

Латушкин Илья Анатольевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ НЕПРЕРЫВНОЙ ГОРЯЧЕЙ
ПРОКАТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПУТЕМ УЧЕТА
РАЗЛИЧИЙ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ ПО КЛЕТЯМ**

2.5.7. Технологии и машины обработки давлением

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2025

Работа выполнена на кафедре обработки металлов давлением в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева».

Научный руководитель:

Арышенский Евгений Владимирович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет», заведующий кафедрой обработки металлов давлением и материаловедения ЕВРАЗ ЗСМК.

Официальные оппоненты:

Песин Александр Моисеевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», профессор кафедры «Технологии обработки материалов»;

Кошмин Александр Николаевич, кандидат технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет», доцент сектора научной деятельности.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет» (г. Липецк).

Защита состоится 26 июня 2025 года в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.2.379.05, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и на сайте https://www.ssau.ru/storage/pages/6746/file_67fcb214081a24.44221156.pdf.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент

Я. А. Ерисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Прокатка является одним из самых распространенных способов производства полуфабрикатов различного назначения. В Российской Федерации ежегодно производится порядка 300–400 тыс. тонн катаной продукции из алюминиевых сплавов и этот объем постоянно увеличивается. Эта динамика обусловлена разработкой новых алюминиевых сплавов, которые успешно заменяют сталь в различных отраслях промышленности. Изделия из таких сплавов демонстрируют более высокие эксплуатационные характеристики по сравнению с традиционными стальными аналогами, поэтому совершенствование процессов производства из алюминиевых сплавов, а именно листового проката, является важной и актуальной задачей.

Современные прокатные станы оснащены автоматическими системами контроля и регулирования толщины полосы. Данные системы работают по алгоритмам на основе математических моделей расчета энергосиловых параметров прокатки. Выход годного и качество продукции напрямую будут определяться точностью применяемой модели. Большая роль в этих расчетах отводится учету сил трения. Особенно данная проблема актуальна при управлении прокаткой в непрерывной группе клетей, так как условия трения по клетям могут значительно изменяться в зависимости от температурно-скоростных параметров прокатки, марки сплава, шероховатости валков и свойств смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). Поэтому требуется модель, позволяющая учитывать различные условия контакта валков и алюминиевой полосы для поддержания устойчивого процесса прокатки.

При горячей прокатке алюминиевых сплавов в качестве СОЖ используется эмульсия по типу «масло-вода», помимо масла в основу смазки-эмульсола входят различные присадки (эферы, жирные кислоты, спирты и мыла). Изменение доли этих присадок дает возможность оптимизировать процесс прокатки и снизить силу трения, но при этом сохранить уровень трения, необходимый для стабильного проката.

Степень разработанности. Очевидно, что для управления процессом прокатки необходимы такие обобщенные закономерности трения, которые позволяли бы рассчитывать силы трения с использованием универсальных опытных констант, справедливых для различных условий трения и получаемых путем проведения достаточно простых испытаний. Данная работа направлена на уточнение и дальнейшее развитие теории трения при прокатке путем разработки и применения комплексного подхода к определению условий трения, включающего в себя совместное определение давления смазки, толщины смазочного слоя, деформаций контактной поверхности заготовки и параметров прокатки.

В математических моделях управления прокатными станами применяют уравнение Кармана–Целикова, в котором трение описывается законом Амонтона–Кулона. Для высокого давления в очаге деформации применение этого закона не имеет смысла, так как коэффициент трения будет зависеть от давления. В связи с этим большое распространение в теории обработки металлов давлением получили законы трения Зибеля Э., Леванова А.Н., Ванхайма Т. и Бэя Н.

При этом в работах таких ученых как Ахматов А.С., Ашпур Ю.В., Буркин С.П., Грудев А.П., Картак Б.Р., Колмогоров В.Л., Колмогоров Г.Л., Леванов А.Н., Мазур В.Л., Максименко О.П., Мельникова Т.Е., Покрас И.Б., Самохвал В.М., Сидельников С.Б., Спасский Ю.И., Шаталов Р.Л. показано, что напряжения трения зависят не только от нормального напряжения или предела текучести деформируемого материала. Поэтому для более точного определения касательных контактных напряжений необходимо изучение сложных закономерностей трения с учетом связи этого явления с напряженно-деформированным состоянием, реологическими свойствами обрабатываемого металла, гидродинамическими свойствами смазки, шероховатостью валков и полосы, геометрией очага деформации, температурно-скоростными параметрами прокатки.

Цель работы: увеличение выхода годного за счет совершенствования математической модели расчета режимов горячей прокатки с дифференцированным учетом условий трения в клетях прокатного стана.

Сформулированы следующие задачи:

1. Провести полный факторный эксперимент по определению зависимостей влияния присадок на условия трения между рабочими валками и поверхностью обрабатываемой полосы при горячей прокатке.

2. Разработать математическую модель расчета контактных напряжений при прокатке с использованием водной эмульсии. Провести экспериментальную проверку результатов моделирования в промышленных условиях.

3. Разработать алгоритмы автоматической настройки стана горячей прокатки в пятиклетевой непрерывной группе.

4. Разработать рекомендации для совершенствования технологического процесса непрерывной горячей прокатки на стане горячей прокатки 2800 по увеличению выхода годного и снижению фестонистости на баночной ленте.

Объект исследования: процесс непрерывной прокатки полос из алюминиевых сплавов на промышленном пятиклетевом стане горячей прокатки 2800.

Предмет исследования: граничные условия процесса непрерывной прокатки полос из алюминиевых сплавов в зависимости от технологических режимов прокатки и с учетом параметров прокатной эмульсии.

Область исследования соответствует п. 1 «Закономерности деформирования материалов и повышения их качества при различных термомеханических режимах, установление оптимальных режимов обработки», п. 3 «Методы деформирования, формирующие в материалах структуру с комплексом физико-механических свойств, обеспечивающих повышение возможностей пластического формообразования заготовок и последующей эксплуатации изделий» паспорта специальности 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением.

Научная новизна работы:

1. Разработанная модель расчета контактных касательных напряжений, отличающаяся тем, что содержит в себе две составляющие: комбинированный закон трения по модели механического контакта твердых поверхностей с учетом дополнительного сопротивления деформации давления смазки и закон жидкостного

трения, доля участия той или иной составляющей определяется отношением толщины масляной пленки на контактной поверхности к комбинированной шероховатости.

2. Впервые предложено для определения фактора трения использовать функцию от следующих технологических параметров процесса прокатки: вязкости масляной фазы эмульсии, скорости прокатки, предела текучести и длