности. Обширные теоретические и экспериментальные исследования процессов асимметричной прокатки позволили выявить положительные стороны скоростной асимметрии, заключающиеся, прежде всего, в возможности значительного снижения усилия прокатки, упругих деформаций клетки, повышения обжимной способности клетки, возможности получения более тонких полос по сравнению с обычным процессом прокатки. Механика процесса асимметричной прокатки основана на создании дополнительных сдвиговых деформаций в прокатываемом металле. В отличие от симметричного процесса в очаге деформации при асимметричной прокатке возникает зона сдвиговой деформации, т.е. зона, в которой силы контактного

трения со стороны ведущего (вращающегося с большей скоростью) и ведомого (вращающегося с меньшей скоростью) валков направлены в противоположные стороны [1]. Асимметричная прокатка за счет рассогласования скоростей рабочих валков может быть также использована для измельчения зерна, улучшения текстуры и механических свойств различных металлов и сплавов [1, 2]. Основным управляемым параметром асимметричной прокатки является коэффициент асимметрии ( $f_a$ ) – соотношение линейных скоростей ведущего ( $V_1$ ) и ведомого ( $V_2$ ) рабочих валков.

На непрерывных станах холодной прокатки скоростная асимметрия является альтернативой применения дополнительного обжатия. Скоростную асимметрию также рекомендуют для уменьшения продольной разнотолщинности на отдельных участках прохождения полосы с пониженной скоростью. К ним относятся: передний участок, который заправляют в стан и моталку, участок прокатки сварного шва, задний участок на выходе из стана.

Таким образом, асимметричная прокатка за счет рассогласования скоростей рабочих валков может быть использована для снижения усилий прокатки, повышения обжимной способности клетей и, как следствие, получения более тонкой ленты без использования промежуточных отжигов. Асимметричная прокатка также является эффективным методом, который позволяет оптимизировать процесс холодной прокатки и снизить износ валков. Поскольку асимметричная прокатка позволяет более точно достигать требуемых размеров и форм, это может сократить количество перевалок на стане, что, в свою очередь, снижает износ валков и уменьшает затраты на их замену.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-20026, <https://rscf.ru/project/24-19-20026/>*

### Список литературы

1. Процессы асимметричной прокатки: теория и технологические решения / В.М. Салганик, А.М. Песин, Д.Н. Чикишев и др. – Магнитогорск, 2013. – 128 с.
2. Песин А.М. Моделирование и развитие процессов асимметричного деформирования для повышения эффективности листовой прокатки // Моделирование и развитие процессов ОМД. – 2002. – № 1. – С. 107–113.
3. Межгосударственные стандарты. ГОСТ 2283-79. Лента холоднокатаная из инструментальной и пружинной стали.
4. Kornilov G.P., Nikolaev A.A. and Khrumshin T.R. Modelirovanie elektrotekhnicheskikh kompleksov promyshlennykh predpriyatij [Modeling of electrotechnical complexes of metallurgical enterprises]. - Magnitogorsk: NMSTU Publ., 2014.

## ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ПРОКАТКИ ПЛИТЫ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АК4-1

Глинских П.И.<sup>1</sup>, Замаева Ю.В.<sup>1,2</sup>, Яковлев С.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод»,  
Каменск-Уральский, Россия

<sup>2</sup> Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия  
e-mail: pasha-glinskih@mail.ru

В настоящее время большая часть работ направлена на стабилизацию механических свойств и актуализацию производства полуфабрикатов из жаропрочного сплава АК4-1 и его модификаций (АК4-1ч, АК4-2ч и др.), относящихся к системе Al-Cu-Mg-Fe-Ni [1-3].

В настоящей работе показаны результаты анализа влияния формы очага деформации ( $m$  – коэффициент формы очага деформации,  $m = l_d/h_{cp}$ , где  $l_d$  – длина дуги захвата,  $h_{cp}$  – средняя толщина заготовки) на равномерность распределения интенсивности напряжений по толщине деформируемой заготовки из сплава АК4-1 в процессе горячей прокатки. Распределение интенсивности напряжений получено посредством моделирования вышеуказанного процесса в программном комплексе QForm. Исходной заготовкой принят слэб толщиной 400 мм, начальная температура заготовки 430°C, температура валков 80°C. Трение задано законом Кулона при значении коэффициента трения 0,2. Скорость вращения валков 0,3 рад/с. Моделирование осуществлено для двух вариантов процесса: первый – при  $m=0,3$ , второй – при  $m=0,56$ . Как отмечалось в работе [4], при  $m \leq 0,55$  не происходит эффективной проработки центральной зоны плиты, что может привести к пониженному уровню механических свойств в высотном направлении.

На рис. 1 показано распределение интенсивности напряжений ( $\sigma_i$ ) в очаге деформации при  $m=0,3$  (рис. 1, а) и при  $m=0,56$  (рис. 1, б).

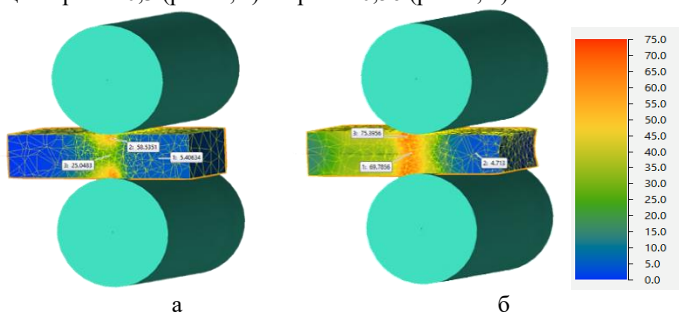


Рис. 1. Распределение интенсивности напряжений (МПа) в очаге деформации при  $m=0,3$  (а) и при  $m=0,56$  (б)

На рис. 1, а видно, что при  $m=0,3$  интенсивность напряжений локализована вблизи верхней и нижней поверхностей плиты, ее максимум здесь достигает  $\sigma_{\text{пов}}=58,5$  МПа, в то время как максимум интенсивности напряжений центральной части ( $\sigma_{\text{центр}}$ ) понижен на 57,2 % относительно максимума интенсивности напряжений поверхности и имеет значение 25 МПа. Можно предположить, что такая форма очага деформации не обеспечит в условиях реального производства равномерную проработку структуры по толщине изделия.

На рис. 1, б видно, что при  $m=0,56$  область интенсивной деформации охватывает практически все сечение плиты (по толщине), включая центральную зону. Здесь максимум  $\sigma_{\text{пов}}$  достигает 75,3 МПа, а  $\sigma_{\text{центр}} - 69,7$  МПа, т.е. максимум интенсивности напряжений центральной части понижен на 7,4 % относительно максимума интенсивности напряжений поверхности. Таким образом, во втором варианте процесса можно предположить более равномерную по толщине проработку структуры изделия в условиях реального производства по сравнению с вариантом процесса № 1.

Практической рекомендацией является стремление отношения  $\sigma_{\text{пов}}/\sigma_{\text{центр}} \rightarrow \min$ . Отметим, что минимальное значение вышепоказанного отношения зависит, например, от возможностей прокатного оборудования и свойств деформируемого сплава.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.*

#### Список литературы

1. Логинов Ю.Н., Головнин М.А., Снегирев И.В. Статистический анализ механических свойств плоского проката из алюминиевого сплава системы Al-Cu-Mg-Fe-Ni // Технология легких сплавов. - 2017. - №1. - С. 29-34.
2. Оптимизация режимов искусственного старения кованных и катаных полуфабрикатов из жаропрочного алюминиевого сплава АК4-1ч / А.А. Селиванов, К.В. Антипов, А.И. Асташкин и др. // Труды ВИАМ. - 2018. - № 4. - С. 9-19.
3. Определение оптимальных режимов горячей прокатки плит из алюминиевого сплава Ак4-1ч / П.И. Глинских, Ю.В. Замаева, С.И. Яковлев и др. // Вестник магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2025. - № 4. - С. 61-70.
4. Патент 16291118 СССР, МПК В21В3/00. Способ горячей прокатки плит из алюминиевых сплавов / В.М. Чертовиков, И.М. Меерович, В.К. Орлов, В.И. Попов, Н.И. Беспутин; заявитель и патентообладатель Всесоюзный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт металлургического машиностроения им. А.И. Целикова. № 4629824/02; заявл. 28.11.1988; опубл. 23.02.1991.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ГОФРИРОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПК QForm

Арцибашев С.В., Нужин И.Н., Горбунов А.В.

ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», Магнитогорск, Россия  
e-mail: artsibashev.sv@mmk.ru

Замена традиционных низкоуглеродистых марок стали на современные высокопрочные при производстве «крышек люков» полувагонов является перспективным направлением в машиностроении. Это важный конструкционный элемент, который испытывает постоянные механические нагрузки и подвергается воздействию агрессивных сред (влага, химические реагенты, перепады температур). Повышение долговечности и надёжности этого элемента — ключевая задача для железнодорожной отрасли, поскольку это напрямую влияет на безопасность и экономическую эффективность эксплуатации подвижного состава. Использование высокопрочных марок стали позволяет уменьшить толщину крышек люков без потери прочности. Снижение массы полувагона приводит к увеличению полезной грузоподъёмности, что повышает экономическую составляющую от грузоперевозок. Также повышается срок службы подвижного состава за счёт большей устойчивости к износу и коррозии.

Было произведено моделирование процесса изготовления гнутых профилей «крышек люков» с помощью программного комплекса QForm (рис. 1). Моделирование позволяет прогнозировать поведение материала при деформационной обработке, выявлять возможные дефекты (трещины, складки, неравномерность толщины) и оптимизировать технологические параметры. Проведена оценка того, как различные свойства стали влияют на конечную форму изделия и вероятность появления дефектов. В качестве материала заготовки были заданы свойства реального проката. В результате была подтверждена возможность замены традиционно используемых марок стали (10ХНДП и 09Г2Д) на высокопрочные аналоги без существенного риска возникновения трещин и ухудшения плоскостности детали. Полученные результаты свидетельствуют о потенциальной экономической выгоде такого подхода, что открывает перспективы для дальнейшей оптимизации производственных процессов и снижения расходов предприятия. Также стоит отметить, что использование моделирования в программе QForm значительно сокращает затраты на натурные экспериментальные исследования, снижает количество брака и время проектирования новой оснастки. Таким образом, применение цифровых моделей и методов моделирования позволяет оптимизировать технологические цепочки, улучшить качество продукции, повысить уровень контроля необходимых параметров на каждом этапе и обеспечить полное соответствие заданным стандартам качества.

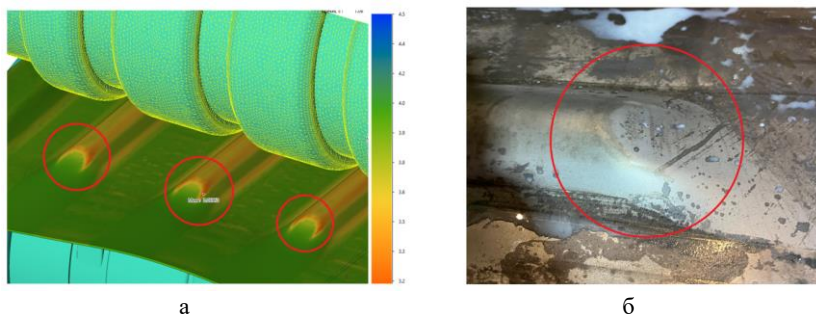


Рис. 1. Моделирование (а) и фотография (б) реального производства детали «крышки люка» полувагона

### Список литературы

1. Якубович О. И. и др. Конечно-элементное моделирование процесса холодной штамповки крышки люка полувагона // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки. Mekhanika. Nauchnye issledovaniya i uchebno-metodicheskie razrabotki. [Mechanics. Scientific research and educational and methodological developments] – 2010. – №4 – С. 145-151.
2. Власов Ан. В., Стебунов С.А., Евсюков С.А. и др. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки: учебное пособие под ред. Ан. В. Власова.- М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019 – 383 с.
3. Abspoel M., Scholting M. E., Droog J. M. M. A new method for predicting forming limit curves from mechanical properties //Journal of Materials Processing Technology. – 2013. – Т. 213. – №. 5. – С. 759-769.
4. Бороненко Ю. П., Филиппова И. О. Использование высокопрочных сталей в вагоностроении //Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. Transport Rossijskoj Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike [Transport of the Russian Federation. Journal of Science, Practice, and Economics] – 2015. – №. 3 (58). – С. 16-19.
5. Применение высокопрочной стали — перспективный путь повышения грузоподъемности подвижного состава // Вагонник: [сайт]. — 2024. — 25 июля. — URL: <https://wagon-cargo.ru/news/primenenie-vysokoprochnoy-stali-perspektivnyu-put-povysheniya-gruzopodemnosti-podvizhnogo-sostava/> (дата обращения: 26.01.2026).
6. Орлова А. М., Демин К. П., Попеску Р. В. Применение высокопрочной стали для создания полувагонов повышенной грузоподъемности // Бюллетень результатов научных исследований. Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovanij. [Bulletin of scientific research results]. – 2024. – №. 3. – С. 7-23.

## ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОРИСТЫХ СТАЛЕЙ С ТРИП-ЭФФЕКТОМ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Константинов Д.В., Огнева Е.М., Корчунов А.Г.**  
*ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова», Магнитогорск, Россия*  
*e-mail: const\_dimon@mail.ru*

На данный момент особый интерес вызывает недостаточно изученное в мировой литературе сочетание хорошо зарекомендовавших себя в системах кузовной безопасности автомобилей стали с трип-эффектом [1-9] со структурой пенометаллов. Эти материалы, уже доказавшие свою эффективность в системах пассивной безопасности автомобилей, содержат метастабильный остаточный аустенит, который при деформации превращается в мартенсит, обеспечивая дополнительное упрочнение и поглощение энергии. Таким образом, разработка пенометаллических изделий на основе стали с трип-эффектом представляет собой перспективное направление, способное вывести энергопоглощающие конструкции на качественно новый уровень. Наиболее близкими к запланированным исследованиям можно считать проект SFB 799: TRIP-Matrix-Composite - Design von zähen, umwandlungsverstärkten Verbundwerkstoffen und Strukturen auf Fe-ZrO<sub>2</sub>-Basis, выполненный при поддержке немецкого фонда DFG [9-11]. В ходе данного проекта одной из работ было первичное исследование пористых структур из высокопрочных трип-сталей с плотностью пор на единицу объема 30ppr. Коллектив авторов наглядно продемонстрировал высокий потенциал данных материалов для отраслей с потребностью в поглощении энергии ударов, но и отметил высокую вариативность исследований в данной области из-за большого числа характеристик исследуемых сталей и их вариаций в сочетании с форм-фактором пены.

Предварительные результаты конечно-элементного моделирования поведения пенометаллической структуры на основе стали TRIP 600 показали, что в процессе деформации реализуется сложная последовательность физических механизмов. Уже на начальной стадии сжатия наблюдаются локализации пластических деформаций, распространяющиеся от поры к поре. В наиболее нагруженных объемах, преимущественно в зонах «схлопывания» пор, где наиболее вероятно зарождение трещин, активируется трип-эффект: метастабильный остаточный аустенит превращается в мартенсит, что сопровождается скачкообразным локальным упрочнением. Теоретически это замедляет процесс разрушения и увеличивает продолжительность эффективного энергопоглощения. По мере исчерпания ресурса пористой структуры в деформацию вовлекаются сплошные участки материала, где аналогичный микроструктурный механизм также проявляется, а при полной его реализации сталь упрочняется за счёт традиционных для стали с трип-эффектом механизмов. В условиях локального нагружения указанные эффекты проявляются ещё более выражено, что подчёркивает потенциальную эффективность таких материалов в задачах локального поглощения энергии - при ударах, пульсирующих нагрузках и пр.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (соглашение № 25-29-20042 от 14.05.2025, <https://rscf.ru/project/25-29-20042/>) и финансовой поддержки Правительства Челябинской области (Соглашение № 30-2025-002767 от 07.07.2025г.).*

### Список литературы

1. Мультимасштабное компьютерное моделирование производства и эксплуатации самоадаптирующегося крепежа из стали с трип-эффектом / Корчунов А.Г., Константинов Д.В., Огнева Е.М., Олейник Д.Г., Денисов С.В. // Черные металлы. – 2025. – № 11. – С. 27–33.
2. Zackay V.F., Parker E. R., Fahr D. Materials used in automobile manufacture – current state and perspectives // Journal De Physique IV. – 1967. – Vol. 3. – Pp. 31–40.
3. Galan J., Samek L. Advanced high strength steels for automotive industry // Revista de Meta-lurgia. – 2012. – No.48. – Pp. 118–131.
4. Kuziak R., Kawalla R., Waengler, S. Advanced high strength steels for automotive industry // Archives of Civil and Mechanical Engineering. – 2008. – No.8. – Pp. 103-117.
5. Bast J.L., Lehr J. The increasing sustainability of cars, trucks, and the internal combustion en-gine // Heartland Policy Study. – 2000. – No.95. – Pp. 1-69.
6. Doege E., Kulp S., Sunderkötter Ch. Properties and application of TRIP-steel in sheet metal forming // Steel Research. – 2016. – No. 73. – Pp. 303-308.
7. Davies G. Magnesium: Materials for automotive bodies // Elsevier G. London. - 2003. – No. 91. – Pp. 158-159.
8. Amirthalingam M. Microstructural development during welding of TRIP steels: PhD thesis in metallurgical and materials Engineering // M. Amirthalingam. - Netherlands. - 2010. - 171 p.
9. SFB 799: TRIP-Matrix-Composite – Design von zähen, umwandlungsverstärkten Verbundwerkstoffen und Strukturen auf Fe-ZrO<sub>2</sub>-Basis [Электронный ресурс] // Deutsche Forschungsge-meinschaft (DFG). — URL: <https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/54473466> (дата обращения: 03.01.2026).
10. Energy-absorbing TRIP-Steel/Mg-PSZ composite honeycomb structures based on ceramic extrusion at room temperature / Aneziris Christos G., Schärfl Wolfgang, Biermann Horst & Martin Ullrich // International Journal of Applied Ceramic Technology. – 2009. - 6. - P. 727-735.
11. Microstructure and compression strength of novel TRIP-steel/Mg-PSZ composites / Biermann Horst, Martin Ulrich, Aneziris Christos G., Kolbe Anja, Müller Angelika, Schärfl Wolfgang & Herrmann Mathias // Advanced Engineering Materials. – 2009. – 11. - P. 1000-1006.

## **ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ НА ПАО «МАГНИТОГОРСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ»**

**Белых М.К.<sup>1</sup>, Гордеев С.А.<sup>2</sup>, Ершов А.Н.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>ООО «ОСК», Магнитогорск, Россия

<sup>2</sup>Группа ПАО «ММК», Магнитогорск, Россия

<sup>3</sup>ООО «Предикта», Магнитогорск, Россия

*e-mail: gordeev.sa@mmk.ru*

Основная цель настоящего исследования — анализ ключевых технологических и организационных проблем внедрения систем предиктивного обслуживания (PdM) в отечественной промышленности с учётом российской специфики на примере реализованных проектов.

### **1. Сущность и преимущества предиктивной аналитики.**

Суть предиктивной диагностики и систем интеллектуального мониторинга заключается в выявлении закономерностей в изменении показателей оборудования за предыдущие периоды и в настоящий момент для прогнозирования их поведения в будущем. Это позволяет заблаговременно выявлять возможные дефекты и неисправности.

Переход от планового к предсказательному обслуживанию (PdM) устраняет ключевые недостатки традиционной системы: избыточность ремонтов и незапланированные простои. Технологической основой PdM выступают интернет вещей (ПоТ), киберфизические системы и методы искусственного интеллекта (ИИ/МО) для анализа данных с датчиков (вибрация, температура, давление) и журналов отказов. Внедрение таких систем позволяет повысить эффективность производства за счёт сокращения простоев и оптимизации затрат на ремонт.

### **2. Ключевые проблемы внедрения (на примере ПАО «ММК»).**

#### **2.1. Организационные барьеры.**

Необходимость создания внутреннего центра компетенций. Для корректного обнаружения дефектов и совершенствования PdM требуются соответствующие компетенции, встроенные в бизнес-процессы компании.

Обеспечение функционирования PdM: датчики ПоТ и системы сбора данных нуждаются в собственном техническом обслуживании и ремонтах.

Интеграция в сложившийся процесс ТОиР: требуется глубокое «погружение» в ремонтные процессы, постоянная работа с PdM-системами. Наблюдается скепсис персонала относительно точности рекомендаций, а также сложности в организации взаимодействия различных ремонтных служб.

#### **2.2. Проблема данных.**

Качество и разметка: отсутствие аннотированных данных о сбоях, пропуски значений, плохая структурированность данных.

Достоверность: влияние внешних воздействий на показания датчиков.

Объём и разнообразие: необходимость сбора больших объёмов высокочастотных данных с различных узлов оборудования.

#### **2.3. Обнаружение и обработка аномалий.**

Сложность детектирования аномалий, вызванных именно сбоем оборудования.

Необходимость учёта корреляций между показаниями множества датчиков.

#### 2.4. Ограничения существующих методов прогнозирования.

Экспертный подход (правила, нечёткая логика): требует высокой экспертизы, сложен в документировании и масштабировании.

Физическое моделирование: требует глубоких знаний физики и математики с участием технологов, дорог в разработке.

ИИ - модели часто узкоспециализированы, не масштабируются на другое оборудование и плохо предсказывают редкие сбои.

#### 3. Архитектурные аспекты построения систем PdM.

Облачные вычисления: поставщик оборудования предоставляет готовое решение на своих серверах. Проблемы — задержки, надёжность передачи больших объёмов данных, высокая стоимость.

Централизованный сервер предприятия: обработка данных со всех систем предиктивной аналитики ведётся на корпоративном сервере диагностики.

Децентрализованный подход (периферийные вычисления): обработка данных происходит ближе к источникам, что снижает задержки и нагрузку на сеть.

4. Опыт внедрения на производственной площадке ПАО «ММК» и специфические проблемы.

На примере решений ООО «Предикта» были реализованы следующие проекты:

- система гиперлокального контроля теплового состояния корпуса доменной печи;

- диагностика механической части электропривода конусной дробилки рудно-обогажительной фабрики;

- диагностика механического оборудования прокатных цехов.

В ходе внедрения выявлены специфические проблемы отечественной промышленности:

- отсутствие внятных требований и консенсуса внутри предприятия;

- завышенные ожидания и непонимание того, что PdM — это развивающаяся, а не статичная система;

- незаинтересованность сервисных структур или отдельных подразделений заказчика;

- невозможность получить даже пилотные данные из-за опасений «передачи данных за забор» (избыточные требования информационной безопасности);

- высокие требования к продукту с точки зрения соответствия сложной ИТ-архитектуре крупного промышленного холдинга (включая аспекты ИБ).

5. Совершенствование и развитие новых технологий предиктивной аналитики.

Ключевым направлением развития систем PdM является консолидация заказчиков. Стратегическое партнёрство предприятий для формирования крупных серийных заказов на оборудование и программное обеспечение позволит снизить стоимость решений и повысить их качество за счёт экономии масштаба и обратной связи от разных производственных площадок.

## УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ МНОГОКЛЕТЬЕВЫХ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ ПРИ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКЕ

**Бочкарев А.А., Корнилов Г.П.**

*ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова», Магнитогорск, Россия  
e-mail: analogsynth@mail.ru*

Внедрение управляемой асимметричной прокатки (АП) на действующих прокатных станах требует адаптации локальных и технологических систем автоматического регулирования (САР) к рассогласованию скоростей валков [1]. При АП на многоклетьевых станах требуется обеспечить следующее:

1. Поддержание заданных натяжений в межклетьевых промежутках.
2. Формирование требуемых геометрических параметров полосы.
3. Стабилизацию коэффициента асимметрии при внешних возмущениях.

Первые две задачи возложены на САР натяжения, толщины и размеров. Необходимость стабилизации коэффициента асимметрии  $K_{ac}$  определяют способом создания асимметрии в очаге деформации.

На станах с групповым электроприводом рабочих валков используют геометрическую ( $R1 \neq R2$ ) или фрикционную асимметрию ( $f1 \neq f2$ ) ( $R1, R2, f1, f2$  – радиусы рабочих валков и коэффициенты трения их поверхностей).

Величина коэффициента  $K_{ac}$  при этом остаётся постоянной и лежит в диапазоне 1,01...1,05.

При скоростной асимметрии, применяемой на станах с индивидуальным приводом рабочих валков, коэффициент асимметрии задают рассогласованием угловых скоростей двигателей ( $\omega1 \neq \omega2$ ):

$$K_{ac} = \frac{\omega_1}{\omega_2}. \quad (1)$$

Для многоклетьевых станов допускается скоростная асимметрия с  $K_{ac} \leq 1,5$ . Искажение заданной величины коэффициента асимметрии возможно по ряду причин:

1. Работа электропривода в области ограничения тока или момента.
2. Длительный генераторный режим двигателя ведомого валка.
3. Действие на регуляторы скорости двигателей корректирующих сигналов от технологических САР и внешних возмущений.

Для исключения влияния первых двух факторов на режим АП достаточно обеспечить запас по мощности двигателя и преобразователя ведущего валка и возможность длительной рекуперации энергии приводом ведомого валка.

Скомпенсировать искажение установленной величины  $K_{ac}$  возможно с помощью регуляторов асимметрии (РА) [1, 2]. Контур регулирования асимметрии в структуре САР электропривода валков (рис. 1) является внутренним по отношению к регулятору натяжения РН и внешним для регулятора скорости (РС). Регулирование коэффициента асимметрии производится по отклонению заданной величины от фактической:  $\Delta K_{ac} = K_{ac} - K_{ac}$ . При использовании пропорционально-интегрального РА статическая ошибка равна нулю:  $\Delta K_{ac} = 0$ .

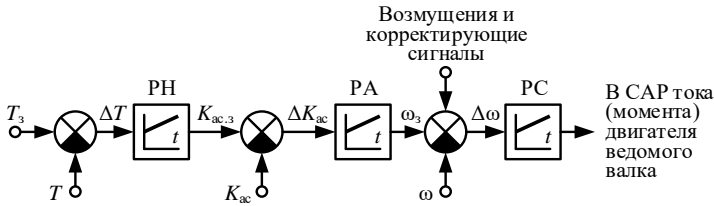


Рис. 1. Упрощённая структурная схема САР электропривода с регулятором асимметрии

Исследования динамики работы РА и РН, выполненные на компьютерной модели электроприводов двухклетьевого стана при АП, подтвердили возможность одновременной работы контуров регулирования асимметрии и натяжения. На осциллограммах (рис. 2) показан процесс стабилизации натяжения и коэффициента асимметрии в межклетьевом промежутке при воздействии корректирующего сигнала на вход РС.

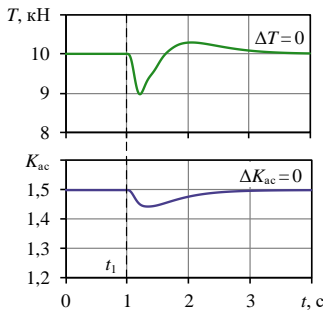


Рис. 2. Осциллограммы натяжения и коэффициента асимметрии при стабилизации асимметрии

### Список литературы

1. Управление электроприводами прокатных станов при асимметричной прокатке / Г. П. Корнилов, А. М. Песин, А. А. Бочкарев [и др.] // *Металлург.* – 2026. – № 2. – С. 49-56. – DOI: 10.52351/00260827\_2026\_2\_49.
2. Stabilization of roll speed mismatch in controlled asymmetric rolling / A. Bochkarev, G. Kornilov, A. Pesin [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2025. – Vol. 3127, No. 1. – P. 012008. – DOI: 10.1088/1742-6596/3127/1/012008.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПРЯМОЙ И РЕВЕРСИВНОЙ СХЕМ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК НА СТАНЕ РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ ПРОКАТКИ НА ЭВОЛЮЦИЮ МИКРОСТРУКТУРЫ

Попов Ф.Е.<sup>1</sup>, Арбуз А.С.<sup>1</sup>, Лежнев С.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Назарбаев университет, Астана, Казахстан

<sup>2</sup>Рудненский индустриальный университет, Рудный, Казахстан

e-mail: fedor\_popoff@mail.ru

Уже давно доказано, что одним из перспективных способов реализации интенсивной пластической деформации в объеме деформируемого металла является радиально-сдвиговая прокатка [1]. На данный момент разработан и создан целый ряд прокатных станов, в основе которых лежит схема радиально-сдвиговой прокатки. Эти станы в большинстве случаев имеют общую конструктивную схему, но отличаются по типоразмеру прокатываемых заготовок. В некоторых случаях данные станы имеют и конструктивные отличия, например, в геометрии используемых рабочих валков. Так, форма валков стана РСР 10-30 предназначена для реализации только стандартной (так называемой прямой) схемы деформирования, а, например, форма валков стана СВР-08 позволяет осуществлять как стандартное прямое, так и реверсивное деформирование заготовок [2]. При этом эти валки имеют как свои преимущества, так и недостатки.

Как уже было отмечено выше, валки стана СВР-08 могут обеспечить как стандартное, так и реверсивное деформирование заготовок. Но в то же время анализ научно-технической и патентной литературы показывает, что на данный момент нет информации о сравнительном анализе данных схем деформирования заготовок на стане РСР и их преимуществах и недостатках. А это упущение, так как только в случае правильного выбора различных параметров (геометрических и технологических) деформирования металла на станах РСР появляется возможность сократить количество проходов для получения на этих станах высококачественных прутков с ультрамелкозернистой структурой и заданным уровнем свойств. Параметр «реверсивная схема деформирования» относится как к геометрическому, так и к технологическому параметру, так при использовании такой схемы деформирования при четном проходе меняется как форма геометрии очага деформации, так и направление истечения металла.

Целью данной работы является исследование и проведение сравнительного анализа влияния традиционной прямой и реверсивной схем деформирования заготовок на стане радиально-сдвиговой прокатки на эволюцию микроструктуры. Для достижения поставленной цели было проведено как компьютерное моделирование в программном комплексе DEFORM, так и физический эксперимент.

При компьютерном моделировании геометрия валков соответствовала реальной конструкции валков стана радиально-сдвиговой прокатки СВР-08. В ходе компьютерного моделирования исходная заготовка из стали марки AISI S1 (аналог стали 5ХВ2С) диаметром 30 мм подвергалась деформированию в валках стана РСР в два прохода. В первом проходе исходную заготовку деформировали

до диаметра 28 мм и во втором проходе до диаметра 26 мм. При этом второй проход в первом случае реализовывали как и первый проход по стандартной прямой схеме, а во втором случае по реверсивной схеме.

При физическом эксперименте предварительно нагретые до температуры начала деформирования, а именно до 1100°C, заготовки из стали 5XB2C диаметром 32 мм деформировали на стане СВП-08 до диаметра 14 мм по схеме  $\varnothing 32 \rightarrow \varnothing 29 \rightarrow \varnothing 26 \rightarrow \varnothing 23 \rightarrow \varnothing 20 \rightarrow \varnothing 17 \rightarrow \varnothing 14$  мм по двум схемам: стандартной прямой и реверсивной. Для исследования характера изменения микроструктуры по сечению полученных в ходе физического эксперимента прутков был применен метод дифракции обратно-рассеянных электронов (EBSD) на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ). Выбор данного метода обоснован тем, что EBSD-анализ не только очень информативен с точки зрения определения различных фаз и их ориентаций, но гораздо более точно и однозначно позволяет определять зеренную структуру по контрасту полос для оценки формы и размера зерен.

Полученные в ходе компьютерного моделирования и физического эксперимента результаты показывают, что использование реверсивной схемы деформирования позволяет лучше проработать осевую зону получаемых прутков по сравнению с использованием прямой схемы деформирования. При этом прямая схема деформирования позволяет более интенсивно прорабатывать поверхностную зону прутков. За счет этого при прямой схеме деформирования в сечении продеформированного прутка образуется градиентная структура с мелким зерном на поверхности прутка и вытянутыми зернами в осевой зоне, а при реверсивной прокатке обеспечиваются условия для получения более однородной структуры.

На основании полученных результатов можно констатировать, что окончательный выбор маршрута деформирования заготовок на стане радиально-сдвиговой прокатки СВП-08 во многом будет зависеть от ожидаемого результата от этого деформирования на эволюцию микроструктуры, т.е. от необходимости получения однородной структуры по сечению прутка или же градиентной.

*Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № AP26100119).*

### **Список литературы**

1. Современное развитие элементов теории, технологии и мини-станов радиально-сдвиговой прокатки / Галкин С.П., Гамин Ю.В., Алещенко А.С., Романцев Б.А. // Черные металлы. - 2021. - №12. – С. 51-58.
2. Choosing the design of a radial-shear rolling mill for obtaining a screw profile / Lezhnev S., Naizabekov A., Tolkushkin A., Panin E., Kuis D., Arbuz A., Tsyba P., Shyraeva E. // Modelling. – 2024. – Vol. 5. - P. 1101–1115.

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ПРЕССОВАНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТА ВЫТЯЖКИ НА СКОРОСТЬ ДЕФОРМАЦИИ В ПРОЦЕССЕ ПРЕССОВАНИЯ ЛЕГКОСПЛАВНОЙ БУРИЛЬНОЙ ТРУБЫ

Замараева Ю.В.<sup>1,2</sup>, Дегтярева О.Ф.<sup>2</sup>, Логинов Ю.Н.<sup>3,4</sup>, Разинкин А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> АО «КУМЗ», Каменск-Уральский, Россия

<sup>2</sup> ООО «Бурильные трубы», Каменск-Уральский, Россия

<sup>3</sup> Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

<sup>4</sup> ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия  
e-mail: zamaraevajulia@yandex.ru

Известно, что повышенное значение скорости деформации может привести к дефектам типа «штриховые расслоения» в горячепрессованных легкосплавных бурильных трубах (ЛБТ) [1]. Одними из влияющих факторов на скорость деформации являются скорость истечения ( $V_{ист}$ ) и коэффициент вытяжки ( $\lambda$ ). Скорость истечения при этом связана со скоростью прессования ( $V_{прес}$ ) соотношением  $V_{ист} = \lambda V_{прес}$ . Таким образом, актуально определение влияния скорости прессования и коэффициента вытяжки на скорость деформации.

В настоящей работе определение вышеуказанного влияния осуществлено посредством моделирования в программном комплексе DEFORM процесса прессования трубы  $d152 \times 170 \times 143$  мм с наружными концевыми утолщениями из сплава Д16. Моделирование осуществлено при скорости прессования 0,6-1,6 мм/с с шагом 0,2. Отметим, что скорость прессования одинакова и при прессовании концевой утолщения, и при прессовании основного сечения трубы. Коэффициент вытяжки при прессовании концевой утолщения равен 13,39, при прессовании основного сечения – 34,13, т.е. разница составляет 2,5 раза.

На рис. 1 для примера показано распределение скорости деформации в концевом утолщении (рис. 1, а) и в основном сечении (рис. 1, б) трубы при скорости прессования равной 1,6 мм/с.

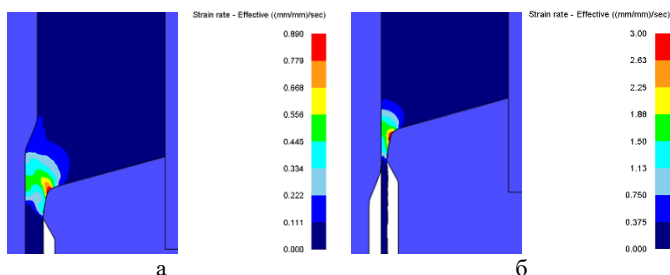


Рис. 1. Распределение скорости деформации в концевом утолщении (а) и в основном сечении (б) трубы при скорости прессования, равной 1,6 мм/с

Здесь видно, что максимум скорости деформации в обоих случаях (см. рис. 1) находится на наружной поверхности трубы. Укажем, что аналогичное

распределение скорости деформации наблюдается и в других моделируемых процессах прессования, однако ее значения меняются.

На графике (рис. 2) показаны значения максимума скорости деформации при изменении скорости прессования в диапазоне 0,6-1,6 мм/с. Здесь видно, что с увеличением коэффициента вытяжки в 2,5 раза максимальная скорость деформации в среднем возрастает в 3 раза (для каждой назначенной скорости прессования).

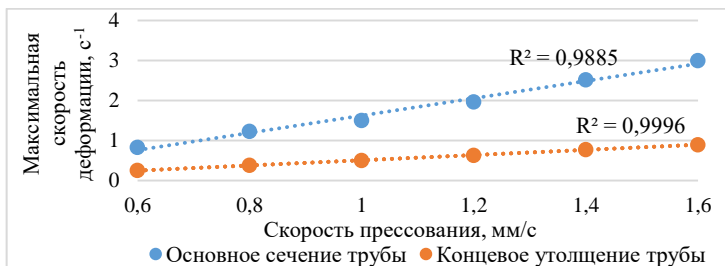


Рис. 2. Значения максимума скорости деформации при изменении скорости прессования в диапазоне 0,6-1,6 мм/с

Представленные на рис. 2 линии тренда (для основного сечения и для концевой утолщения) показывают линейную связь скорости прессования и максимальной скорости деформации. Отметим, что построенная модель является статистически значимой, так как значения коэффициентов корреляции равны  $R^2 = 0,9885$  и  $R^2 = 0,9996$  (очень сильная взаимосвязь параметров).

Из работы [1] известно, что изменение значения скорости деформации в 2 раза позволило уменьшить процент брака по штриховым расслоениям ЛБТ. Допустим, что изменение скорости деформации в 2 и более раз может привести к изменению свойств изделия. В исследуемых вариантах процесс изменения скорости деформации в зависимости от скорости прессования может достигать 3,5 раза как для концевой утолщения, так и для основного сечения трубы. Таким образом, можно предположить значительную разницу свойств в зависимости от выбранного скоростного режима прессования исследуемых труб. Это важно учитывать при разработке технологического процесса.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.*

### Список литературы

1. Влияние температуры заготовки и скорости прессования на напряженно-деформированное состояние и дефектообразование буровой трубы с протектором / Замаева Ю.В., Логинов Ю.Н., Дегтярева О.Ф., Разинкин А.В. // *Металлург.* – 2024. – № 5. – С. 74–79.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ В QForm И САПР КАЛИБЕР

**Алимов И.С., Гладков Ю.А.**  
ООО «КванторФорм», Москва, Россия  
e-mail: igor.alimov@qform3d.ru

Сортопрокатное производство, как неотъемлемая часть металлургической отрасли, представляет собой масштабный и энергоёмкий процесс. Ошибки на стадии разработки калибровки и выбора параметров прокатки могут приводить к появлению дефектов, снижению качества готового профиля, повышенному износу инструмента и риску разрушения валков. Для решения этих задач всё шире применяются программные комплексы численного моделирования и специализированные САПР, в частности QForm и САПР Калибер.

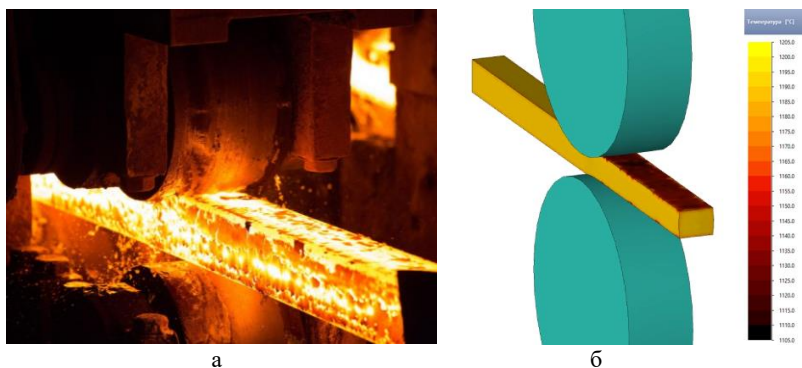


Рис. 1. Изображение прохода прокатки на реальном стане (а) и моделирование прокатки в QForm (б)

Основная цель применения QForm и САПР Калибер при продольной прокатке заключается в предварительной проверке и оптимизации технологии до её внедрения на стане. Это позволяет оценить формоизменение металла, температурный режим, напряжённо-деформированное состояние, нагрузку на инструмент, условия захвата полосы валками и вероятность возникновения дефектов. Такой подход сокращает количество промышленных проб, снижает затраты на настройку оборудования и повышает стабильность технологического процесса. При прокатке сортовых профилей могут возникать такие проблемы, как волнистость шейки балки, дефект типа «язык», незаполнение или переполнение калибра, складкообразование, серповидность и скручивание раската. Например, «язык» может быть связан с неравномерным обжатием, некорректной геометрией калибра, неоднородной температурой заготовки или неправильной начальной формой подката. С помощью QForm можно визуализировать течение металла в калибре, определить зоны переполнения, неоформления фланцев и складкообразования, а затем скорректировать технологию.



Рис.2. Распространенные проблемы в технологиях прокатки

Другой важной задачей является анализ захвата полосы валками, особенно при прокатке несимметричных профилей. В таких случаях возможно серпение и скручивание раската, что затрудняет вход полосы в следующий калибр. В QForm для анализа используются динамические сечения, позволяющие отслеживать движение характерных точек профиля и определять условия захвата. САПР Калибер, в свою очередь, позволяет предварительно оценить геометрию подката и скорректировать размеры сечения для обеспечения устойчивого захвата.

Не менее важным фактором является температурный режим. Температура заготовки и её изменение по длине полосы существенно влияют на сопротивление деформации, качество профиля и нагрузку на оборудование. Для достоверного моделирования необходимо учитывать реальные расстояния между клетями и технологические паузы. В QForm это может быть реализовано с помощью специальных боксов, позволяющих приблизить расчётную схему к реальным условиям стана.

Таким образом, совместное применение QForm и САПР Калибер обеспечивает комплексный подход к оптимизации технологий продольной прокатки. САПР Калибер используется для проектирования и предварительного анализа калибровки, а QForm - для детального моделирования процесса, выявления дефектов, оценки температурного режима, напряжений, захвата полосы и поведения металла в калибрах. Позволяет уменьшить нагрузку на оборудование и сократить время внедрения новых технологий в производство.

## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ОЦЕНКИ НЕОДНОРОДНОСТИ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДЛЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ

Постыляков А.Ю.<sup>1</sup>, Королева И.Э.<sup>2</sup>, Логинов Ю.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА», Верхняя Салда, Россия  
e-mail: a.i.postyliakov@urfu.ru

Метод конечных элементов зарекомендовал себя как эффективный инструмент исследования и совершенствования процессов обработки металлов давлением [1]. Хотя системы инженерного анализа позволяют определять характеристики НДС в любой точке заготовки, для установления влияния на него реализуемых технических решений, требуются обобщенные пространственные функции и интегральные показатели. Так в практике часто оперируют неоднородностью по различным признакам, в частности – по накопленным деформациям (effective strain).

Ранее в работе [2] было определено деформированное состояние трубы из титанового сплава Grade 9, формируемое при холодной прокатке. Рассмотрим распределение вышеуказанного показателя в некотором поперечном сечении после прямого хода. Видно наличие выраженной неоднородности в радиальном (по толщине стенки) и тангенциальном (периметру) направлении (рис. 1, а).

Выполнив сбор данных по замкнутым круговым траекториям для различной радиальной координаты в пределах толщины стенки, построим лепестковую диаграмму распределения компонент по периметру (рис. 1, б).

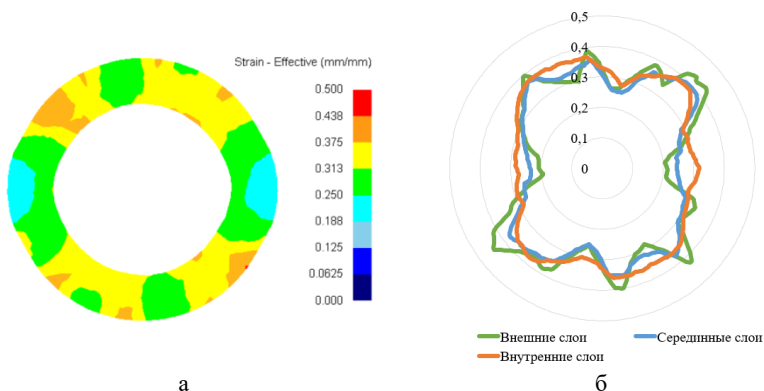


Рис. 1. Распределение степени деформации в поперечном сечении:  
а - цветовая эпора; б - круговая диаграмма

Для каждой из траекторий можно рассчитать среднее значение степени деформации ( $\langle \varepsilon_{ef} \rangle$ ), её стандартное отклонение  $\sigma_{ef}$  и коэффициент вариации  $cv_{ef}$ .

Последние два можно считать показателями неоднородности. Эти же характеристики можно получить и для сечения в целом, что позволяет отслеживать изменения при его продвижении по конусу деформации. Для рассматриваемого сечения они составляют 0,31, 0,047 и 15,04% соответственно.

Однако стоит учитывать, что при наличии значительной неоднородности в виде чередующихся зон с повышенной/пониженной степенью деформации усреднение может исказить картину распределения по толщине стенки. Такого рода неоднородность, с одной стороны, обусловлена устройством калибра, с другой – циклическим характером процесса ХПТ. В таком случае следует дополнительно разграничивать показатели по областям калибра: ручья и зазора с прилегающими выпусками. Полученные функции показаны на рис. 2.

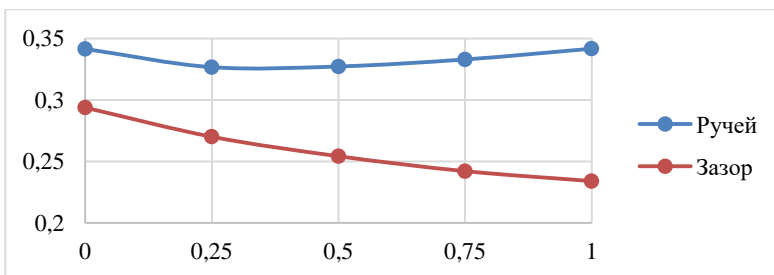


Рис. 2. Распределение средней степени деформации в относительной координате по толщине стенки (0 соответствует внутренней поверхности, 1 – внешней) для области ручья и зазора

Видно, что для части сечения, деформируемой ручьем характерны более высокие значения степени деформации, чем для области зазора. Также для них наблюдается обратный характер её распределения между внешней и внутренней поверхностью. Таким образом, для корректного описания неоднородности деформаций учитывать устройство рабочего инструмента и условия реализации процесса прокатки.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (тема № FEUZ-2026-0013)*

### Список литературы

1. Уманский А. А. Разработка и совершенствование режимов сортовой прокатки с использованием современных методик моделирования деформации заготовок в калибрах // *Металлургия: технологии, управление, инновации, качество: труды XVII Всероссийской научно-практической конференции.* – Новокузнецк, 2013. – С. 150 – 157.
2. Логинов Ю.Н. Деформации при холодной прокатке трубы из титанового сплава // *Титан.* – 2023. – № 1 (77). – С. 49 – 53.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОПРИВОДНОЙ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ ТОЛСТОГО ЛИСТА В РЕЛЬЕФНЫХ ВАЛКАХ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ВЫРАВНИВАНИЕМ

**Есболат А.Б., Крупенькин И.И., Панин Д.А., Панин Е.А.**  
*Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан*  
*e-mail: esbolat.a@mail.ru*

В работе [1] была исследована технология прокатки толстолистого металла, которая решила проблему получения высококачественного толстолистого металла без существенного изменения начальных размеров заготовки. Для этой цели были разработаны два варианта валков с рельефным профилем в виде кольцевых проточек. Было выявлено, что наиболее оптимальной конструкцией являются рельефные валки с неодинаковым отношением выступа к углублению. В работе [2] были представлены результаты исследований по совершенствованию технологии деформации толстолистных заготовок в рельефных валках. Учитывая, что асимметричная прокатка позволяет увеличить уровень деформации сдвига во время прокатки, в эту технологию был введен коэффициент асимметрии. Также в лабораторных условиях был реализован способ геометрической асимметрии с применением рельефных валков разного диаметра.

Данный способ оказался весьма эффективным в плане проработки металла по сечению, а также улучшению механических свойств алюминиевых и медных толстолистных заготовок [3]. При этом необходимо отметить, что оба наиболее распространенных способа реализации асимметричной прокатки (геометрический и кинематический) имеют свои технологические недостатки. Реализация геометрической асимметрии при прокатке широкого сортамента толстолистого проката требует изготовление целого парка валков различного диаметра. Также хочется отметить, что при геометрической асимметрии чаще всего невозможно добиться высокого значения коэффициента асимметрии по причине ограничения диапазона диаметров валков конструктивными габаритами станины. Реализация кинематической асимметрии не имеет явных ограничений коэффициента асимметрии и зависит от возможности регулирования скоростей электродвигателей. Однако для данного варианта асимметрии необходима кардинальная реконструкция прокатного стана путем обеспечения индивидуального привода валков с возможностью регулировки окружных скоростей каждого рабочего вала по отдельности.

Альтернативным решением данных недостатков может стать вариант прокатки с одним приводным валком [4], который позволит еще больше повысить технологичность процесса получения высококачественных металлоизделий в виде горячекатаного листа и толстых плит. В этом случае устраняются все перечисленные выше недостатки - наличие валков с разными диаметрами не является обязательным требованием для создания асимметрии, а их наличие будет благоприятным условием для усиления эффекта асимметрии. Наличие одного приводного вала с возможностью регулирования скорости вращения приводного вала позволит развивать более высокий коэффициент

асимметрии, поскольку второй валок является неприводным (холостым), который будет вращаться лишь от контакта с заготовкой за счет активных сил трения. В этом случае достаточно физически отсоединить один валок от системы привода, что не потребует существенной модернизации прокатного стана.

Поэтому предлагается следующая концепция нового способа асимметричной прокатки (рис. 1). Первый проход осуществляется в рельефных валках с фактором асимметрии (геометрическим или кинематическим). При этом лишь один из валков является приводным, второй валок является холостым и приводится во вращение за счет сил трения при контакте с движущейся заготовкой. После прокатки в рельефных валках заготовка подвергается операции выравнивания в гладких валках.

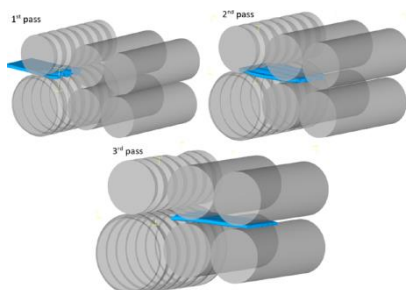


Рис. 1. Концепция нового способа асимметричной прокатки

*Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP26199255).*

### Список литературы

1. Alternating sign rolling technology in grooved rolls for nonferrous metal plate billets / Naizabekov A., Lezhnev S., Panin E., Mazur I. // Metallurgist. – 2017. – Vol. 61. – P. 406-413.
2. Improvement of the deformation technology in relief rolls by asymmetric rolling realization / Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Panin E.A., Tymchenko A.A., Esbolat A.B. // Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information. – 2021. – Vol. 77. – P. 445-454.
3. Effect of asymmetric rolling in relief rolls on the microstructure evolution and mechanical properties of aluminum and copper workpieces / Lezhnev S., Naizabekov A., Esbolat A., Rakovets A., Panin E., Kuis D., Tsyba P., Panin D., Kuzmin S. // Results in Engineering. – 2025. – Vol. 26. - 105195.
4. Baba W., Miyake M., Yanagimoto J. Warping behavior of thin strip with single-drive rolling // Key Engineering Materials. – 2017. - Vol. 725. - P. 537-541.

## АНИЗОТРОПИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИЗ СПЛАВА 1580, ПОЛУЧЕННОГО ПО ДВУМ РАЗЛИЧНЫМ СХЕМАМ ДЕФОРМАЦИИ

**Ворошилова М.В., Ворошилов Д.С., Беспалов В.М., Лопатина Е.С.**  
*Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия*  
*e-mail: MVoroshilova@sfu-kras.ru*

Выбор материала для изготовления конструкционных деталей является ключевым фактором, который влияет на надежность, долговечность и безопасность эксплуатации получаемого изделия. Таким образом, полуфабрикаты, предназначенные для изготовления деталей ответственного назначения в различных отраслях промышленности, в том числе в ракетно-космической отрасли, подвергают всестороннему исследованию.

В настоящее время большой интерес проявляется к сплавам системы Al-Mg-Sc, в частности к сплаву 1580, химический состав которого представлен в табл.1.

Таблица 1 – Химический состав сплава 1580

| Si   | Fe   | Cu  | Mg   | Mn   | Cr   | Zn  | Ti   | Zr  | Sc   | Прочие (сумма) | Al   |
|------|------|-----|------|------|------|-----|------|-----|------|----------------|------|
| 0,12 | 0,15 | 0,1 | 4,96 | 0,56 | 0,13 | 0,2 | 0,12 | 0,1 | 0,11 | 0,15           | ост. |

Проведенные лабораторные и промышленные исследования позволили выявить влияние химического состава сплава 1580 на размер зерна в слитке и определить механические свойства деформированных полуфабрикатов. По результатам физического и компьютерного моделирования процесса прокатки предложены рациональные режимы обработки [1].

Проблема анизотропии свойств сплавов системы Al-Mg-Sc является слабоизученной [2]. Как известно, создание в листах эффективной анизотропии свойств дает возможность обеспечить интенсификацию процессов формообразования заготовок и повышение эксплуатационных характеристик получаемых изделий [3].

В качестве материала для исследования выбран листовой холоднокатаный прокат из алюминиевого сплава 1580 толщиной от 6 до 1,2 мм. Изготовлены плоские образцы, направление продольной оси которых ориентировано под углом 0°, 45° и 90° относительно направления прокатки (рис. 1).

В ходе экспериментов проводилась прокатка по двум схемам: схема 1 – продольная односторонняя прокатка, схема 2 – реверсивная прокатка по трем равным направлениям.

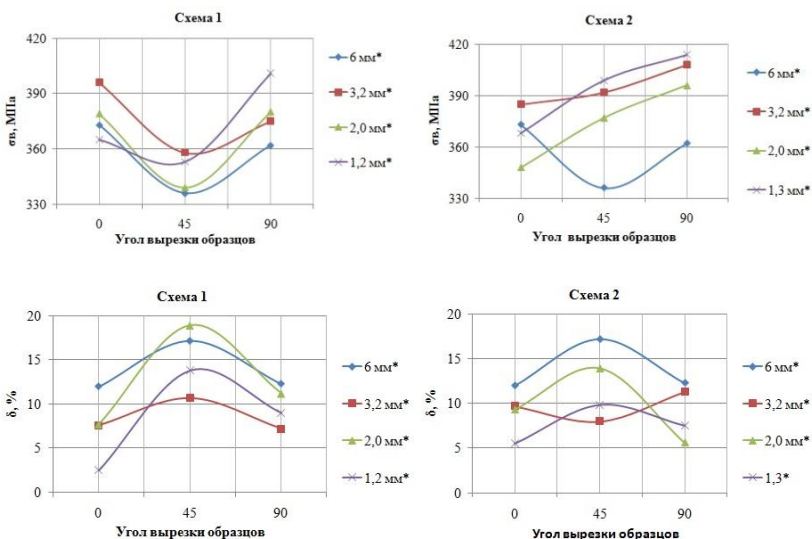


Рис. 1. Изменение прочностных и пластических свойств образцов из сплава 1580, прокатанных по двум схемам

Как видно из графиков, приведенных на рис. 1, при использовании схемы 2 наблюдается существенное увеличение временного сопротивления у всех образцов, вырезка которых осуществлялась под углом  $45^\circ$ . Необходимо отметить, что пластические свойства образцов сохраняются на достаточно высоком уровне.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-19-20014, <https://rscf.ru/project/26-19-20014/>, за счет целевого финансирования (гранта) Красноярского краевого фонда науки.*

### Список литературы

1. Investigation of rolling modes, structure and properties of aluminum-magnesium alloy plates with a reduced scandium content / Sidelnikov S.B., Baranov V.N., Konstantinov I.L., Zenkin E.Yu., Lopatina E.S., Bezrukikh A.I., Voroshilov D.S., Yuryev P.O., Mansurov Yu.N., Voroshilova M.V., Belokonova I.N., Galiev R.I. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2022. – Т. 121. № 1-2. – С. 1373–1384.
2. Исследование влияния степени обжатия при холодной прокатке и температуры окончательного отжига на свойства и микроструктуру листов из сплава системы Al-Mg-Sc / Гречников Ф.В., Ерисов Я.А., Сурудин С.В., Разживин В.А. // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2022. – Т. 28. № 4. – С. 75–83.
3. Гречников Ф. В. Деформирование анизотропных материалов: Резервы интенсификации: монография. – М.: Машиностроение, 1998. – 445 с.

## ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ПОДЪЕМ КОЛЬЦА ТИПА «ДИСК» ПРИ РАДИАЛЬНО-ОСЕВОЙ РАСКАТКЕ КОЛЕЦ

**Тарасов И.С., Мойсеев И.А., Михайлов А.Н.**

*ПАО «Корпорация ВСПО-АВИСМА», Верхняя Салда, Россия  
e-mail: i.s.trsv@ya.ru*

В процессе радиально-осевой раскатки колец типа «диск» наблюдается явление вертикального смещения кольца в радиальном калибре (рис. 1). Первичной причиной данной нестабильности является неоптимальная геометрия исходной кольцевой заготовки (рис. 2, а). В частности, при контакте верхнего осевого вала с торцом кольцевой заготовки и одновременном подпоре стенки кольца внутренним валком (дорном) возникает дисбаланс сил, приводящий к подъему участка заготовки, расположенного в радиальном калибре.

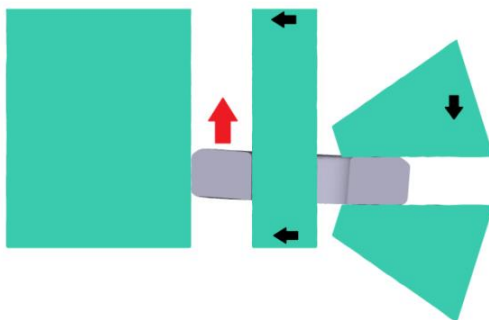


Рис. 1. Подъем кольца в радиальном калибре

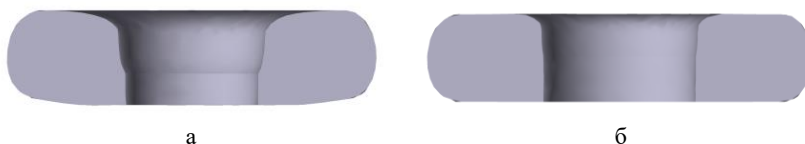


Рис. 2. Форма кольцевой заготовки: а - неоптимальная; б - оптимальная

Однако геометрический фактор не является исчерпывающим. Даже при использовании кольцевых заготовок с оптимальной формой (рис. 2, б) вертикальное смещение может быть обусловлено нерациональным режимом деформации. Анализ показывает, что применение линейного графика распределения обжатий с доминированием деформации по толщине стенки кольца на конечной фазе раскатки (рис. 3, а) провоцирует подъем кольца в радиальном калибре (рис. 4, а).

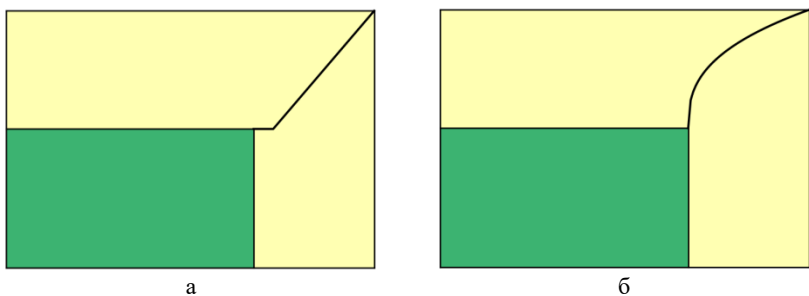


Рис. 3. Тип графика раскатки:  
 а – линейный график раскатки; б – нелинейный график раскатки

Для исключения данного дефекта целесообразно использовать нелинейный график режима раскатки с преимущественной деформацией по высоте кольца на конечной фазе (рис. 3, б). Реализация данной кинематической схемы обеспечивает лучшую стабильность положения заготовки в радиальном калибре и более благоприятное соотношение обжатий между радиальной и осевой клетью. Эффективность метода экспериментально верифицирована при раскатке кольца из титанового сплава ВТ6 на радиально-осевом стане (рис. 4, б), в результате вертикальный подъем кольца при раскатке отсутствует.

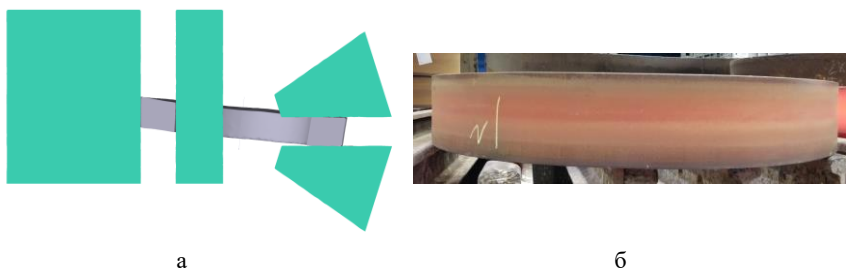


Рис. 4. Результаты экспериментов:  
 а – вертикальный подъем кольца при моделировании;  
 б – раскатанное кольцо без вертикального подъема

## **СЕКЦИЯ 3 – Инновационные технологии и материалы обработки металлов давлением**

---

УДК 621.771

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СОВМЕСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ И ПЛАКИРУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА В ПРОЦЕССЕ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ТОЛСТОЛИСТОВЫХ ВАКУУМНЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПАКЕТОВ**

**Борисенко Н.Р., Мунтин А.В.**

*ФГАОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана», Москва, Россия  
e-mail: BorisenkoNikita17@yandex.ru*

Перспективным направлением для отечественных производителей плакированной (биметаллической) продукции является освоение технологии производства листового проката, плакированного титаном, что обусловлено задачами импортозамещения и растущим спросом со стороны энергетического и нефтехимического машиностроения. В Российской Федерации одним из ключевых и уже освоенных применений является изготовление трубных досок (решеток) конденсаторов турбин генераторов атомных электростанций (АЭС), для которых преимущественно используется композиция 09Г2С + ВТ1-0 с размерами готового листа от 30 до 80 мм, шириной до 4100 мм и длиной до 6500 мм.

В условиях растущих мощностей прокатного оборудования метод пакетной прокатки постепенно становится основным способом массового производства крупногабаритных плакированных листов, в том числе и для таких ранее нестандартных для данного метода композиций, как сталь–титан [1]. На текущий момент в РФ данная композиция материалов указанным методом не производится, поэтому разработка технологии является актуальной научно-практической задачей. Помимо ограниченной взаимной растворимости стали и титана, значительная разница в механических свойствах при горячей прокатке может приводить к возникновению дефектов проката и высокой неравномерности толщины плакирующего слоя в готовом листе, а также риску перегрузки/повреждения оборудования. Закономерности совместной деформации при указанном методе производства остаются практически неизученными. Данная работа восполняет этот пробел, сочетая численное моделирование методом конечных элементов с лабораторными экспериментами.

В работе были определены реологические свойства конструкционной низколегированной стали 09Г2С и титана ВТ1-0. Разработана конечно-элементная 3D-модель процесса горячей пакетной прокатки и подтверждена по результатам физических экспериментов на лабораторном прокатном стане ДУО-300 (отклонение по энергосиловым и геометрическим параметрам  $\leq 10\%$ ). Применение конечно-элементного моделирования для исследования процесса прокатки плакированных листов широко описано в литературе [2]. Методика проведения физического эксперимента представлена на рис. 1.

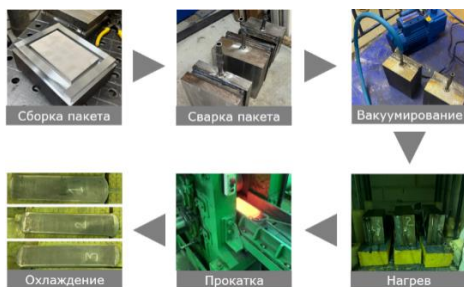


Рис. 1. Методика проведения физического эксперимента

Впервые для данной комбинации материалов количественно описан эффект интенсивного комбинированного перераспределения титана внутри пакета на начальных этапах прокатки (рис.2).

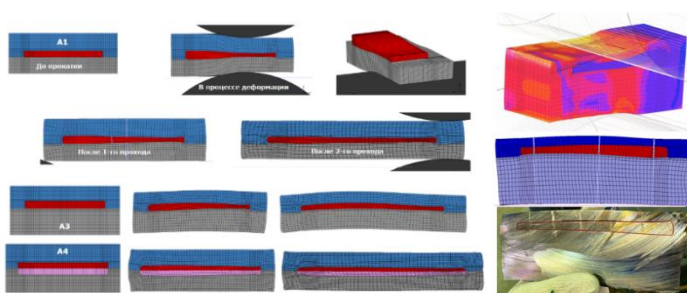


Рис. 2. Механизм перераспределения лакирующего слоя и геометрия проката

Данный эффект является основной причиной продольной разнотолщинности плакировки ( $\Delta$  до 125%) и неравномерности деформации ( $\theta$  от 0,32 до 0,96, где  $\theta < 1$  указывает на опережающее течение титана).

Установлено, что интенсивное перераспределение титана происходит во всех исследованных конструкциях пакетов, однако степень его выраженности варьируется. Полученные закономерности деформации будут использованы при разработке промышленной технологии производства крупногабаритных плакированных листов композиции «сталь–титан» широкого сортамента, а также для других комбинаций материалов.

### Список литературы

1. Manufacturing technology and application trends of titanium clad steel plates / Su H., Luo Xb., Chai F. et al. // Journal of Iron and Steel Research International. – 2015. – Vol. 22. – P. 977–982/ DOI: 10.1016/S1006-706X(15)30099-6.
2. Features of finite element modeling for hot rolling process of clad sheets and strips / A.G. Zinyagin, N.R. Borisenko, A.V. Munin, M.O. Kryuchkova // CIS Iron and Steel Review. - 2023. - Vol. 26. - P. 51–57.

## СОЗДАНИЕ НОВОЙ ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩЕЙ СТАЛИ КЛАССА ПРОЧНОСТИ СТ80 ДЛЯ ГНКТ С ПОВЫШЕННЫМИ ТРЕБОВАНИЯМИ К ХЛАДОСТОЙКОСТИ

Кузнецова А.С., Полецков П.П., Ефимова Ю.Ю., Алексеев Д.Ю.  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия  
e-mail: allakuznetsova.mgtu@mail.ru

Создание новых сталей для нефтегазового комплекса России, а именно сталей для гибких насосно-компрессорных труб (ГНКТ), отличающихся от зарубежных аналогов повышенной хладостойкостью, обусловлено не только высокой потребностью импортозамещения, а также необходимостью использования ГНКТ в труднодоступных районах Крайнего Севера и Арктики.

С учетом требований к элементному составу основного металла ГНКТ, регламентируемому нормативными документами ASTM A606 type 4, ASTM Guide 101, а также особенностей и принципов легирования низкоуглеродистых низколегированных сталей с повышенными требованиями к атмосферо- и хладостойкости определена концепция создания импортозамещающего материала.

Для стали класса прочности СТ80 по API Specification 5ST, характеризующейся следующими свойствами:  $\sigma_{в} \geq 610$  МПа,  $A50 \geq 20\%$ ,  $HRC \leq 22$  /  $HRB \leq 99$ , осуществлен выбор качественной базовой системы легирования C-Si-Mn, а также количественного содержания углерода, легирующих и микролегирующих добавок, мас. %, не более: 0,16C-0,50Si-1,00Mn-0,70Cr-0,80(Ni+Cu+Mo)-0,050(Nb+V+Ti), допустимых концентраций вредных примесей ( $S \leq 0,005\%$  и  $P \leq 0,013\%$ ).

Для эффективного управления свойствами рулонного проката проведены исследования фазово-структурных превращений при распаде переохлажденного аустенита, построена термокинетическая диаграмма стали оригинального химического состава [1]. В результате определены температурно-скоростные условия формирования мелкодисперсной структуры бейнита, обеспечивающей для стали Ст80 твердость в регламентируемом диапазоне (от 190 HV / 90 HRB до 240 HV / 99 HRB).

На основании полученных данных были разработаны и реализованы на реверсивном стане горячей прокатки ДУО-500, совмещенном с системой укоренного охлаждения, режимы термомеханической обработки опытной стали для ГНКТ [2]. По результатам контрольных механических испытаний в соответствии с ГОСТ 1497-84, ГОСТ 9454-78, ГОСТ 9013-59 получены первичные положительные результаты со следующей комбинацией свойств:  $\sigma_{т} = 583$  МПа,  $\sigma_{в} = 723$  МПа,  $A50 = 22,5\%$ ,  $95,5$  HRB,  $KCV-40 = 122$  Дж/см<sup>2</sup> и  $KCV-60 = 110$  Дж/см<sup>2</sup>.

На основе результатов исследований свойств нового материала для ГНКТ в зависимости от химического состава, термомеханических режимов обработки будет осуществлен выбор актуальных технологических решений, адаптированных непосредственно к условиям ведущих металлургических предприятий Челябинской области.

*Исследование выполнено в ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-20085 от 14.05.2025, а также средств Минобрнауки Челябинской области (Соглашение № 30-2025-002767 от 07.07.2025), <https://rscf.ru/project/25-29-20085/>.*

### **Список литературы**

1. Features of forming the structural and phase state of low-alloy steel for flexible tubing pipes depending on thermokinetic transformation conditions / Kuznetsova A.S., Poletskov P.P., Koptseva N.V. et. al. // CIS Iron and Steel Review. – 2025. – Vol. 30. – P. 41–45.
2. Features of the structure of rolled steel sheet of strength class Ст80 after different thermomechanical treatment regimes / Kuznetsova A.S., Poletskov P.P., Koptseva N.V. et. al. // Journal of Physics: Conference Series. – 2025. – T. 3127. – № 1. – P. 012011.

УДК 669.14:539.4

## **ФРАКТОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ С КРУПНОЗЕРНИСТОЙ И СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ В УСЛОВИЯХ РАСТЯЖЕНИЯ ПОСЛЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ЦИКЛИРОВАНИЯ**

**Перминова Ю.С., Белецкий Е.Н., Рыбальченко О.В., Добаткин С.В.**  
*ФГБУН «Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова  
Российской академии наук», Москва, Россия  
e-mail: shishakova89@mail.ru*

Металлы и сплавы с размером зерна менее 1 мкм представляют особый интерес благодаря своим уникальным физико-механическим свойствам [1 – 3]. Одним из методов получения такой структуры является раноканальное угловое прессование (РКУП). В таких материалах резко повышаются прочностные характеристики при сохранении достаточно высокой пластичности при комнатной температуре [3]. Изучение влияния циклического нагружения на механические и физические характеристики материалов такого рода важно как с практической, так и с научной точки зрения, и необходимо для оценки безопасного ресурса конструкций, эксплуатируемых в условиях воздействия переменных напряжений. Комплексное применение фрактографии и метода корреляции цифровых изображений (КЦИ) позволяет установить количественную взаимосвязь между механизмами разрушения, локализацией пластической деформации, структурным состоянием материала и изменением механических свойств после предварительного циклического нагружения.

Методами сканирующей электронной микроскопии и корреляции цифровых изображений изучены [4] особенности разрушения и локального деформационного поведения стали 20 с крупнозернистой (КЗ, средний размер зерна - 10 мкм) и субмикрокристаллической (СМК, 352 нм) структурой в условиях растяжения после предварительного циклического нагружения. Установлено, что в образцах с СМК-структурой предварительное циклирование приводит к формированию внутренних очагов усталостного разрушения на

расслоениях, образованных в процессе равноканального углового прессования. На поверхностях расслоений выявлен периодический микрорельеф, характерный для усталостного роста трещины. Методом КЦИ показано, что пластическая зона в СМК-состоянии формируется в виде наклоненной к оси нагружения полосы, а ее площадь существенно меньше, чем в КЗ-состоянии. Предварительное циклирование приводит к уменьшению площади пластических зон в КЗ-структуре, но не оказывает значительного влияния на изменения площади зон стали в СМК-состоянии. Выявлена корреляция между фрактографическими признаками, изменениями механических свойств и характером локализации пластической деформации.

### Список литературы

1. Особенности структурообразования в стали 20 при равноканальном угловом прессовании и последующем нагреве / Добаткин С.В., Одесский П.Д., Рааб Г.И., Тютин М.Р., Рыбальченко О.В. // *Металлы*. – 2016. - № 6. - С. 11 – 20.
2. Salishchev G.A., Valiakhmetov O.R., Galeyev R.M. Formation of submicrocrystalline structure in the titanium alloy VT8 and its influence on mechanical properties // *J. Mater. Sci. Kluwer Academic Publishers*. - 1993. - V. 28. No. 11. - P. 2898 – 2902. DOI: 10.1007/BF00354692.
3. Superplastic-like behavior at high strain rates in mechanically alloyed aluminum / Bieler T.R., Nieh T.G., Wadsworth J., Mukherjee A.K. // *Scr. Metall.* - 1988. - V. 22. - No. 1. - P. 81 – 86. DOI: 10.1016/S0036-9748(88)80310-7.
4. Кинетика поврежденности предварительно циклированной малоуглеродистой стали с крупнозернистой и субмикроструктурной структурой / Ботвина Л. Р., Тютин М. Р., Синев И. О., Болотников А. И., Левин В. П., Белецкий Е. Н., Перминова Ю. С., Рыбальченко О. В., Добаткин С. В. // *Физика и химия обработки материалов*. – 2022. - №4. – С. 54–65. DOI: 10.30791/0015-3214-2022-4-54-65.

УДК 621.774.36

## ИЗМЕНЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПРОКАТКИ С ЦЕЛЬЮ УМЕНЬШЕНИЯ ОСЕВЫХ УСИЛИЙ НА СТАНЕ ХПТ

Нухов Д.Ш.<sup>1</sup>, Орлов Г.А.<sup>1</sup>, Березин И.М.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия  
<sup>2</sup> ООО «Гайд Системс», Екатеринбург, Россия  
e-mail: d.s.nukhov@urfu.ru

При холодной периодической прокатке (ХПТ) различают катающий радиус калибра, который является принудительным, так как определяется радиусом ведущей шестерни  $R_{ш}$  [1]. Естественный катающий радиус (тот, который создавался, если бы клеть была неподвижна) меняется вдоль рабочего конуса, так как радиус калибра изменяется в соответствии с принятой калибровкой инструмента [2]. Из-за разницы принудительного и естественного катающих радиусов возникают осевые усилия. Значительные осевые могут быть причиной

потери устойчивости процесса – образования «гармошки» [3]. Кроме того, вследствие действия осевых сил на торцах заготовок возникают осевые напряжения, которые могут достигать предела текучести материала, что будет причиной смятия торцов или стыковки труб [3]. Действия осевых усилий при ХПТ нельзя полностью исключить, их можно лишь оптимизировать – подбором радиуса ведущей шестерни  $R_{ш}$  или радиусом бочки калибра  $R_{б.к}$  (радиусом калибра по реборде) [1, 2].

В работе был произведён расчет калибровки ручья калибров и оправки стана ХПТ-2-55 для прокатки труб по маршруту  $\text{Ø}65 \times 4\text{-}\text{Ø}49,9 \times 1,91$  мм из алюминиевого сплава Д16. В качестве базовой методики расчета калибровки инструмента ХПТ была применена методика МИСИС [4]. Полученные исходные данные расчета калибровки инструмента, материал трубы, характеристики стана, а также режим прокатки легли в основу решения задачи поиска оптимальных величин  $R_{ш}$  и  $R_{б.к}$  с целью уменьшения осевых усилий в процессе прокатки на стане ХПТ 2-55. Осевое усилие в  $i$ -м мгновенном очаге деформации при двухвалковой прокатке будет определяться разностью сил трения в зонах опережения и отставания. Допуская равномерный характер распределения напряжения трения  $\tau$  на контактной поверхности и применив закон трения по Кулону –  $\tau = f \cdot p$ , осевое усилие можно получить по выражению [3]

$$Q_i = 2 \cdot f \cdot p_i \cdot (F_{оти} - F_{опi}), \quad (1)$$

где  $f = 0,08$  – коэффициент трения;  $p_i$  – давление металла на валки;  $F_{оти}, F_{опi}$  – площади зон отставания и опережения. По действующим характеристикам на этом стане приняты  $R_{ш} = 154$  мм и  $R_{б.к} = 168$  мм соответственно. Результат расчета осевых усилий по формуле (1) для этих значений представлен на рис.1

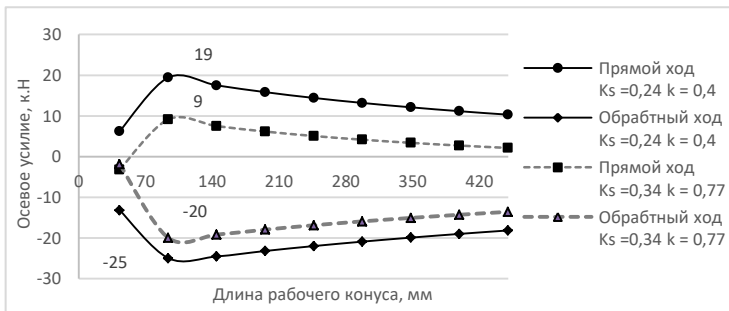


Рис.1. Распределение осевых усилий  $Q_i$  по длине рабочего конуса

Для определения оптимальных значений  $R_{ш}$  и  $R_{б.к}$  можно применить методику SKW (фирмы «Mannesman Demag Meer») зависимости коэффициента скольжения

$$K_s = \frac{2(R_{б.к} - R_{ш})}{0,45(D_3 + D_T)}, \quad (2)$$

где  $D_3$  и  $D_T$  – наружный диаметр заготовки и трубы соответственно. По этой методике  $K_s$  должен находиться в пределах 0,7-0,9.

Также известны зависимости для определения  $R_{ш}$

$$2R_{ш} = 2R_{б.к} - k(D_3 + D_T), \quad (3)$$

где  $k$  – эмпирический коэффициент, принимающий значения в пределах 0,35-0,5.

Если применить зависимости (2) и (3), то для принятых  $R_{и} = 154$  мм и  $R_{б,к} = 168$  мм значения  $K_s$  и  $k$  будут составлять 0,54 и 0,24 соответственно. И если оптимизировать значения  $R_{и}$  и  $R_{б,к}$  до получения значений  $K_s = 0,35$  и  $k = 0,77$  соответственно. При этих значениях максимальное осевое усилие при прямом ходе уменьшается более чем в 2 раза, а при обратном ходе (по модулю) – в 1,25 раза (см. рис.1). Для этих значений  $R_{б,к} = 174$  мм, при том же значении  $R_{и} = 154$  мм.

### Список литературы

1. Теоретические основы холодной пильгерной прокатки труб / под ред. С. В. Пилюпенко. – Новополюцк: Полоц. гос. ун-т имени Евфросинии Полоцкой, 2022. – 288 с.
2. Григоренко В.У., Пилюпенко С.В. Расчет оптимального соотношения ради усов калибра и валька станов холодной прокатки труб // Сталь. – 2012. – № 8. – С. 37–39.
3. Чечулин Ю.Б., Кондратов Л.А., Орлов Г.А. Холодная прокатка труб: учебное пособие. - М.: Металлургияздат, 2017. - 332 с.
4. Шевакин Ю. Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб. - М.: Металлургияздат, 1963. - 269 с.

УДК 669.5: 539.4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ СТРУКТУРЫ, МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЦИНКОВОГО СПЛАВА Zn-4%Ag-1%Cu В РЕЗУЛЬТАТЕ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ

Поленок М.В.<sup>1</sup>, Хафизова Э.Д.<sup>1,2</sup>, Исламгалиев Р.К.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

<sup>2</sup>Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН), Москва, Россия  
e-mail: renaweivei.179@mail.ru

Создание биосовместимых материалов для имплантатов медицинского назначения, включая биоразлагаемые костные пластины и сосудистые стенты, остаётся важной задачей перед современной наукой [1, 2]. Такие материалы должны отвечать комплексу строгих требований: обеспечивать контролируруемую (подходящую) скорость биодеградации, соответствовать критериям биосовместимости (включая продукты коррозии), обладать достаточной прочностью и необходимой пластичностью [3-5].

Метод равноканального углового прессования (РКУП) зарекомендовал себя в качестве эффективного инструмента модификации микроструктуры и повышения механических свойств цинковых сплавов. В рамках настоящего исследования оценивалось воздействие РКУП на механические и коррозионные характеристики цинкового сплава системы Zn-4%Ag-1%Cu. Скорость коррозии анализировали гравиметрическим методом, реализованным в двух вариантах: непрерывной выдержки образцов в растворе Рингера продолжительностью до 80 суток и

прерывистой выдержки с периодической очисткой поверхности от продуктов коррозии.

Сравнительное изучение микроструктуры и механических свойств показало, что после РКУП-обработки при температуре 150°C происходят существенные структурно-фазовые превращения. В отличие от исходных крупнозернистых (КЗ) образцов, в материале формируется ультрамелкозернистая (УМЗ) структура с размером зёрен около 1 мкм, в которой равномерно распределены частицы вторичных фаз  $\text{AgZn}_3$ .

Деформационная обработка обеспечила заметное улучшение механических показателей: предел текучести достиг  $275 \pm 10$  МПа, предел прочности –  $350 \pm 15$  МПа, а относительное удлинение составило  $28 \pm 2\%$ , что свидетельствует о сохранении высокой пластичности [6]. Подобное улучшение обусловлено совокупным действием зернограничного, дисперсионного и дислокационного механизмов упрочнения.

Результаты коррозионных испытаний в растворе Рингера подтвердили зависимость скорости коррозионного разрушения от структурного состояния материала и режима выдержки. При прерывистой (циклической) выдержке скорость коррозии УМЗ-образцов, полученных методом РКУП, оказалась в 2,6 раза выше, чем у КЗ-аналогов. Этот эффект связан с повышенной плотностью границ зёрен и структурных дефектов, которые активизируют анодные участки поверхности. В то же время при непрерывной выдержке на поверхности образцов формируется плотная оксидная плёнка, благодаря чему скорость растворения металла оказывается в два раза ниже, чем в прерывистом режиме.

Таким образом, результаты проведённого исследования показывают, что обработка методом РКУП позволяет обеспечить оптимальное сочетание механических и коррозионных свойств цинкового сплава  $\text{Zn-4\%Ag-1\%Cu}$ , что открывает перспективы использования данного материала при разработке биосовместимых биорезорбируемых медицинских имплантатов.

### Список литературы

1. Biomed. Mater. rel. В Appendix / D. Pearson, J. Edik, A. Tauscher, E. Pokorny, P. Bowen, J. Goldman. J. // *Biomaterial.* – 2012. – V. 100B, – Iss. 1. – P. 58-67.
2. J. Pinc. Microstructure evolution and mechanical performance of ternary  $\text{Zn-0.8Mg-0.2Sr}$  (wt. %) alloy processed by equal-channel angular pressing // *Mat. Sci. and Eng. A.* – 2021. - 824. – DOI: 10.1016/j.msea.2021.141809.
3. Heliyon / F. Ahadi, M. Azadi, M. Biglari, M. Bodaghi, A. Khaleghian. - 2023. - V. 9(2). - 13575.
4. Comparative in vitro Study on Pure Metals (Fe, Mn, Mg, Zn and W) as Biodegradable Metals / J. Cheng etc. // *J. Mater. Sci. Technol.* – 2007/ – V. 29/ – P. 619–627. DOI: 10.1016/j.jmst.2013.03.019.
5. Структура и механические свойства цинкового сплава  $\text{Zn-Ag-Cu}$  после интенсивной пластической деформации кручением / Хафизова Э., Исламгалиев Р., Фахретдинова Э., Йылмазэр Х., Поленок М. / *Materials. Technologies. Design.* – 2022. – Т. 4. - № 3(9). – С. 66-72.
6. E. Khafizova, E. Fakhretdinova, R. Islamgaliev. Effect of plastic deformation on the structure and mechanical properties of the  $\text{Zn-4Ag-1Cu}$  Zinc alloy // *Materials.* – 2023. – Vol. 16. - No. 13. – P. 4646

## ТЕХНОЛОГИЯ И ПРОЦЕСС ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛЫХ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ЖИДКОГО СВИНЦОВОГО СПЛАВА

**Чуклин Е.В., Стулов В.В.**

*ФГАОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана», Москва, Россия  
e-mail: chuklin\_02@mail.ru*

В работе рассматривается технология и процесс получения полых непрерывнолитых деформированных заготовок из жидкого металла. В результате высвобождается необходимость выполнения последующих технологических операций, таких как прошивка цилиндрической заготовки в гильзу и дальнейшая ее раскатка в трубу, присущих традиционным технологиям для получения бесшовных горячекатаных труб.

С целью выполнения этого описывается технологический процесс получения полых непрерывнолитых свинцовых заготовок с дальнейшей возможностью его модернизации для получения заготовок из стали. В работе рассматривается традиционный вариант установки с устройством, приводимым в действие посредством асинхронного электродвигателя, а также цилиндрического двухступенчатого редуктора с дополнительной тихоходной ступенью и сочетанием шлицевых эксцентриковых валов и втулок с различным эксцентриситетом для каждой пары стенок. На рис. 1 изображено конструктивное исполнение установки совмещения литья и пластической деформации для получения свинцовых труб 98x9 мм на электроприводе стенок.

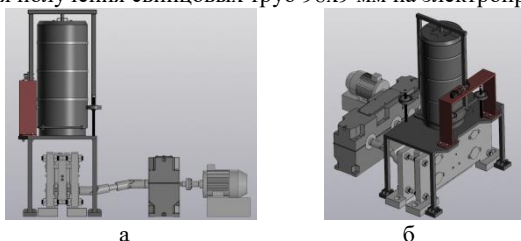


Рис. 1. Конструктивное исполнение установки совмещения литья и пластической деформации для получения свинцовых труб 98x9 мм на электроприводе стенок:  
а - главный вид; б - изометрический вид

Однако эксплуатация устройства с таким типом привода вызывает ряд затруднений, связанных с необходимостью настройки и обслуживания этого устройства. В частности, при перегрузке есть вероятность среза эвольвентных шлицев эксцентриковых валов и втулок, соответственно, выхода их строя, также при перегрузках могут изгибаться сами приводные валы, что сказывается на плавности и точности работы механизма, что, в свою очередь, может негативно сказываться на точности получаемых заготовок. Помимо выше перечисленного, устройство с электроприводом нуждается в постоянной точной регулировке кинематических параметров процесса, таких как скорость и частота вращения

вала электродвигателя для необходимой точности, скорости схождения и расхождения стенок.

Поэтому в работе также рассматривается возможность получения непрерывнолитых деформированных заготовок в устройстве с гидроприводом стенок. Конструктивное исполнение этого устройства описано в патенте [2]. В устройстве на гидроприводе принцип работы сильно отличается, чем на устройстве с электроприводом.

В случае устройства совмещения литья и пластической деформации с электроприводом наклонные стенки и вертикальные стенки приводятся в действие от одних и тех же приводных валов, которые вставлены в эксцентриковые втулки наклонных стенок и в эксцентриковые втулки вертикальных стенок. Преобразование вращательного движения эксцентриков для вертикальных стенок в их возвратно-поступательное движение происходит за счет кривошипного механизма. Вертикальные стенки и дорн совершают возвратно-поступательное движение. Сами вертикальные стенки нужны для того, чтобы проталкивать заготовку вниз, совершая движение подачи. Наклонные стенки обжимают заготовку. Они вместе с валом совершают вращательное движение.

В случае устройства совмещения литья и пластической деформации с гидроприводом движение пар наклонных и вертикальных стенок реализовано отдельно, что позволяет более точно управлять их перемещением, вследствие этого получается повысить качество полученных изделий. Немаловажным достоинством устройства на гидроприводе является его компактность и технологичность, такое устройство проще и дешевле как в изготовлении, так и в эксплуатации.

В среде QForm было выполнено моделирование процесса деформации с некоторым допущением. Комплекс QForm не предполагает наличия жидкой фазы, в связи с этим моделирование процесса пластической деформации осуществлялось непосредственно с этапа формирования так называемой застывшей корочки, геометрические параметры которой были определены численно и графически. Была получена наглядная кинематика движения стенок и заготовки, а также были проведены расчёты энергосиловых параметров процесса деформации.

### Список литературы

1. Одинокое В.И., Стулов В.В. Литейно-ковочный модуль (литье и деформация). - Владивосток: Дальнаука, 1998. – 150 с.
2. Патент РФ № 2749012. Устройство для получения непрерывнолитых заготовок / В.В. Стулов. Заявка на выдачу патента РФ № 2019100043 от 09.01.2019. Опубл.02.06.2021. Бюл. № 16.
3. Стулов В.В., Одинокое В.И. Специальные виды литья. Получение заготовок на литейно-ковочном модуле: учебное пособие. - Комсомольск – на – Амуре: Комсомольский – на – Амуре гос. техн. ун-т., 1998. – 68 с.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ МАГНИЯ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ СЖАТИИ

**Комкова Д.А., Волков А.Ю., Таланцев Е.Ф.**

*Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,*

*Екатеринбург, Россия*

*e-mail: komkova\_d@imp.uran.ru*

Поведение магния (Mg) при экстремальных давлениях представляет значительный интерес для фундаментальной науки [1]. В то время как методы интенсивной пластической деформации (ИПД) позволяют получать структуры с размером зерен 100-300 нм [2, 3], эволюция микроструктуры при давлениях выше 100 ГПа практически не изучена. Применение динамического сжатия в алмазных наковальнях с использованием мощных лазеров (или «fast-ramp compression») [4] позволяет достигать терапаскальных давлений, однако прямое наблюдение структуры материала в таких условиях невозможно. Вследствие этого остается неясным, как изменяются размер кристаллитов и микронапряжения при сверхбыстрой динамической деформации.

В данной работе впервые сделан шаг к определению эволюции структуры магния при сверхвысоких давлениях. Для этого к данным рентгеновской дифракции, полученным в экспериментах Гормана и др. [1] при динамическом сжатии магния при давлениях 309, 409, 563 и 959 ГПа, применён анализ Вильямсона-Холла. Профили рентгеновских пиков аппроксимировали функцией Гаусса для расчёта их интегральной ширины. Инструментальное уширение учитывалось по функции Кальоти Паолетти Риччи [5], что позволило определить верхний предел измерения размера кристаллитов в 12 нм. Для разделения вклада размера кристаллитов ( $D$ ) и микронапряжений ( $\epsilon$ ) применялось уравнение Вильямсона-Холла [6]:

$$\beta_s(2\theta) = \frac{K * \lambda_{XRD}}{D * \cos\left(\frac{2\theta}{2}\right)} + 4 * \epsilon * \tan\left(\frac{2\theta}{2}\right),$$

где  $\beta_s$  – уширение пика, обусловленное только структурными параметрами образца;  $2\theta$  – угол дифракции;  $K$  – постоянная Шеррера (здесь 0,9);  $\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения (здесь 0,1209 нм) [1]. Результаты анализа приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты анализа

| Давление, ГПа | Размер $D$ , нм | Напряжения $\epsilon$ , % | $D$ при $\epsilon = 0$ , нм |
|---------------|-----------------|---------------------------|-----------------------------|
| 309           | 2,2 ± 0,7       | -1,1 ± 0,7                | -                           |
| 409           | 4,5 ± 3,0       | -0,3 ± 0,7                | 6,1 ± 0,8                   |
| 563           | 2,6 ± 0,5       | -0,4 ± 0,4                | 3,1 ± 0,1                   |
| 959           | >12             | 1,1 ± 0,2                 | -                           |

При 309 ГПа магний демонстрирует наноструктуру с  $D \sim 2$  нм и  $\varepsilon \sim -1,1$ . Отрицательный знак указывает на сжимающие деформации в решётке. При 409 и 563 ГПа погрешности измерения  $\varepsilon$  сравнимы с самими значениями, что позволяет принять  $\varepsilon = 0$ ; при этом размеры кристаллитов составляют  $\sim 6$  нм и  $\sim 3$  нм соответственно, а микронапряжения в решётке отсутствуют. Наиболее интересный результат получен при 959 ГПа: размер кристаллитов превышает предел разрешения метода ( $D > 12$  нм), а микронапряжения становятся положительными и достигают  $\varepsilon \sim 1,1\%$ .

Согласно [1] в условиях сверхбыстрого сжатия магний претерпевает несколько фазовых переходов: при 309 и 409 ГПа это bcc-фаза, при 563 ГПа – Fmmm-фаза, или орторомбическая искажённая fcc-фаза, и простая гексагональная, или sh-фаза, при 959 ГПа. При этом динамическое сжатие в алмазных наковальнях происходит за наносекунды и сопровождается нагревом до тысяч кельвинов. Экстремальные условия сжатия вызывают вынужденную подстройку кристаллической структуры, исключая диффузию. Из-за высокой скорости деформации решетка адаптируется с формированием высокой плотности дефектов на границах зерен и фаз, и высокая плотность зародышей новой фазы может сливаться, приводя к росту зерен.

Таким образом, в данном исследовании представлен микроструктурный анализ магния в условиях динамического сжатия с применением метода Вильямсона-Холла, что позволило получить первые сведения о влиянии экстремальных условий на эволюцию структуры магния.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН и при поддержке молодежного проекта ИФМ УрО РАН № 17-25 (рук. Комкова Д.А.).*

### Список литературы

1. Gorman M.G. et al. Experimental observation of open structures in elemental magnesium at terapascal pressures // Nat. Phys. –2022. –Vol. 18. – № 11. –P. 1307–1311.
2. Figueiredo R.B., Langdon T.G. Processing Magnesium and Its Alloys by High-Pressure Torsion: An Overview // Adv. Eng. Mater. –2018. –Vol. 21. –№ 1. –P. 1801039.
3. Figueiredo R.B. et al. Evidence for exceptional low temperature ductility in polycrystalline magnesium processed by severe plastic deformation // Acta Mater. – 2017. –Vol. 122. –P. 322–331.
4. Smith R.F. et al. Laser-driven ramp-compression experiments on the national ignition facility // Rev. Sci. Instrum. –2023. –Vol. 94. –№ 8. –P. 083003.
5. Caglioti G., Paoletti A., Ricci F.P. Choice of collimators for a crystal spectrometer for neutron diffraction // Nucl. Instruments. –1958. –Vol. 3. – № 4.
6. Williamson G., Hall W. X-ray line broadening from filed aluminium and wolfram // Acta Metall. –1953. –Vol. 1. –№ 1. –P. 22–31.

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТНОЙ АСИММЕТРИИ ВАЛКОВ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ НА МИКРОСТРУКТУРУ СТАЛИ 20

**Носов Л.В., Пустовойтов Д.О., Песин И.А.**  
*ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия*  
*e-mail: nosov.leopold@yandex.ru*

Горячая асимметричная прокатка – это современная технология обработки металлов, позволяющая получать прокат с повышенными механическими свойствами, особенно актуально для конструкционных сталей, таких как сталь 20. Основным принцип процесса заключается в создании дополнительных деформаций в виде сдвига, что, в свою очередь, существенно сказывается на общем комплексе механических свойств [1].

Такой вид термомодеформационной обработки значительно повышает предел прочности и предел текучести, при этом не снижая пластические свойства. Это достигается за счет комплексного воздействия на структуру стали, включающего измельчение зерна и воздействие на другие структурные составляющие.

Значительное повышение прочностных свойств с сохранением пластичности, а в некоторых случаях и даже их повышение, позволяет получать модифицированный горячекатаный листовый металл. Использование такого подката для дальнейшей холодной прокатки позволит получать совершенно новый продукт (например, такой как высокопрочная упаковочная лента) по сочетанию свойств без добавления дорогостоящих легирующих элементов и специальных термических обработок.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-31018, <https://rscf.ru/project/25-79-31018>.*

### Список литературы

1. FEM simulation of influence of asymmetric cold rolling on throughthickness strain gradient in low-carbon steel sheets / D. Pustovoytov [et al.] // 13th International Conference on Superplasticity in Advanced Materials ICSAM 2018: Abstracts. – St. Petersburg, 2018. – P. 79.

УДК 621.785

## ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ТРУБ ИЗ СУПЕРДУПЛЕКСНОЙ СТАЛИ

**Баркеева К.М.<sup>1</sup>, Беломестнов А.К.<sup>2</sup>, Космацкий Я.И.<sup>1</sup>, Фокин Н.В.<sup>1</sup>**  
<sup>1</sup>*ООО «Исследовательский центр ТМК», Челябинск, Россия*  
<sup>2</sup>*ПАО «ТМК», Москва, Россия*  
*e-mail: kseniya.barkeeva@tmk-group.com*

Истощение запасов традиционных видов нефти требует разработки новых технологий, оборудования и материалов для добычи нефти нетрадиционных

месторождений и нетрадиционной нефти (тяжелая, высоковязкая и сверхвязкая нефть и другие трудноизвлекаемые запасы – ТРИЗ).

Конструкции из дуплексной стали в той или иной степени внедрены во многих отраслях промышленности. Они широко используются в нефтегазовой, химической, судостроительной, энергетической, целлюлозно-бумажной, в горнодобывающей и строительной промышленности [1].

Анализ механических свойств различных типов нержавеющей сталей выявил, что аустенитно-ферритные (дуплексные) стали предлагают оптимальное сочетание характеристик. Они устраняют слабые стороны ферритных сталей, такие как низкая ударная вязкость и хладостойкость, при этом сохраняя высокую пластичность. Кроме того, дуплексные стали значительно превосходят аустенитные по прочности и демонстрируют вдвое больший предел текучести [2].

Вместе с тем непрерывно возрастает спрос на стали Супердуплекс [3], изготовление которых в условиях РФ не освоено, поскольку ранее применялась трубная продукция, импортируемая из ныне недружественных стран. Крайне важно осуществить эффективное импортозамещение и снизить зависимость внутреннего рынка от влияния зарубежных компаний, обеспечив тем самым экономическую безопасность.

В условиях отечественного трубного производства осуществлено освоение нового вида продукции – горячепрессованных и холоднодеформированных труб из стали Супердуплекс – 03X25H7AM4Ф (UNS 32750) с использованием российской трубной заготовки.

В рамках подготовки к опытно-промышленному производству горячепрессованных труб было проведено комплексное исследование трубной заготовки отечественного производства. Определены температурно-деформационные режимы прессования труб и получена опытная партия горячепрессованных труб размерами 73,0×9,53 мм, часть из которых является готовой продукцией. Вторая часть вышеуказанных горячепрессованных труб, являясь передельной, была использована в качестве исходной заготовки для производства опытной партии холоднокатанных труб размерами 33,4×4,55 и 15,16×1,23 мм.

Термообработка (отжиг) проходит на твердый раствор с последующим ускоренным охлаждением. В представленной работе установлены особенности режимов охлаждения после термической обработки, несоблюдение которых провоцирует рост интерметаллидной фазы ( $\sigma$ -фазы), что негативно сказывается на коррозионных свойствах.

Типовая микроструктура горячепрессованных и холоднодеформированных труб приведена на рис. 1.

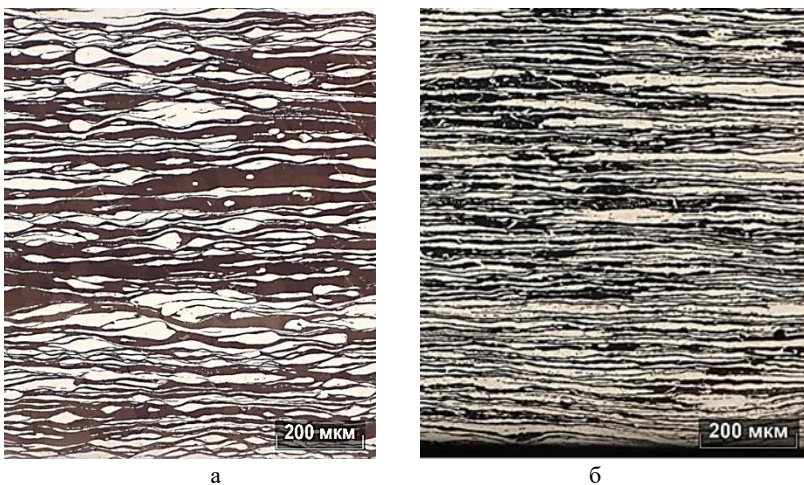


Рис. 1. Микроструктура труб:  
а - горячепрессованной; б - холоднореформированной

Достигнутые результаты работы позволили не только подтвердить техническую возможность производства труб из сталей Супердуплекс в условиях отечественного производства, обеспечив тем самым технологический суверенитет, но и повысили коммерческий интерес внутреннего потребителя.

#### Список литературы

1. Francis R., Byrne G. Duplex Stainless Steels—Alloys for the 21st Century // Metals. – 2021. – 11. – 836 р..
2. Седухин В.В. Совершенствование химического состава и технологии выплавки дуплексной марки стали, легированной азотом, в открытой индукционной печи : дис...канд. техн. наук 2.6.2 / Седухин Вадим Валерьевич. – Челябинск, 2022. – 125 с.
3. Основы металловедения и технологии производства труб из коррозионно-стойких сталей / Пумлянский Д.А., Пышминцев И.Ю., Выдрин А.В., Кузнецов В.И., Красиков А.В. – М.: Металлургиздат, 2023. – 682с.

**ПОВЫШЕНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ АНИЗОТРОПНЫХ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ В РАМКАХ ПРОИЗВОДСТВА  
ПАО «НЛМК» и ООО «ВИЗ-СТАЛЬ» МЕТОДОМ СДВОЕННОЙ  
ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ**

**Рыскунова К.А.**

*ИМАШ УрО РАН, ГАПОУ СО «Уральский политехнический колледж – МЦК»,  
ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
ИМЕТ УрО РАН, Екатеринбург, Россия  
e-mail: k.ryskunova@urpc.ru*

Производство анизотропной электротехнической стали осуществляется на ПАО «НЛМК» (г. Липецк), где реализуется полный металлургический цикл (выплавка, горячая прокатка), и на ООО «ВИЗ-Сталь» (г. Екатеринбург), где выполняются последующие операции холодной прокатки, термической обработки и нанесения покрытий, при этом каждый этап строго контролируется для достижения высокого качества конечного продукта [1, 2]. На этапе выплавки ключевым является достижение сверхнизких концентраций углерода (0,02-0,04%) и серы (менее 0,003 %). Легирование кремнием в диапазоне 3,0–3,5 % при этом необходимо для формирования превосходных магнитных характеристик [3]. Горячая прокатка осуществляется в строго определенных температурно-деформационных условиях: температура завершения прокатки поддерживается в пределах 1000–900 °С, а температура смотки – 500–600 °С. Такие параметры способствуют получению однородной структуры подката [4].

Холодная прокатка определяет формирование ребровой текстуры {110} <001> через накопление дефектов и энергии деформации, запускающей рекристаллизацию [2, 5]. При двухстадийной прокатке первая стадия (обжатие 50–65%) создаёт структуру для первичной рекристаллизации, вторая (55–70%) – для собирательной [6].

Обезуглероживающий отжиг (800–850 °С, в защитной атмосфере) снижает С до 0,003% [3, 7]. Высокотемпературный отжиг (1100–1200 °С, в атмосфере  $H_2+N_2$ , нагрев 10–30 °С/ч) вызывает выделение ингибиторов и вторичную рекристаллизацию с ростом крупных зёрен (до нескольких сантиметров) и текстурой Госса [1, 8].

Сдвоенная прокатка анизотропной электротехнической стали была применена с целью исследования влияния увеличения степени обжатия на второй стадии холодной прокатки, а также влияния конечной толщины на ферромагнитные свойства материала.

В рамках проведенного эксперимента успешно реализован процесс сдвоенной прокатки анизотропной электротехнической стали. Были получены пакеты с начальной суммарной толщиной 1,92 мм, которые после шести проходов на лабораторном стане были деформированы до 0,3 мм в сдвоенном виде (0,15 мм после разделения). Отсутствие таких дефектов, как трещины и разрывы, а также стабильность геометрических параметров образцов подтвердили технологическую применимость данного метода. После проведения высокотемпературного отжига были выполнены измерения магнитных свойств.

Результаты исследования показали, что прокатка до толщины 0,3 мм в двоярном состоянии улучшает магнитные свойства электротехнической стали, увеличивая ее магнитную проникаемость и снижая удельные магнитные потери. Однако при работе с более тонкими полосами в таком режиме возникает проблема нарушения вторичной рекристаллизации. Для ее решения предлагается изменить параметры высокотемпературного отжига, регулируя время выдержки, или провести вторую холодную прокатку с минимально возможной промежуточной толщиной.

Технология производства анизотропной электротехнической стали на ПАО «НЛМК» и ООО «ВИЗ-Сталь», основанная на методе двоярной холодной прокатки, позволит эффективно управлять формированием текстуры и достигать высоких магнитных показателей. Сочетание контролируемой пластической деформации и термической обработки обеспечивает создание совершенной реберной текстуры, что соответствует современным требованиям к трансформаторной стали.

### Список литературы

1. SU 790798 A1, МПК C21D 1/78. Способ изготовления электротехнической стали / Институт физики металлов Уральского научного центра АН СССР, Научно-исследовательский институт металлургии. – № 2824984/22-02; заявл. 01.10.1979; опубли. 30.01.1983.

2. Копылов И.П. Свойства электротехнической стали [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://masters.donntu.ru>. – 25.03.2026.

3. RU 2052515 C1, МПК C21D 8/12. Способ изготовления электротехнической стали / Лисин В.С., Скороходов В.Н., Настич В.П. и др. – № 5026070/02; заявл. 28.01.1992; опубли. 20.01.1996.

4. SU 1693081 A1, МПК C21C 7/06. Способ производства электротехнической стали / Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина, Новолипецкий металлургический комбинат им. Ю.В. Андропова. – № 4715266/02; заявл. 03.07.1989; опубли. 23.11.1991.

5. SU 1002368 A1, МПК C21C 7/00. Способ получения электротехнической стали / Новолипецкий ордена Ленина металлургический завод. – № 2979290/22-02; заявл. 01.09.1980; опубли. 07.03.1983.

6. RU 2048545 C1, МПК C21D 8/12. Способ производства электротехнической стали / Ковалевский В.С., Казаджан Л.Б., Шаршаков И.М. и др. – № 5026070/02; заявл. 28.01.1992; опубли. 20.11.1995.

7. RU 2427654 C1, МПК C21D 8/12. Способ производства изотропной электротехнической стали / Божков А.И., Чеглов А.Е., Дегтев С.С. и др. – № 2009143132/02; заявл. 23.11.2009; опубли. 27.08.2011.

8. SU 1749261 A1, МПК C21D 8/12. Способ производства электротехнической стали / Новолипецкий металлургический комбинат им. Ю.А. Андропова. – № 4872501/02; заявл. 10.10.1990; опубли. 23.07.1992.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КИНЕМАТИЧЕСКОГО ФАКТОРА АСИММЕТРИИ

**Бирюков М.А., Песин А.М., Бирюкова О.Д., Локотунина Н.М.**  
*ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова», Магнитогорск, Россия*  
*e-mail: Bigmax174@gmail.com*

Области применения нержавеющей проката характеризуются широким охватом: от реализации крупномасштабных проектов в строительной отрасли и энергетике до производства высокоточного оборудования для медицинской и электронной промышленности [1].

Внутреннее производство нержавеющей проката на территории Российской Федерации обеспечивает менее половины совокупного объема рыночных потребностей. Значительная доля оборудования, задействованного в отрасли, характеризуется высокой степенью физического износа, что создает препятствия как для повышения качественных показателей выпускаемой продукции, так и для удовлетворения растущих запросов потребителей. Усугубляющим фактором выступает фрагментарный подход к оснащению производственных мощностей, выражающийся в зависимости от разрозненных импортных единиц оборудования и их комплектующих [2].

Целью настоящей работы является изучение влияния различных режимов асимметричной прокатки на свойства нержавеющей сталей, а также определение актуальности рассматриваемых технических решений. Исследование проводилось на УНУ промышленно-лабораторном стане 400 асимметричной прокатки лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева МГТУ им. Г. И. Носова». Прокатка образцов из нержавеющей стали марки 20Х13 толщиной 5 мм осуществлялась по различным режимам, при температуре нагрева перед деформацией в пределах до 950 °С. Отношение скоростей рабочих валков варьировалось в диапазоне  $V_1/V_2 = 1-1,8$ . Проведена оценка механических свойств и микроструктуры полученных образцов.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-20026, <https://rscf.ru/project/24-19-20026/>*

### Список литературы

1. Совершенствование технологии производства нержавеющей стали марки 20Х13 на основе использования асимметричной прокатки / А. М. Песин, Д. О. Пустовойтов, К. Ю. Бревнов [и др.] // Современные проблемы электрометаллургии стали : материалы XIX Всероссийской конференции с международным участием, Челябинск, 10–12 сентября 2024 года. – Челябинск: Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), 2024. – С. 265-275.
2. Домашов В.А., Ларин В.Н. Комплекс холодной прокатки нержавеющей стали в ОАО «ЧМК». Потенциал для дальнейшего развития // Наука. Техника. Производство. – 2013. - №3. - С. 71-73.

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ КАК РЕЗУЛЬТАТ ОСВОЕНИЯ НОВЫХ ВИДОВ ПРОДУКЦИИ

Захаров С.Е.<sup>1</sup>, Фокин Н.В.<sup>1</sup>, Выдрин А.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ООО «Исследовательский центр ТМК», Челябинск, Россия

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», Челябинск, Россия

e-mail: se.zakharov@tmk-group.com

В докладе представлены результаты, полученные при анализе влияния термомеханических параметров на пластичность металлов и сплавов при горячей деформации. Известно, что на пластичность оказывают влияние такие факторы, как температура деформации, скорость деформации и показатель напряженного состояния. Однако многочисленные экспериментальные исследования показывают, что для некоторых, в основном, труднодеформируемых сталей и сплавов не менее значимо взаимное влияние вышеупомянутых параметров. Соответственно, предложена методика аппроксимации результатов исследования пластичности металлов и сплавов в горячем состоянии, учитывающая указанное совместное влияние факторов и позволяющая получать более достоверную информацию о пластических свойствах. Это подтверждено результатами исследования пластичности сложнлегированных хромсодержащих марок стали и труднодеформируемых сплавов. Новая методика аппроксимации экспериментальных данных позволяет более корректно определять критическую степень деформации при различных температурно-деформационных параметрах, что, в свою очередь, позволит повысить точность расчетных параметров технологических режимов, применяемых при изготовлении горячедеформированных изделий при минимизации вероятности образования несовершенств поверхности различного рода. Так, новая методика уже нашла применение и успешно опробована при создании новых и совершенствовании имеющихся технологий изготовления горячепрессованных труб в части разработки рациональных режимов прессования.

В настоящее время для определения предельных деформаций при обработке металлов давлением может быть использована феноменологическая теория разрушения, предложенная В.Л. Колмогоровым и развитая в работах его учеников и последователей [1-5]. Поскольку зависимость пластичности от схемы напряженного состояния, скорости и температуры деформации является одной из основ феноменологической теории разрушения, исследования пластичности при горячей обработке металлов давлением до недавнего времени носили частный и несистематизированный характер. Однако, в связи с тем, что в последнее время были созданы современные универсальные испытательные установки, такие, как например, термомеханический симулятор «Gleeble 3800» [6, 7], проблема в определении пластичности металлов и сплавов при горячей деформации в значительной степени была решена.

Предложена новая формула для расчета критической степени деформации, учитывающая влияние скорости деформации [8]. С целью оценки сходимости

расчетных значений и экспериментальных данных проведено сравнение по коэффициенту детерминации. Значения коэффициентов приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Значения коэффициента детерминации  $R^2$

| Материал           | Существующая формула | Предложенная формула |
|--------------------|----------------------|----------------------|
| 08X18H10T          | 0,956                | 0,984                |
| 06X17H5M1Б-Ш       | 0,911                | 0,914                |
| 07X12HMФБ          | 0,165                | 0,667                |
| 04X14T3P1Ф         | 0,41                 | 0,948                |
| XH55MBЦ            | 0,085                | 0,998                |
| Медианное значение | 0,410                | 0,948                |
| Среднее значение   | 0,505                | 0,902                |

### Список литературы

1. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение. – М: Металлургия, 1970. – 229 с.
2. Колмогоров В.Л., Богатов А.А., Мигачев Б.А. Пластичность и разрушение. – М.: Металлургия, 1977. – 337 с.
3. Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением – М.: Металлургия, 1984. – 144 с.
4. Богатов А.А. Механические свойства и модели разрушения металлов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002. – 329 с.
5. Толоконников Л. А. Механика деформируемого твердого тела: учебное пособие для вузов. — М.: Высшая школа, 1979. — С. 318.
6. Исследование пластичности хромистых сталей при прессовании труб / А.В. Выдрин, А.С. Жуков, Е.В. Храмков, В.Д. Николенко // Металловедение и термическая обработка металлов. - 2020. - № 1 (775). - С. 102-104.
7. Повышение трещиностойкости при прессовании труб из стали 08X13H4M1Ф/ А.В. Выдрин, А.С. Жуков, Д.Ю. Звонарев, М.А. Павлова // Черные металлы. - 2022. - № 7. - С. 53-57.
8. Выдрин А.В., Захаров С.Е., Фокин Н.В. Исследование взаимного влияния факторов на пластичность сталей и сплавов при горячей деформации // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. - 2026. - Т. 82. - № 12. - С. 49-55.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПОИСК ЭЛИНВАРНЫХ $\beta$ -ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СТАБИЛЬНОСТИ

Скирпичникова А.А.<sup>1</sup>, Баранова А.П.<sup>1</sup>, Базлов А.И.<sup>1</sup>, Маркова Г.В.<sup>2</sup>,  
Пермякова Д.В.<sup>2</sup>, Дубинский С.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,  
Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Тульский государственный университет, Тула, Россия  
e-mail: skirpichnikova@internet.ru*

Стабильные титановые  $\beta$ -сплавы привлекают внимание возможностью проявления элинварного эффекта – низкой температурной чувствительности модуля упругости. Впервые элинварный эффект описан Ш. Э. Гийомом в 1920 г. для сплавов Fe–Ni–Cr [1]. Элинварные сплавы применяют во многих областях в качестве упругих элементов приборов, работающих при повышенных температурах. Разработка немагнитных коррозионностойких материалов с таким поведением актуальна для микроэлектромеханических систем и приборов точного машиностроения [2, 3]. Цель работы – экспериментальный поиск сплавов с элинварным поведением в системах Ti–Nb–Zr, Ti–Nb и Ti–Mo и исследование стабильности их фазового состава.

Для исследования были выбраны сплавы (ат.%): Ti–22Nb–15Zr, Ti–40Nb, Ti–45Nb, Ti–50Nb, Ti–12,6Mo, Ti–15Mo, Ti–20Mo. Слитки получали из чистых металлов вакуумно-дуговой плавкой в лабораторной печи Arcast Arc 200 с нерасходуемым вольфрамовым электродом в атмосфере аргона. Термомеханическая обработка (рис. 1) включала: горячую прокатку в один проход на стане ДУО-210 с предварительным подогревом сплавов в печи СНОЛ-4 при 900 °С (сплавы Ti–Nb) и 1100 °С (сплавы Ti–Mo и Ti–Nb–Zr) с обжатием 25%; гомогенизационный отжиг в закалочной печи УПП-200 (1000 °С, 30 мин); холодную прокатку за 10 проходов на электромеханических стационарных вальцах Chinetti LM120 с обжатием 49%; последеформационный отжиг в печи УПП-200М (1000 °С, 30 мин). Для оценки элинварного поведения на обратном крутильном маятнике РКМ-ТулПИ определяли температурные зависимости квадрата резонансной частоты  $f_r^2$ , которые пропорциональны модулю упругости, в интервале от  $T_{\text{комн}}$  до 550 °С. На основе этих зависимостей проводили расчет температурного коэффициента модуля упругости (ТКМУ). Фазовый состав после термомеханической обработки изучали методом рентгеновской дифракции на дифрактометре ДРОН-4, кроме того, была исследована стабильность  $\beta$ -фазы после старения при 300 и 400 °С в течение 24 ч.

В результате термомеханической обработки во всех исследованных сплавах сформирована рекристаллизованная структура  $\beta$ -фазы со средним размером зерна от 22,6 до 68,1 мкм в зависимости от состава сплава. Экспериментально установлено, что сплавы Ti–22Nb–15Zr и Ti–40...50Nb проявляют элинварное поведение с ТКМУ порядка  $\sim 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Минимальное значение ТКМУ зафиксировано для состава Ti–40Nb:  $-2,84 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  - при нагреве и  $-1,76 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  - при охлаждении. В случае сплавов системы Ti–Mo значения ТКМУ оказываются на порядок выше ( $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ), что не позволяет отнести их к элинварным.

Рентгенофазовый анализ сплавов Ti-22Nb-15Zr и Ti-40...50Nb показал отсутствие выделений  $\omega$ - и  $\alpha$ -фаз после старения при 300 и 400 °С, что свидетельствует о высокой стабильности  $\beta$ -фазы. Это делает данные составы пригодными для длительной работы при повышенных температурах. Таким образом, сплав Ti-40Nb может быть рекомендован как перспективный немагнитный коррозионностойкий эливарный сплав.

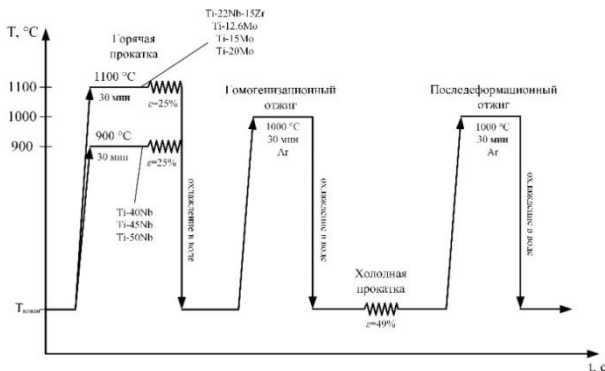


Рис. 1. Схема термомеханической обработки эливарных сплавов

*Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-73-10041.*

### Список литературы

1. Cahn R.W. An unusual nobel prize // Notes and Records of the Royal Society. – 2005. – Т. 59. – № 2. – С. 145–153.
2. Скуднов В.А., Харитонов С.В. Структура и физико-механические свойства эливарного сплава 44НХТЮ и технология изготовления упругого элемента цельного гироскопа из одной заготовки // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексева. – 2014. – № 3 (105). – С. 253-263.
3. Перспективные датчики параметров движения, основанные на инерции стоячих волн / Матвеев В.В., Хомячкова А.Н., Каликанов А.В., Стрельцов Д.С. // Приборы и Методы Измерений. – 2025. – № 16. – С. 294–305.

УДК 621.77

### ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ХОЛОДНОЙ И ГОРЯЧЕЙ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКЕ

**Барышникова А.М., Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Песин И.А.**  
 ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова», Магнитогорск, Россия  
 e-mail: anyabar1999@mail.ru

Асимметричная прокатка создает в очаге деформации поле интенсивных сдвиговых напряжений, распределенных по всему сечению заготовки, в отличие от классической схемы, где сдвиг локализован преимущественно в

поверхностных слоях [1]. Сдвиговая деформация при асимметричной прокатке выступает универсальным инструментом управления структурой: в холодном состоянии она обеспечивает формирование сдвиговых текстур и фрагментацию феррита, а в горячем - интенсифицирует рекристаллизацию, что в обоих случаях приводит к созданию мелкозернистой структуры. Так, при горячей прокатке низкоуглеродистых сталей 10, 20, 09Г2С по всему сечению заготовки формируется однородная мелкозернистая структура со средним размером зерна, не превышающим 3 мкм.

При холодной прокатке низкоуглеродистых сталей 08пс, 20, 08Ю с отношением скоростей рабочих валков равным 5 формируется ультрамелкозернистая градиентная структура с размером зерна, не превышающим 1 мкм (рис.1).

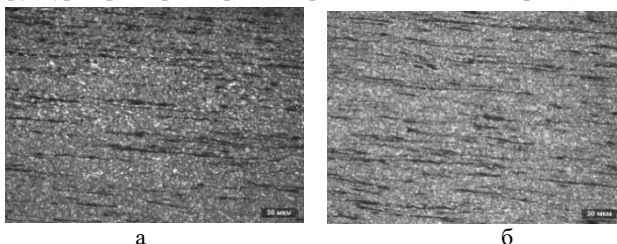


Рис. 1. Микроструктура стали 20 после асимметричной прокатки:  
а – поверхность образца; б – сердцевина образца

Асимметричная прокатка является эффективным инструментом управления структурой низкоуглеродистых сталей, позволяющим интенсифицировать процесс измельчения зерна за счет внедрения сдвиговой деформации в толщу металла и уменьшить энергозатраты за счет сокращения количества необходимых проходов для достижения требуемого уровня механических свойств по сравнению с симметричной прокаткой.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No. 25-79-31018, <https://rscf.ru/project/25-79-31018/>*

### Список литературы

1. Возможности стана 400 асимметричной прокатки и роботизированного комплекса Кука 160 / А. М. Песин, Д. О. Пустовойтов, М. П. Барышников [и др.] // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2021. – № 1(16). – С. 9-13.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА  
ГРУЗОНЕСУЩЕГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ  
ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОЙ ОЦИНКОВАННОЙ ПРОВОЛОКИ  
НА ДВУХКЛЕТЕВОЙ КАНАТОВЫЮЩЕЙ МАШИНЕ ПЛАНЕТАРНОГО  
ТИПА TPDL 18/315 + 24/315**

**Гордеенко Н.С.**

*ООО «Научно-производственный центр «Гальва»,  
Магнитогорск, Россия  
e-mail: gordeenko.ns@galva-mgn.ru*

Грузонесущий геофизический бронированный кабель – это кабель, предназначенный для спуска и подъема геофизических приборов и аппаратов, их питания электроэнергией и осуществления информационной связи между наземной аппаратурой и скважинными приборами при недропользовании и геофизических исследованиях скважин [1].

Для изготовления используемых в настоящее время геофизических кабелей строительной длиной до 7500 м используется проволока стальная канатная (ГОСТ 7372-79) с максимальным возможным показателем по временному сопротивлению разрыву 2160 Н/мм<sup>2</sup> [2, 3]. Для обслуживания горизонтальных участков морских скважин протяженностью до 15000 м стандартного геофизического кабеля недостаточно, необходимо использовать сверхвысокопрочный геофизический кабель с повивами брони, изготовленными из высокопрочной оцинкованной проволоки (ВСП более 2500 Н/мм<sup>2</sup>) (рис.1, табл. 1).



Рис. 1. Геофизический грузонесущий кабель марки КГК1х2,0-62-200

Таблица 1 – Конструктивные элементы

| Наименование элементов | Материал элементов конструкции                                                                |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Токопроводящая жила    | Медь мягкая (сечение 2,0 мм <sup>2</sup> )                                                    |
| Изоляция               | Фторопласт 4 МБ                                                                               |
| Экран                  | Проволока медная мягкая Ø 0,25 мм                                                             |
| Оболочка               | Фторопласт 40 М «Ш2»                                                                          |
| I - повив брони        | Проволока стальная оцинкованная высокопрочная<br>Ø 0,9 мм (ВСП более 2500 Н/мм <sup>2</sup> ) |
| II - повив брони       | Проволока стальная оцинкованная высокопрочная<br>Ø 0,9 мм (ВСП более 2500 Н/мм <sup>2</sup> ) |

Изготовление экспериментального образца кабеля выполнялось на двухклетевой канатовьющей машине планетарного типа TPDL 18/315 + 24/315.

По результатам исследования выявлено:

1. Увеличенное остаточное удлинение кабеля.
2. Увеличенный момент скручивания кабеля.
3. Склонность к образованию «фонарей».
4. Технологическое закручивание первого повива, приводящего к нарушению целостности экрана.

В связи с этим необходимо проведение модернизации канатовьющего оборудования для обеспечения производства сверхвысокопрочного геофизического кабеля.

### Список литературы

1. ГОСТ 31944-2012. Кабели грузонесущие геофизические бронированные. Общие технические условия. – Москва: Стандартинформ, 2014. - 19 с.
2. Руководящий документ РД 153-39.0-072-01. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах (введен в действие приказом Министерства энергетики РФ от 7 мая 2001 г. N 134).
3. ГОСТ 153-39.1-005-00. Кабели грузонесущие геофизические бронированные. Общие технические условия. – Москва: Минтопэнерго РФ, 2000. - 36 с.

УДК 621.77

## РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ И РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРОВОЛОКИ ИЗ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ А1-РЗМ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВМЕЩЕННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

**Ворошилов Д.С.**

*Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия  
e-mail: DVoroshilov@sfu-kras.ru*

В настоящее время разработка новых способов, а также технических и технологических решений для получения прутков и проволоки из сплавов системы А1-РЗМ максимально эффективными способами является актуальной задачей. Одни из распространенных направлений применения такой проволоки – это электротехническая проволока (сплавы Al-Ce-La) [1] и сварочная проволока для компонентов перспективных образцов техники (сплавы Al-Mg-Sc) [2].

Применение традиционных технологий обработки металлов давлением для получения данных полуфабрикатов подразумевает высокие энерго- и трудозатраты с потерями металла на переделах, достигающих 30% (табл. 1).

Таблица 1 – Методы получения прутков из алюминиевых сплавов

| Технико-экономические показатели (наименование и единицы измерения) | Аналоги                      |                               | Предлагаемый процесс |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------|
|                                                                     | Conform                      | Прессование                   |                      |
| Производительность, кг/час                                          | 1620 (90%)                   | 600 (33,3%)                   | 1800 (100%)          |
| Потребляемая мощность, кВт                                          | 200 (400%)                   | 500 (1000%)                   | 50 (100%)            |
| Обслуживающий персонал, чел.                                        | 2 (100%)                     | 3 (150%)                      | 2 (100%)             |
| Выход годной продукции, %                                           | 95                           | 75 – 80                       | 95 – 98              |
| Ориентировочная стоимость оборудования, тыс. руб.                   | 20000 – 180000 (до 600% и >) | 50000 – 600000 (до 2000% и >) | 30 000 (100%)        |

Одним из способов решения этой проблемы является применение совмещенных методов обработки, таких как совмещенная прокатка-прессование (СПП) и совмещенное литье и прокатка-прессование (СЛиПП) [3].

В ходе многолетних научных изысканий был разработан и создан ряд технических и технологических решений, на которые были получены патенты РФ (№2847204, 2689460, 2792327, 2457914, 2724758, 2570684 (в том числе алюминиевый сплав)) (рис. 1). Эти разработки позволили спроектировать инструмент и изготовить высокоэффективные установки для совмещенной обработки алюминиевых сплавов. Применение данных решений позволяет снизить трудо- и энергозатраты на деформацию металла при способе СПП в среднем на 30-50%. Применение данных устройств и способов улучшает качество получаемых методом СПП профилей и обеспечивает рост выхода годного на 15-18% по сравнению с традиционными способами обработки.

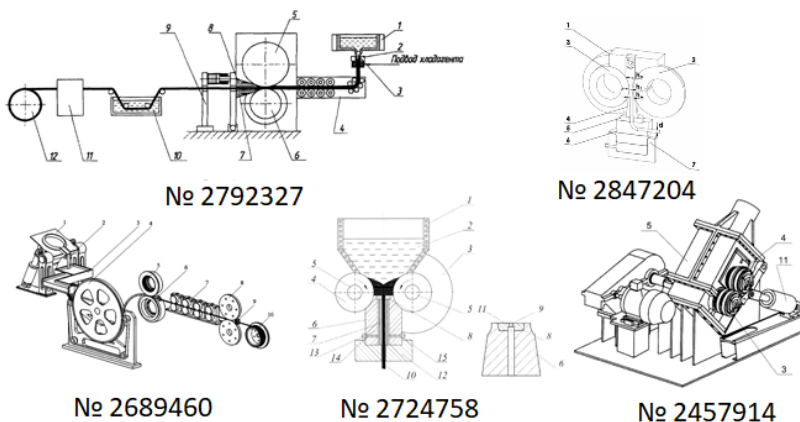


Рис. 1. Новые технические решения для совмещенной обработки алюминиевых сплавов

Также была открыта возможность получения деформированных полуфабрикатов из заготовок круглого поперечного сечения малопластичных металлов и сплавов с высоким уровнем механических свойств.

*Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации Сибирскому федеральному университету (шифр темы FSRZ-2020-0013).*

### Список литературы

1. Voroshilov D.S. Characterization Properties and Structure for Wires from Al-Ce-La System Alloy Via the Method of Combined Rolling-Extrusion with a Single-Driven Roll // Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. – 2025. – Т. 23. № 1. – С. 44–53.
2. Development and research of technology for obtaining and properties of welding wire from Al-Mg-Sc alloys using combined methods of thermal deformation treatment / Sidelnikov S.B., Voroshilov D.S., Lopatina E.S., Yakiviyuk O.V., Konstantinov I.L., Mansurov Y.N., Orelkina T.A., Galiev R.I., Ber V.I., Belokonova I.N., Durnopyanov A.V. // International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. – 2024. – Т. 7. № 3. – С. 384–404.
3. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Загиров Н.Н. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов: монография. – М.: МАКС Пресс, 2005. – 344 с.

УДК 772.962

## ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗЛУЧЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

**Постыляков А.Ю.<sup>1</sup>, Кокшаров А.А.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА», Верхняя Салда, Россия  
e-mail: a.i.postyliakov@urfu.ru

В ходе предшествующих исследований [1, 2] были получены значения коэффициента излучения титановых сплавов при температурах их сортовой прокатки. Его величина во многом определяется строением оксидного слоя, формирующегося при нагреве и охлаждении в процессе деформационной обработки [3]. Поскольку состояние поверхности прокатываемой полосы изменяется, значения коэффициента излучения, измеренные на образцах, подвергнутых только нагреву, могут не соответствовать реальному процессу. При этом даже небольшая неточность в задании коэффициента излучения в приборах для бесконтактного измерения температуры приводит к значительной ошибке в получаемых результатах [4].

Для определения закономерности изменения коэффициента излучения при прокатке сплава Ti-6Al-4V от раската были отобраны образцы для маршрутов с разным числом проходов и суммарной вытяжкой. Измерения выполняли методом образцового материала, который наносили на образцы, добиваясь совпадения кажущейся температуры поверхности в области нанесения с истинной (рис.1). Перед выполнением измерений образцы подогревали в печи до температуры

примерно 50 °С. Рассматривается спектральный коэффициент излучения. Результаты измерений приведены в табл. 1.

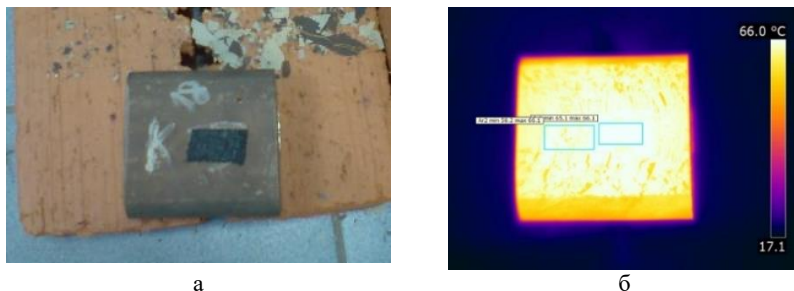


Рис. 1. Измерение коэффициента излучения поверхности на образце, прокатанного по 1-му маршруту:  
а – фото в видимом диапазоне; б – фото в ИК-диапазоне

Таблица 1 – Результирующие данные измерений

| Номер маршрута | Число проходов $n$ | Суммарная вытяжка $\lambda_{\Sigma}$ | Коэффициент излучения $\epsilon_{и}$ |
|----------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1              | 3                  | 1,60                                 | 0,87                                 |
| 2              | 5                  | 2,26                                 | 0,83                                 |
| 3              | 8                  | 4,00                                 | 0,8                                  |
| 4              | 10                 | 6,25                                 | 0,72                                 |
| 5              | 14                 | 11,60                                | 0,75                                 |

Из полученных данных следует, что коэффициент излучения имеет тенденцию к уменьшению по ходу прокатки. Его максимальное значение составляет 0,87, что фактически равно полученному для сильноокисленной поверхности после нагрева, а минимальное равно 0,72, что на 17% меньше. Полученные результаты можно объяснить постепенным замещением печной окалины – воздушной при их одновременном частичном разрушении и вкатывании в поверхность полосы при деформации. С увеличением количества выполненных проходов распределение вкатанной окалины становится более равномерным, при этом интенсивность её образования снижается из-за понижения температуры раската.

Полученные результаты могут быть использованы при выполнении измерений температуры бесконтактным методом, а также при математическом моделировании процесса в системах конечно-элементного анализа.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (тема № FEUZ-2026-0013)*

### Список литературы

1. Постыляков А.Ю., Шварц Д.Л., Михайленко А.М. Определение коэффициента излучения титановых сплавов ВТ1-0 и ВТ6 после нагрева при

повышенных температурах // Труды XII Конгресса прокатчиков. Выкса, 2019. – С. 242 – 246.

2. Постыляков А.Ю. Определение спектрального коэффициента излучения печной и воздушной окалины титанового сплава Ti-6Al-4V / А.Ю. Постыляков, В.А. Гольцев, А.А. Кокшаров, Д.Л. Шварц // *Металлург.* - 2025. - № 1. - С. 72 – 77.

3. Air oxidation behaviour of Ti-6Al-4V alloy between 650 and 850° / H.L. Du, P.K. Datta, D.B. Lewis, J.S. Burnell-Gray // *Corrosion Science.* - 1994. - V. 36. - Issue 4. - P. 631 – 642.

4. Прошкин С.С. К вопросу о точности измерения температуры с помощью тепловизора // *Вестник Международной академии холода.* - 2010. - № 1. - С. 51– 54.

УДК 669.717

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЖИМОВ ИСКУССТВЕННОГО СТАРЕНИЯ ГОРЯЧЕКАТАНЫХ ПЛИТ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 2014А

Завалий Е.А.<sup>1</sup>, Яковлев С.И.<sup>1</sup>, Глинских П.И.<sup>1</sup>, Замараева Ю.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод»,*

*Каменск-Уральский, Россия*

<sup>2</sup> *Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

*e-mail: ZavaliyEA@kumz.ru*

В настоящее время актуальным является совершенствование термической обработки плит из алюминиевых сплавов [1].

В работе представлен результат совершенствования искусственного старения плит из алюминиевого сплава 2014А толщиной 85 мм в состоянии поставки Т651 (закалка, правка растяжением), полученных в производственных условиях АО «КУМЗ» по серийной технологии. Последняя включает в себя отливку слитков, их гомогенизацию и горячую прокатку, термообработку плит на твердый раствор, их правку растяжением и искусственное старение. Дополнительно отметим преимущества сплава 2014А: высокая прочность и обрабатываемость, отличная свариваемость и термостойкость. Сплав характеризуется высокими технологическими свойствами при литье, а также при всех видах деформации. Изделия из сплава 2014А находят применение в гражданской авиации и автомобилестроении [2].

Фактический химический состав сплава исследуемых плит представлен в табл. 1 (показаны основные легирующие элементы). Диапазон значений данных легирующих элементов по нормативной документации (НД) [3] также представлен в табл. 1.

Таблица 1 – Химический состав сплава 2014А по нормативной документации и фактический (основные легирующие элементы)

| Содержание, % | Si      | Cu      | Mn      | Mg      |
|---------------|---------|---------|---------|---------|
| по НД         | 0,5-0,9 | 3,9-5,0 | 0,4-1,2 | 0,2-0,8 |
| по факту      | 0,54    | 3,96    | 0,72    | 0,38    |

Совершенствование режимов искусственного старения проходило в условиях центральной заводской лаборатории АО «КУМЗ», для чего от исследуемых плит

вырезаны темплеты. В рамках работы опробовано 5 режимов старения (табл. 2). Также в табл. 2 приведены данные по механическим свойствам образцов, состаренных по опытному режиму, и требуемые механические свойства по НД [4]. Дополнительно отметим, что механические свойства получены посредством испытаний на растяжение при комнатной температуре, а образцы для испытаний вырезаны в трех направлениях: продольном (L), поперечном (LT) и высотном (ST).

Таблица 2 – Опытные режимы старения и значения механических свойств образцов

| Температура нагрева, °С | Время выдержки, ч | Направление вырезки образцов | Временное сопротивление, МПа |      | Условный предел текучести, МПа |      | Относительное удлинение, МПа |      |
|-------------------------|-------------------|------------------------------|------------------------------|------|--------------------------------|------|------------------------------|------|
|                         |                   |                              | По НД                        | Факт | По НД                          | Факт | По НД                        | Факт |
| 155                     | 6                 | L, LT                        | 430                          | 420  | 400                            | 297  | 6                            | 17   |
|                         |                   | ST                           | 420                          | 370  | 360                            | 276  | 2,5                          | 7    |
| 160                     | 8                 | L, LT                        | 430                          | 426  | 400                            | 334  | 6                            | 14   |
|                         |                   | ST                           | 420                          | 368  | 360                            | 310  | 2,5                          | 4    |
| 165                     | 12                | L, LT                        | 430                          | 460  | 400                            | 408  | 6                            | 10   |
|                         |                   | ST                           | 420                          | 428  | 360                            | 380  | 2,5                          | 4    |
| 175                     | 8                 | L, LT                        | 430                          | 439  | 400                            | 391  | 6                            | 9,5  |
|                         |                   | ST                           | 420                          | 401  | 360                            | 378  | 2,5                          | 1,75 |
| 185                     | 3                 | L, LT                        | 430                          | 416  | 400                            | 361  | 6                            | 10   |
|                         |                   | ST                           | 420                          | 386  | 360                            | 333  | 2,5                          | 2,9  |

В результате анализа полученных данных определен режим старения, показавший удовлетворительные значения механических свойств (прочность наравне с достаточной пластичностью) во всех направлениях вырезки образцов – температура нагрева 165 °С, время выдержки 12 ч.

Полученные результаты работы могут быть использованы в серийном производстве плит из сплава 2014А.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.*

### Список литературы

1. Совершенствование технологии термической обработки плит из алюминиевого сплава 7475 / Завалий Е.А., Яковлев С.И., Цукров С.Л., Замараева Ю.В. // Технология легких сплавов. 2023. – № 2. – С. 40–45.
2. Перспективные высокопрочные материалы на алюминиевой основе / Фридляндер И.Н., Добромислов А.В., Ткаченко Е.А., Сенаторова О.Г. // Металловедение и термическая обработка металлов. - 2005. – № 7. – С. 17–23.
3. BS 2L 93:1971-08-31. Specification for plate of aluminium-copper-magnesium-silicon-manganese alloy (solution treated, controlled stretched and precipitation treated) (Cu 4.4, Mg 0.5, Si 0.7, Mn 0.8).

4. BS 5L 100:2011 + A1:2013. Procedure for inspection, testing and acceptance of wrought aluminium and aluminium alloys.

УДК 621.791.042.4

## **РАЗРАБОТКА ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ С ПОВЫШЕННЫМИ УДАРНО-ВЯЗКОСТНЫМИ СВОЙСТВАМИ ДЛЯ АРКТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ТЭК**

**Гулин А.Е., Кузнецова А.С., Емалеева Д.Г., Алексеев Д.Ю.**  
*ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия*  
*e-mail: ae.gulin@mail.ru*

Освоение арктических месторождений и обеспечение энергетической безопасности России требуют создания материалов для ответственных металлоконструкций, используемых в сложных климатических условиях. В отечественной практике для сварки таких конструкций широкое распространение получили электроды типа Э50А, отвечающие повышенным требованиям к характеристикам сварного соединения [1]. Однако существующие химические составы сварочной проволоки (сталь марки Св-08, Св-08А) не обеспечивают стабильно высоких значений ударной вязкости при низких температурах (до минус 60 °С). Это приводит к тому, что даже при использовании качественного покрытия электрода металл шва может иметь повышенный порог хладноломкости, что недопустимо для арктических условий эксплуатации, так как создает риски хрупкого разрушения сварных соединений трубопроводов, резервуаров и других объектов нефтегазовой инфраструктуры. При этом санкционное давление и ограничение доступа к передовым иностранным технологиям (Lincoln Electric, ESAB, Böhler) обостряют потребность в создании отечественных аналогов, превосходящих по ключевым показателям требования ГОСТ.

В связи с вышеизложенным учеными ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» выполняется проект, направленный на разработку и исследование новых импортозамещающих сварочных материалов, обеспечивающих высокий уровень свойств наплавленного металла при низких климатических температурах, в том числе:

- временное сопротивление разрыву: не менее 490 МПа;
- предел текучести: не менее 400 МПа;
- относительное удлинение: не менее 22 %;
- ударная вязкость:
  - при минус 40 °С: не менее 70 Дж/см<sup>2</sup>;
  - при минус 60 °С: не менее 50 Дж/см<sup>2</sup>.

К настоящему времени достигнуты следующие основные результаты:

- выполнен аналитический обзор перспективных химических составов, а также технологических принципов обеспечения высоких значений вязкопластических характеристик металла шва;
- предложены и научно обоснованы возможные варианты химических составов разрабатываемых материалов, обеспечивающих требуемый комплекс

свойств сварного соединения за счет целенаправленного формирования мелкозернистой структуры и уменьшения количества неметаллических включений в стали.

*Исследование выполнено в ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» за счет гранта Российского научного фонда № 26-29-20094, а также средств Министерства образования и науки Челябинской области, <https://rscf.ru/project/26-29-20094/>.*

### Список литературы

1. ГОСТ 9467-75. Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей. Типы. - Введ. 27.03.1975. - Москва: Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР, 1975. – 7 с.

УДК 669-179

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В МЕДИЦИНЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**Чистяков А.А.<sup>1</sup>, Файфер И. Н.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> ГАПОУ СО «Уральский политехнический колледж–МЦК»,  
Екатеринбург, Россия  
e-mail: predvestnik97@bk.ru

Титановые сплавы благодаря высокой биосовместимости и коррозионной стойкости широко применяются в медицине для зубных и костных имплантатов. Однако классический сплав Ti–6Al–4V ELI содержит алюминий и ванадий, которые у части пациентов вызывают аллергические реакции. Повышение прочностных свойств сплавов титана, необходимое для облегчения медицинских изделий, возможно за счёт введения легирующих элементов –  $\alpha$ -стабилизаторов (Al, O, N) и  $\beta$ -стабилизаторов (V, Mo, Nb, Ta, Fe, Cr и др.). В статье [1] коллектив авторов отмечает, что альтернативой может стать российский сплав Ti–Zr–Nb–Al (TZNA), где токсичные элементы заменены биосовместимыми цирконием (7–15 %) и ниобием (1–2 %), а упрочнение достигается без использования вредных компонентов.

Отдельно авторы рассматривают интерметаллидные сплавы на основе TiAl и Ti<sub>2</sub>AlNb, обладающие высокой удельной прочностью до 750 °С. Их ключевой недостаток – низкая пластичность при комнатной температуре, что делает невозможным применение традиционных методов обработки: прокатки,ковки, штамповки и т.д. [2, 3]. Классические способы производства деталей из титановых сплавов дают до 90 % отходов металла. При механической обработке таких сплавов возникает налипание на инструмент, а литьё зачастую приводит к образованию трудноустраняемых дефектов. Для обработки некоторых полуфабрикатов из титановых сплавов возможно применять гидроабразивную резку, которая лишена указанных недостатков, но имеет свои ограничения [4, 5].

Указанные причины серьёзно сдерживают использование новых материалов, несмотря на их уникальные жаропрочные свойства.

Наряду с традиционными методами (литьё, штамповка, механическая обработка) активно развиваются аддитивные технологии. Суть подхода заключается в том, что деталь выращивается послойно из порошка или проволоки по цифровой модели, что исключает необходимость в дорогой оснастке и позволяет получать сложные геометрические формы даже в единичном экземпляре. В отличие от традиционной обработки резанием, при 3D-печати проблема налипания практически исчезает, так как инструмент не контактирует с заготовкой. Титановые изделия, полученные с помощью этого метода, имеют предсказуемое соотношение свойств и плотности, что делает их пригодными для медицинских имплантатов [6]. Технология позволяет получать детали, близкие к чистовой форме, минимизируя последующую механическую обработку. Кроме того, 3D-печать позволяет управлять структурой материала за счёт направленной кристаллизации, а создание ячеистых имплантатов исключает необходимость в сверлении и фрезеровании – самых проблемных операциях при обработке титана и его сплавов [7]. Аддитивные технологии, в частности с прямым подводом энергии и материала легко перенастраиваются под конкретные требования, позволяют использовать разные материалы в одном изделии.

В отдельных публикациях подчёркивается, что ключевое преимущество аддитивных методов перед литьём и ковкой – резкое сокращение металлоотходов и возможность формировать ячеистые структуры, которые невозможно создать механической обработкой. В результате этого масса имплантатов снижается на 40–60 % без потери прочности, а костная ткань лучше прорастает внутрь таких пористых конструкций [8, 9].

В то же время повышенную пористость материала деталей, полученных порошковой печатью, в отдельных случаях можно отнести и к недостаткам. В частности, в работе [10] авторы указывают, что неблагоприятные (особенно наклонные) условия нагрузки импланта для зубных протезов могут приводить к увеличению напряжений до 60 %. При неправильной установке имплантов, нагрузки могут превышать предел прочности титанового сплава, что приводит к поломкам.

В исследованиях [1, 2] коллектив авторов изучает структуру и свойства жаропрочных интерметаллидных сплавов титана, полученных аддитивными методами. Интерес к технологиям аддитивного производства, в частности селективного лазерного сплавления, связан с возможностью получения заготовок без использования пластического деформирования, которое трудно осуществлять из-за ограниченной пластичности титановых сплавов.

Переходя к заключению, хотелось бы отметить, что аддитивные технологии рассматриваются исследователями как эффективный способ решения проблем обработки титановых интерметаллидных сплавов: низкий коэффициент расхода металла, плохую деформируемость при комнатной температуре и налипание на режущий инструмент. Кроме того, только методами послойного спаивания можно создавать имплантаты с индивидуальной геометрией под пациента и контролируемой пористостью, но не доступно при помощи литья или фрезерования. Развитие методов селективного лазерного спекания, оптимизация режимов термообработки и внедрение новых биосовместимых композиций

расширяют применение титана в травматологии, ортопедии и стоматологии. Несмотря на сохраняющиеся проблемы остаточных напряжений и риска трещинообразования при селективном лазерном сплавлении, аддитивные технологии в настоящее время представляют собой наиболее перспективный способ производства сложных медицинских изделий из труднодеформируемых титановых материалов.

### Список литературы

1. Структурно-фазовое состояние и механические свойства биосовместимых сплавов различных классов на основе титана / А. Г. Илларионов, А. Г. Нежданов, С. И. Степанов [и др.] // Физика металлов и металловедение. – 2020. – Т. 121, № 4. – С. 411-417. – DOI 10.31857/S0015323020040051.
2. Аддитивные технологии получения сплавов на основе алюминий диоксида титана / Илларионов А. Г., Попов А. А., Шабанов М. А., Степанов С. И. // Цветные металлы. – 2024. – № 4. – DOI: 10.17580/tsm.2024.04.08.
3. Цыдыпов Б.С., Лыгденов Б.Д. Разработка технологии производства титановых эндопротезов // Успехи современного естествознания. – 2015. – № 1-8. – С. 1351-1354.
4. Хазиев А. Р. Особенности обработки деталей из титанового сплава // Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли: Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, Казань, 08–10 августа 2018 года. Том 1. – Казань: Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, 2018. – С. 516-519.
5. Кривенко М. Ю., Марьин С. Б. Совершенствование технологии обработки деталей из титановых сплавов // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 4-х частях, Комсомольск-на-Амуре, 08–12 апреля 2019 года / Ответственный редактор Э.А. Дмитриева. Том Часть 3. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2019. – С. 120-123.
6. Соотношения механических свойств и плотности для титана, полученного аддитивным методом / Логинов Ю. Н., Степанов С. И., Юдин А. В. и др. // Цветные металлы. – 2018. – № 5. – С. 51–55.
7. Грехов С. К., Логинов Ю. Н. Реализация аддитивных технологий 3D-печати как путь к безотходному производству // Экологическая безопасность в техносферном пространстве. – 2019. – С. 105 - 107.
8. Патент № 2726253 С2 Российская Федерация, МПК А61L 27/06, А61F 2/44. Имплантат для замещения костных трабекулярных дефектов / Ю. Н. Логинов, А. А. Попов, С. В. Беликов [и др.]. № 2018101751. заявл. 29.12.2017: опубл. 10.07.2020. Заявитель Акционерное общество «Наука и инновации».
9. Патент на полезную модель № 209141 U1 Российская Федерация, МПК А61L 27/56. Аугмент для имплантации / Ю. Н. Логинов, А. И. Голодной, С. И. Степанов. № 2021105381: заявл. 02.03.2021: опубл. 02.02.2022

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПРУТКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ БЕСЛИТКОВОЙ ПРОКАТКОЙ-ПРЕССОВАНИЕМ ИЗ ВТОРИЧНЫХ ОТХОДОВ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АД35

**Бундин М.П., Сидельников С.Б., Лопатин В.В.**

*Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия  
e-mail: mbundin@sfu-kras.ru*

Вторичная переработка алюминиевых сплавов является актуальным направлением развития современной науки и промышленности, так как позволяет многократно возвращать металл в оборот, сокращая потребление природных ресурсов и снижая нагрузку на окружающую среду.

Одним из самых распространённых видов длинномерных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов остаются прессованные и калиброванные прутки, для производства которых применяют традиционные процессы обработки металлов давлением, такие как прокатка, прессование и холодное волочение. Деформированные прутки из сплава АД35 широко используются в различных отраслях промышленности, таких как транспортное машиностроение, автомобилестроение, энергетика, сельское хозяйство и др. Альтернативной технологией, имеющей преимущества перед традиционными технологиями, является беслитковая прокатка-прессование (БПП) [1, 2].

Целью данной работы являлось повышение эффективности процесса изготовления горячепрессованных прутков из вторичных отходов сплава АД35 с высоким уровнем механических свойств с использованием метода БПП.

В работе на основании ранее проведенных исследований [1] был экспериментально опробован способ беслитковой прокатки-прессования [2] для получения прутков из обрезки прессованных профилей из сплава АД35 (рис. 1, а). Аналогами служили способы совмещенного литья и прокатки-прессования, реализованные на установке совмещенной обработки СПП-200 [1]. Методика экспериментальных исследований заключалась в следующем. Расплав металла из отходов сплава АД35 получали в печи при температуре перегрева 770-800 °С и выдерживали его при этой температуре 10 мин.. Далее проводили заливку расплава металла в валки, вращающиеся с окружной скоростью 4 об/мин. Деформацию затвердевшей части заготовки в валках прокатного стана с закрытым ящичным калибром, перекрытого на выходе матрицей, осуществляли с обжатием при прокатке 50 %, а ее выдавливание при прессовании проводили с коэффициентом вытяжки при прессовании, равном 5, в результате чего получали длинномерные прутки диаметром 9 мм.

Испытания на разрыв образцов, изготовленных из полученных методом БПП прутков, проведенные с помощью универсальной машины LFM-400 усилием 400 кН [1], показали, что уровень прочностных и пластических свойств металла достаточно высок. Средние значения, вычисленные по данным для трех образцов, приведены в табл. 1. При этом видно, что показатели механических свойств этих прутков выше по сравнению с требуемыми свойствами горячепрессованных прутков после закалки и естественного старения по ГОСТ 21488-97 (см. табл. 1).

Таблица 1 – Механические свойства прутков, полученных по разным технологиям

| Полуфабрикат                                             | Временное сопротивление, МПа | Предел текучести, МПа | Относительное удлинение, % |
|----------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| Пруток, полученный БПП                                   | 238±2                        | 150±2                 | 20±0,2                     |
| Пруток, полученный горячим прессованием по ГОСТ 21488-97 | 195                          | 110                   | 12                         |

Микроструктуру образцов (рис. 1, б) исследовали на световом микроскопе Axio Observer Al.m (Carl Zeiss) при увеличениях 100 крат. Зеренное строение изучали на образцах после нанесения оксидной пленки в режиме поляризованного света. Анализ микроструктуры показал, что для прутка характерно волокнистое строение. Было также установлено, что, несмотря на то, что в процессе БПП реализуется горячая деформация, в структуре не наблюдается присутствие рекристаллизованных зерен.



Рис. 1. Вид отходов прессового производства (а) и микроструктура прутка диаметром 9 мм из алюминиевого сплава АД35, полученного методом БПП (б)

Таким образом, на основании результатов проведенных исследований можно сделать вывод о принципиальной возможности получения горячепрессованных прутков методом БПП с требуемым уровнем механических свойств из отходов алюминиевого сплава АД35.

### Список литературы

1. Особенности структурообразования и свойства металла при высокоскоростной кристаллизации–деформации и модифицировании алюминиевых сплавов: монография / С.Б. Сидельников, Е.С. Лопатина, Н.Н. Довженко, Т.Н. Дроздова и др. - Красноярск: Сиб. фе-дер. ун-т, 2015.
2. Пат. 2847204. Российская Федерация. Способ бесслитковой прокатки-прессования прутков и устройство для его реализации / Сидельников С.Б., Лопатина Е.С., Парубок А.В. [и др.], опубл. 30.09.2025, Бюл. №28.

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОКАТКИ МЕТАЛЛА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

**Доненко С.Л.<sup>1</sup>, Доненко И.Л.<sup>2</sup>, Доненко Л.Н.<sup>3</sup>**

*<sup>1</sup> Кыргызско-Российский Славянский университет имени Первого Президента Российской Федерации Б.Н. Ельцина, Бишкек, Кыргызская Республика*

*<sup>2</sup> Муниципальная казённая общеобразовательная школа-интернат, пгт. Эвенск, Магаданская область, Россия*

*<sup>3</sup> Кыргызский авиационный институт имени И. Абдраимова, Бишкек, Кыргызская Республика  
e-mail: sofiaadonenko56@gmail.com*

Современная горнодобывающая промышленность требует высоконадёжного и долговечного оборудования, способного функционировать в условиях экстремальных механических нагрузок, абразивного износа и переменных температурных режимов. Эффективность такого оборудования во многом определяется качеством металлургических процессов, используемых при его производстве. Среди этих процессов прокатка металла играет ключевую роль в формировании микроструктуры и механических свойств таких компонентов, как буровой инструмент, дробильные элементы и детали транспортных систем.

Традиционные процессы прокатки, как правило, управляются на основе эмпирических моделей и опыта операторов. Несмотря на эффективность подобных подходов в классических производственных условиях, они ограничены в способности адаптироваться к динамическим изменениям технологических параметров. Изменения температуры, состава материала и скорости деформации могут приводить к возникновению дефектов, неоднородности механических свойств и увеличению энергозатрат.

Стремительное развитие технологий Индустрии 4.0 открыло новые возможности для совершенствования металлургических процессов посредством интеграции искусственного интеллекта. Алгоритмы машинного обучения позволяют осуществлять предиктивное моделирование сложных нелинейных систем, а цифровые двойники обеспечивают виртуальное представление физических процессов для их моделирования и управления. Однако применение ИИ непосредственно к процессам прокатки металла при производстве горнодобывающего оборудования остаётся недостаточно исследованным направлением.

Научная новизна данной работы заключается в разработке интегрированной системы, объединяющей гибридные модели глубокого обучения, технологию цифрового двойника и многокритериальную оптимизацию для адаптивного управления процессами прокатки. Такой подход обеспечивает одновременное повышение качества продукции, энергоэффективности и стабильности технологического процесса.

Процесс прокатки представляет собой сложную термомеханическую систему, в которой одновременно взаимодействуют деформация, теплопередача и трение. Качество конечного продукта зависит от точной координации

технологических параметров, таких как скорость прокатки, температура, степень деформации и условия охлаждения.

Для описания этих сложных взаимосвязей предлагается гибридная архитектура глубокого обучения, объединяющая сверточные нейронные сети (CNN) и сети долгой краткосрочной памяти (LSTM). Сверточный компонент отвечает за извлечение пространственных признаков, связанных с характером деформации и распределением напряжений, тогда как рекуррентный компонент моделирует временные изменения технологических параметров на протяжении всего процесса прокатки. Такое сочетание обеспечивает высокоточную оценку как мгновенных, так и зависящих от времени характеристик материала.

Модель обучается на производственных наборах данных, включающих показания датчиков прокатных станов: температуру, силу прокатки и скорость движения металла. Используется подход обучения с учителем, позволяющий модели эффективно адаптироваться к новым условиям эксплуатации.

Ключевым элементом предложенной системы является цифровой двойник процесса прокатки. Цифровой двойник объединяет данные реального времени с предиктивными и физическими моделями, обеспечивая непрерывный мониторинг и моделирование процесса. Это позволяет операторам виртуально тестировать различные режимы прокатки и выбирать оптимальные параметры без остановки производства.

Для достижения оптимальной эффективности процесса реализован многокритериальный подход к оптимизации. Оптимизация одновременно учитывает несколько критериев: энергоэффективность, минимизацию дефектов и соответствие требуемым механическим свойствам. Для поиска оптимальных наборов параметров в условиях технологических ограничений используются эволюционные алгоритмы, обеспечивающие адаптивное и гибкое управление процессом.

Внедрение предложенной ИИ-ориентированной системы демонстрирует значительное повышение эффективности процессов прокатки. Гибридная модель глубокого обучения показывает высокую точность прогнозирования, успешно выявляя как пространственные, так и временные зависимости в данных. Это позволяет более точно оценивать свойства материала и вероятность возникновения дефектов в процессе прокатки.

Применение алгоритмов оптимизации приводит к существенному снижению уровня дефектов — до 20–25 %. Данный результат достигается благодаря более эффективному контролю термомеханических условий и более точной настройке параметров процесса. Кроме того, энергопотребление уменьшается примерно на 10–15 %, что подтверждает высокую эффективность предложенного подхода.

Цифровой двойник играет ключевую роль в обеспечении адаптивного управления в режиме реального времени. Постоянное обновление модели на основе данных, поступающих с датчиков, позволяет системе сохранять устойчивость даже при изменяющихся условиях эксплуатации. Это снижает влияние внешних факторов и минимизирует вероятность технологических отклонений.

По сравнению с традиционными системами управления предложенный метод обеспечивает переход от статического и операторозависимого управления к интеллектуальному и адаптивному контролю. Это особенно важно при

производстве горнодобывающего оборудования, где надёжность и долговечность являются критически значимыми факторами.

Кроме того, интеграция искусственного интеллекта позволяет реализовать предиктивное техническое обслуживание за счёт выявления потенциальных отклонений процесса на ранних стадиях. Это способствует сокращению простоев и повышению общей производственной эффективности.

Проведённое исследование демонстрирует, что искусственный интеллект способен значительно повысить эффективность и надёжность процессов прокатки металла, используемых при производстве горнодобывающего оборудования. Интеграция гибридных нейронных сетей, технологии цифрового двойника и многокритериальной оптимизации формирует комплексное решение, направленное на улучшение качества продукции, снижение энергопотребления и повышение устойчивости технологического процесса.

Предложенная система способствует развитию интеллектуальных металлургических комплексов и поддерживает цифровую трансформацию горнодобывающей промышленности. Её внедрение особенно актуально для предприятий, стремящихся модернизировать производственные процессы и повысить конкурентоспособность.

Дальнейшие исследования будут направлены на промышленную реализацию системы в реальном времени, расширение наборов данных и совершенствование предиктивных моделей с целью повышения их устойчивости и масштабируемости.

### Список литературы

1. Доненко С. Л., Доненко И. Л. Искусственный интеллект в геологии: современные технологии для новых открытий // *Материалы LXXIV международной студенческой научной конференции Московского Политеха*. – Москва: Московский Политех, 2024. – 1 CD-R. – Загл. с титул. экрана. – Текст: электронный.
2. Доненко С. Л., Доненко И. Л. ИИ и системы БПЛА для геологического анализа // *Актуальные аспекты развития гражданской авиации (Авиатранс-2024): материалы международной научнопрактической конференции*: под ред. Г.Л. Акопов [и др.]. – Ростов-на-Дону, 2024. – 341 с.
3. Доненко С. Л. Фрактально-кластерный анализ горных массивов с использованием искусственного интеллекта // *Журнал исследований молодых учёных*. – 2025.
4. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. – MIT Press, 2016.
5. Lee J., Bagheri B., Kao H. *Cyber-physical systems architecture for Industry 4.0* // *Manufacturing Letters*. – 2015.
6. Zhang L., Liu H. *Intelligent manufacturing and digital transformation in metallurgy* // *Mining Engineering Journal*. – 2020.
7. Singh R., Kumar A. *Artificial intelligence applications in industrial processes* // *International Journal of Engineering Research*. – 2021.
8. Sanchidrián J. A., Segarra P. *Advanced technologies in mining engineering*. – CRC Press, 2017.

# СОДЕРЖАНИЕ

## МАТЕРИАЛЫ ПЛЕНАРНЫХ ДОКЛАДОВ

**Hailiang Yu**

HYBRID ROLLING PROCESSING FOR HIGH-PERFORMANCE ALUMINUM ALLOYS: MICROSTRUCTURAL EVOLUTION AND ENGINEERING PROPERTY ENHANCEMENT ..... 3

**Ерисов Я.А., Разживин В.А.**

ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ ДЛЯ МАТЕРИАЛОВ С АКСИАЛЬНОЙ ТЕКСТУРОЙ ..... 3

**Арышенский Е.В.**

ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕКСТУРЫ И МИКРОСТРУКТУРЫ В АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ НАУЧНОЙ ГРУППЫ ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ СИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ИНДУСТРИАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА ..... 5

**Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Рааб Г.И., Хайлян Ю., Дж.Лиу, Песин И.А.**

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ ..... 7

**Чукин М.В., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю.**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ХОЛОДНОКАТАНОЙ СТАЛЬНОЙ ЛЕНТЕ МЕТОДОМ ТЭДС ..... 7

**Сивкова Т.А., Сыропятова О.С., Кадушников Р.М., Сомина С.В.**

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В КОНТРОЛЕ МИКРОСТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ ..... 10

## СЕКЦИЯ 1 – ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ В КОНТЕКСТЕ СОВРЕМЕННЫХ ПОТРЕБНОСТЕЙ МИРОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

**Рааб Г.И.**

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БАЗОВОГО ПРОКАТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АСИММЕТРИЧНОЙ ЛИСТОВОЙ ПРОКАТКИ ..... 12

**Егорова К.А., Зотов О.Г.**

ВЛИЯНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА СВОЙСТВА ГОРЯЧЕГО СОРТОВОГО ПРОКАТА ..... 12

**Ушаков А.В., Лавриненко В.Ю.**

ТЕРМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ФОСФАТНОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ НАГРЕВЕ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ ..... 14

**Бирюкова О.Д., Пустовойтов Д.О., Могильных А.Е., Песин И.А.**

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКОГО ФАКТОРА АСИММЕТРИИ НА ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ..... 16

|                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Чистяков Д.А.</b><br>ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ПРОКАТКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ<br>СТАЛИ: УПРАВЛЕНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЕМ, ТОЧНОСТЬЮ<br>ГЕОМЕТРИИ И СТАБИЛЬНОСТЬЮ СВОЙСТВ В УСЛОВИЯХ<br>ШИРОКОПОЛОСНЫХ СТАНОВ .....                                   | 17 |
| <b>Султанов К.Р., Хафизова Э.Д., Поленок М.В., Темралиева Д.Р.,<br/>Мартыненко Н.С.</b><br>ВЛИЯНИЕ КРУЧЕНИЯ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ НА СВОЙСТВА<br>АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Mg-Si-Cu .....                                              | 19 |
| <b>Лысов Д.Н.</b><br>СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ТЕХНИЧЕСКОГО НОРМИРОВАНИЯ<br>В ПРОИЗВОДСТВЕ ТРУБНОЙ МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ.....                                                                                                                    | 21 |
| <b>Никитина М. А., Носов Л.В., Песин А.М., Барышникова А.М.</b><br>ВЛИЯНИЕ СКОРОСТНОЙ АСИММЕТРИИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ<br>ПЛАСТИЧНОСТЬ ПРИ ПРОКАТКЕ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ АЛЮМИНИЙ-<br>МАГНИЙ-СКАНДИЙ .....                                          | 23 |
| <b>Морозова П.Н.</b><br>ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОИЗВОДСТВА НЕРЖАВЕЮЩЕГО<br>ЛИСТОВОГО ПРОКАТА В РОССИИ .....                                                                                                                                | 24 |
| <b>Юрьев П.О., Байковский Ю.В., Дурнопьянов А.В., Константинов И.Л.</b><br>ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОТОЖЖЕННЫХ ЛИСТОВ<br>ИЗ СПЛАВА СИСТЕМЫ АЛЮМИНИЙ-МАГНИЙ, ЛЕГИРОВАННОГО РЗМ<br>И ПМ .....                                        | 26 |
| <b>Федосеева М.В.</b><br>МИНИМИЗАЦИЯ ДЕФЕКТОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ:<br>КРОМОЧНЫЕ ТРЕЩИНЫ .....                                                                                                                                          | 28 |
| <b>Рашевский К. А., Песин А.М., Носов Л.В.</b><br>ВЛИЯНИЕ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ С РАЗЛИЧНОЙ СКОРОСТЬЮ<br>РАБОЧИХ ВАЛКОВ И ПОСЛЕДУЮЩЕГО РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИОННОГО<br>ОТЖИГА НА ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ<br>НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ..... | 30 |
| <b>Гайсина А.А., Никитина М.А., Валиев Р.З.</b><br>НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТЬ МАГНИЕВОГО<br>СПЛАВА Mg-0.8Mn .....                                                                                                                 | 31 |
| <b>Матюшин Е.В., Логинов Ю.Н., Черепов А.А.</b><br>ПРОБЛЕМЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПРОВОЛОКИ<br>ИЗ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕГО СПЛАВА ЗлМ80 .....                                                                                                             | 32 |
| <b>Яковлев С.И., Глинских П.И., Замаева Ю.В.</b><br>ВОЗМОЖНОСТЬ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ СЛОИСТЫХ ПОЛОС<br>ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ .....                                                                                                             | 34 |
| <b>Емельянов Т.Д., Логинов Ю.Н.</b><br>ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ СЕРИИ 6000<br>И ОСОБЕННОСТИ ИХ ОБРАБОТКИ .....                                                                                                                        | 36 |

|                                                                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Соченко Т.В., Мифтахов Ф.К., Каблуков В.В., Исхаков Т.Ф.</b><br>ОСОБЕННОСТИ ГИБКИ ЗАГОТОВОК КРОНШТЕЙНОВ,<br>ИЗГОТОВЛЕННЫХ ВЫРУБКой И ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКОЙ .....                                     | 38 |
| <b>Ханнанова А.Е.</b><br>СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ ТОКСИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ РАБОТЕ<br>ПРОКАТНОГО ЦЕХА .....                                                                                                  | 40 |
| <b>Нугаманов Ф.В., Хафизова Э.Д., Исламгалиев Р.К.</b><br>ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ<br>НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИОДЕГРАДИРУЕМОГО СПЛАВА<br>Zn-0.5% Ag-0.8% Al .....            | 42 |
| <b>Кин Т.Ю., Хакимова А.Н.</b><br>РАСЧЕТ УГЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИЙ ТЕЧЕНИЯ В ОЧАГЕ<br>ДЕФОРМАЦИИ СТАНА РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ ПРОКАТКИ .....                                                     | 43 |
| <b>Лешок В.А.</b><br>ИЗУЧЕНИЕ ДИАГРАММЫ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ СТАЛИ 30Г2<br>ДЛЯ ОЦЕНКИ ДЕФОРМАЦИОННОГО УСКОРЕНИЯ<br>ПРИ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ .....                                             | 45 |
| <b>Мелентьев С.Ю., Чигиринский В.В., Кузьмин С.Л.</b><br>ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ФАКТОРА ВОЗДЕЙСТВИЯ<br>НА ЗАХВАТ И УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ .....                                 | 47 |
| <b>Мелихова Э.Н., Черный В.А., Мазур И.П.</b><br>ХОЛОДНАЯ ПРОКАТКА ВЫСОКОКРЕМНИСТОЙ ДИНАМНОЙ СТАЛИ                                                                                                | 48 |
| <b>Морозов В.С., Непряхин С.О.</b><br>ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ШПОНОЧНОЙ СТАЛИ<br>ПРИ ВОЛОЧЕНИИ .....                                                                                      | 50 |
| <b>Огнева Е.М., Корчунов А.Г., Константинов Д.В.</b><br>МНОГОПРОХОДНОЕ ВОЛОЧЕНИЕ ПРОВОЛОКИ ИЗ СТАЛИ<br>С МЕТАСТАБИЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ: ВЫЗОВЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ .....                                    | 52 |
| <b>Альсаймари Нардин Мункит Часиб, Логинов Ю.Н., Хотиннов В.А.</b><br>РОЛЬ СДВИГОВОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРЕССОВАНИИ ТРУБЫ<br>ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА .....                                             | 53 |
| <b>Пивоварова К.Г., Тагирова В.М., Тухветова Л.М.</b><br>ВЛИЯНИЕ МАРШРУТА ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ<br>НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ И ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ НАВИВКИ<br>ПРУЖИН ИЗ СТАЛИ 54SiCr6 .....      | 55 |
| <b>Пилипёнок И.И., Фруцкий В.А., Пилипенко С.В., Штемпель О.П.</b><br>УНИФИЦИРОВАННАЯ УНИВЕРСАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ<br>ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ С УЧЕТОМ<br>МАТЕРИАЛА ИЗДЕЛИЯ ..... | 57 |
| <b>Столяров В.В.</b><br>ПРОКАТКА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ В СОПРОВОЖДЕНИИ<br>ИМПУЛЬСНОГО ТОКА .....                                                                                                  | 59 |
| <b>Постыляков А.Ю., Королева И.Э.</b><br>АППРОКСИМАЦИЯ ПРОФИЛЯ ИНСТРУМЕНТА СТАНОВ ХОЛОДНОЙ<br>ПРОКАТКИ ТРУБ .....                                                                                 | 61 |

|                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Фриккель А.А., Слукин Е.Ю., Упоров С.В.</b><br>УВЕЛИЧЕНИЕ МАССЫ ЗАГOTOVK ПОД ПЕРЕКОВОК ПУТЕМ<br>МОДЕРНИЗАЦИИ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ЭШП ..... | 63 |
| <b>Шишин Н.Н., Бабайлов Н.А.</b><br>МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ БРИКЕТОВ .....                                                        | 65 |
| <b>Файфер И.Н.</b><br>ВЫБОР ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ<br>ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В РАМКАХ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ .....                    | 66 |

## **СЕКЦИЯ 2 – МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

|                                                                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Алимов И.С., Стебунов С.А., Белугин В.С., Мальцев П.А., Гладков Ю.А.</b><br>ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ<br>С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ САПР KALIBER .....                                             | 69 |
| <b>Фарукшин И.К., Выдрин А.В.</b><br>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ КАЛИБРА<br>НА РАВНОМЕРНОСТЬ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ<br>БЕЗОПРАВОВОЧНОЙ ПРОКАТКЕ .....                                           | 74 |
| <b>Шагимуратов А.Р., Хафизова Э.Д., Мартыненко Н.С., Темралиева Д.Р.</b><br>ВЛИЯНИЕ РОТАЦИОННОЙ ВОВКИ НА СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО<br>СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Mg-Si .....                                            | 76 |
| <b>Лукьянов Е.Д., Харитонов В.А., Локогунина Н.М., Песин И.А.</b><br>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТНОЙ АСИММЕТРИИ<br>НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ<br>СТАЛИ МАРКИ 09Г2С .....            | 77 |
| <b>Файрузова З.Р., Лавриненко В.Ю.</b><br>ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ<br>СЛОЖНОПРОФИЛЬНОЙ ДЕТАЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ<br>ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВА<br>ЗАГОТОВКИ ..... | 78 |
| <b>Парубок А.В., Сидельников С.Б., Лопатина Е.С., Голосов Д.Р.</b><br>МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ<br>ПРОЦЕССА СОВМЕЩЕННОЙ ПРОКАТКИ-ПРЕССОВАНИЯ<br>МАГНИЕВОГО СПЛАВА МА2-1 .....         | 81 |
| <b>Песин И.А., Пустовойтов Д.О., Песин А.М., Бирюкова О.Д.</b><br>КОЭФФИЦИЕНТ СКОРОСТНОЙ АСИММЕТРИИ КАК УПРАВЛЯЮЩИЙ<br>ПАРАМЕТР ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ .....                                                    | 83 |
| <b>Горбунова В.С.</b><br>ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИСКРИВЛЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОРОТКИХ<br>ПОЛОС ПУТЕМ ЦИФРОВИЗАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ<br>ХОЛОДНОЙ НЕСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ .....                                  | 84 |
| <b>Пелевин Д.А.</b><br>ВЫТЯЖКА И ОТБОРТОВКА ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ФУТОРКА» .....                                                                                                                                   | 86 |

|                                                                                                                                                                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Олейник Д.Г., Корчунов А.Г.</b><br>РАСЧЕТ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ХОЛОДНОВЫСАДОЧНОЙ МАТРИЦЫ<br>ДЛЯ БОЛТОВ С ФЛАНЦЕМ ПО ПРОДОЛЬНОМУ УСТАЛОСТНОМУ<br>РАЗРУШЕНИЮ .....                                                                  | 87  |
| <b>Дёмин Д.О., Романенко Г.В.</b><br>РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ, ОСНОВАННЫХ<br>НА ФИЗИКЕ, ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ<br>ПОСЛЕ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ ПРОВОЛОК .....                                       | 88  |
| <b>Китев М.О., Гун И.Г., Сальников В.В., Столяр Ф.А.</b><br>ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ<br>ВНУТРЕННЕЙ РЕЗЬБЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА КОНЕЧНОЕ КАЧЕСТВО<br>ПОВЕРХНОСТИ НА ПРИМЕРЕ КОРПУСОВ РУЛЕВЫХ НАКОНЕЧНИКОВ | 90  |
| <b>Григорьев Е.А., Нухов Д.Ш., Халезов А.О.</b><br>ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ ОПРАВКИ<br>НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВИНТОВОЙ ПРОШИВКИ<br>НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ .....                                                 | 91  |
| <b>Сверчков А.И., Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Локотунина Н.М.</b><br>ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ<br>ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ ЛЕНТЫ<br>ИЗ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПРИ АСИММЕТРИЧНОЙ<br>ПРОКАТКЕ .....  | 93  |
| <b>Глинских П.И., Замаева Ю.В., Яковлев С.И.</b><br>ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ<br>НАПРЯЖЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ПРОКАТКИ ПЛИТЫ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО<br>СПЛАВА Ак4-1 .....                                             | 95  |
| <b>Арцибашев С.В., Нужин И.Н., Горбунов А.В.</b><br>ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ГОФРИРОВАННЫХ<br>ПРОФИЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ МЕТОДОМ<br>КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПК QForm.....                                | 97  |
| <b>Константинов Д.В., Огнева Е.М., Корчунов А.Г.</b><br>ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОРИСТЫХ СТАЛЕЙ<br>С ТРИП-ЭФФЕКТОМ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО<br>МОДЕЛИРОВАНИЯ                                                       | 99  |
| <b>Белых М.К., Гордеев С.А., Ершов А.Н.</b><br>ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ<br>НА ПАО «МАГНИТОГОРСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ» .                                                                            | 101 |
| <b>Бочкарев А.А., Корнилов Г.П.</b><br>УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ МНОГОКЛЕТЬЕВЫХ<br>ПРОКАТНЫХ СТАНОВ ПРИ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКЕ .....                                                                                        | 103 |
| <b>Попов Ф.Е., Арбуз А.С., Лежнев С.Н.</b><br>СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПРЯМОЙ И РЕВЕРСИВНОЙ<br>СХЕМ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК НА СТАНЕ РАДИАЛЬНО-<br>СДВИГОВОЙ ПРОКАТКИ НА ЭВОЛЮЦИЮ МИКРОСТРУКТУРЫ .....                   | 105 |

|                                                                                                                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Замараева Ю.В., Дегтярева О.Ф., Логинов Ю.Н., Разинкин А.В.</b><br>ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ПРЕССОВАНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТА ВЫТЯЖКИ<br>НА СКОРОСТЬ ДЕФОРМАЦИИ В ПРОЦЕССЕ ПРЕССОВАНИЯ<br>ЛЕГКОСПЛАВНОЙ БУРИЛЬНОЙ ТРУБЫ ..... | 107 |
| <b>Алимов И.С., Гладков Ю.А.</b><br>ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ В QForm<br>И САПР КАЛИБЕР .....                                                                                                    | 109 |
| <b>Постыляков А.Ю., Королева И.Э., Логинов Ю.Н.</b><br>ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ОЦЕНКИ НЕОДНОРОДНОСТИ<br>ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДЛЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ<br>МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ .....                 | 111 |
| <b>Есболат А.Б., Крупенькин И.И., Панин Д.А., Панин Е.А.</b><br>ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОПРИВОДНОЙ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ<br>ТОЛСТОГО ЛИСТА В РЕЛЬЕФНЫХ ВАЛКАХ С ПОСЛЕДУЮЩИМ<br>ВЫРАВНИВАНИЕМ .....                       | 113 |
| <b>Ворошилова М.В., Ворошилов Д.С., Беспалов В.М., Лопатина Е.С.</b><br>АНИЗОТРОПИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА<br>ИЗ СПЛАВА 1580, ПОЛУЧЕННОГО ПО ДВУМ РАЗЛИЧНЫМ СХЕМАМ<br>ДЕФОРМАЦИИ .....            | 115 |
| <b>Тарасов И.С., Мойсеев И.А., Михайлов А.Н.</b><br>ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ПОДЪЕМ КОЛЬЦА ТИПА «ДИСК»<br>ПРИ РАДИАЛЬНО-ОСЕВОЙ РАСКАТКЕ КОЛЕЦ .....                                                                           | 117 |

### **СЕКЦИЯ 3 – ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ**

|                                                                                                                                                                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Борисенко Н.Р., Мунтин А.В.</b><br>ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СОВМЕСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ<br>СТАЛИ И ПЛАКИРУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА В ПРОЦЕССЕ ГОРЯЧЕЙ<br>ПРОКАТКИ ТОЛСТОЛИСТОВЫХ ВАКУУМНЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ<br>ПАКЕТОВ .....                                                              | 119 |
| <b>Кузнецова А.С., Полецков П.П., Ефимова Ю.Ю., Алексеев Д.Ю.</b><br>СОЗДАНИЕ НОВОЙ ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩЕЙ СТАЛИ КЛАССА<br>ПРОЧНОСТИ Ст80 ДЛЯ ГНКТ С ПОВЫШЕННЫМИ ТРЕБОВАНИЯМИ<br>К ХЛАДОСТОЙКОСТИ .....                                                                               | 121 |
| <b>Перминова Ю.С., Белецкий Е.Н., Рыбальченко О.В., Добаткин С.В.</b><br>ФРАКТОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ<br>МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ С КРУПНОЗЕРНИСТОЙ<br>И СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ В УСЛОВИЯХ<br>РАСТЯЖЕНИЯ ПОСЛЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ЦИКЛИРОВАНИЯ ..... | 122 |
| <b>Нухов Д.Ш., Орлов Г.А., Березин И.М.</b><br>ИЗМЕНЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ<br>ПРОКАТКИ С ЦЕЛЮ УМЕНЬШЕНИЯ ОСЕВЫХ УСИЛИЙ<br>НА СТАНЕ ХПТ .....                                                                                                                  | 123 |

|                                                                                                                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Поленок М.В., Хафизова Э.Д., Исламгалиев Р.К.</b><br>ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ СТРУКТУРЫ, МЕХАНИЧЕСКИХ<br>СВОЙСТВ И КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЦИНКОВОГО СПЛАВА<br>ZN-4%AG-1%CU В РЕЗУЛЬТАТЕ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО<br>ПРЕССОВАНИЯ ..... | 125 |
| <b>Чуклин Е.В., Стулов В.В.</b><br>ТЕХНОЛОГИЯ И ПРОЦЕСС ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛЫХ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ<br>ДЕФОРМИРОВАННЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ЖИДКОГО СВИНЦОВОГО<br>СПЛАВА .....                                                                             | 127 |
| <b>Комкова Д.А., Волков А.Ю., Таланцев Е.Ф.</b><br>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ МАГНИЯ<br>ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ СЖАТИИ .....                                                                                                            | 129 |
| <b>Носов Л.В., Пустовойтов Д.О., Песин И.А.</b><br>ВЛИЯНИЕ СКОРОСТНОЙ АСИММЕТРИИ ВАЛКОВ ПРИ ГОРЯЧЕЙ<br>ПРОКАТКЕ НА МИКРОСТРУКТУРУ СТАЛИ 20 .....                                                                                       | 131 |
| <b>Баркеева К.М., Беломестнов А.К., Космацкий Я.И., Фокин Н.В.</b><br>ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ТРУБ<br>ИЗ СУПЕРДУПЛЕКСНОЙ СТАЛИ .....                                                                                       | 131 |
| <b>Рыскунова К.А.</b><br>ПОВЫШЕНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ АНИЗОТРОПНЫХ<br>ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ В РАМКАХ ПРОИЗВОДСТВА<br>ПАО «НЛМК» и ООО «ВИЗ-СТАЛЬ» МЕТОДОМ СДВОЕННОЙ<br>ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ .....                                      | 134 |
| Бирюков М.А., Песин А.М., Бирюкова О.Д., Локотунина Н.М.<br>ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ<br>НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КИНЕМАТИЧЕСКОГО<br>ФАКТОРА АСИММЕТРИИ .....                                              | 136 |
| <b>Захаров С.Е., Фокин Н.В., Выдрин А.В.</b><br>СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ<br>КАК РЕЗУЛЬТАТ ОСВОЕНИЯ НОВЫХ ВИДОВ ПРОДУКЦИИ .....                                                                                   | 137 |
| <b>Скирипичникова А.А., Баранова А.П., Базлов А.И., Маркова Г.В.,<br/>Пермякова Д.В., Дубинский С.М.</b><br>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПОИСК ЭЛИНВАРНЫХ $\beta$ -ТИТАНОВЫХ<br>СПЛАВОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СТАБИЛЬНОСТИ .....                      | 139 |
| <b>Барышникова А.М., Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Песин И.А.</b><br>ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ<br>ПРИ ХОЛОДНОЙ И ГОРЯЧЕЙ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКЕ .....                                                           | 140 |
| <b>Гордеенко Н.С.</b><br>ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ГРУЗОНЕСУЩЕГО<br>ГЕОФИЗИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОЙ ОЦИНКОВАННОЙ<br>ПРОВОЛОКИ НА ДВУХКЛЕТЕВОЙ КАНАТОВЬЮЩЕЙ МАШИНЕ<br>ПЛАНЕТАРНОГО ТИПА TRDL 18/315 + 24/315 .....   | 142 |

|                                                                                                                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Ворошилов Д.С.</b><br>РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ И РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА<br>РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА<br>ПРОВОЛОКИ ИЗ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ А1-РЗМ С ПРИМЕНЕНИЕМ<br>СОВМЕЩЕННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ..... | 143 |
| <b>Постыляков А.Ю., Кокшаров А.А.</b><br>ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗЛУЧЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ<br>СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ .....                                                                             | 145 |
| <b>Завалий Е.А., Яковлев С.И., Глинских П.И., Замараева Ю.В.</b><br>СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЖИМОВ ИСКУССТВЕННОГО СТАРЕНИЯ<br>ГОРЯЧЕКАТАНЫХ ПЛИТ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 2014А .....                                       | 147 |
| <b>Гулин А.Е., Кузнецова А.С., Емалева Д.Г., Алексеев Д.Ю.</b><br>РАЗРАБОТКА ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩИХ<br>МАТЕРИАЛОВ С ПОВЫШЕННЫМИ УДАРНО-ВЯЗКОСТНЫМИ<br>СВОЙСТВАМИ ДЛЯ АРКТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ТЭК .....   | 149 |
| <b>Чистяков А.А., Файфер И.Н.</b><br>ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ<br>В МЕДИЦИНЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ .....                                                                             | 150 |
| <b>Бундин М.П., Сидельников С.Б., Лопатин В.В.</b><br>ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПРУТКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ<br>БЕСЛИТКОВОЙ ПРОКАТКОЙ-ПРЕССОВАНИЕМ ИЗ ВТОРИЧНЫХ<br>ОТХОДОВ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АД35 .....              | 153 |
| <b>Доненко С.Л., Доненко И.Л., Доненко Л.Н.</b><br>ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОКАТКИ МЕТАЛЛА<br>ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ<br>НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА .....                             | 155 |

Научное издание

## **MAGNITOGORSK ROLLING PRACTICE 2026**

Материалы IX международной молодежной  
научно-технической конференции

Под редакцией А.Г. Корчунова

Подписано в печать 22.05.2026. Рег. № 80-26. Формат 60×84/16. Бумага тип. №1.  
Плоская печать. Усл.печ.л. 10,50. Тираж 100 экз. Заказ 151.



Издательский центр ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»  
455000, Магнитогорск, пр. Ленина, 38  
Участок оперативной полиграфии ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»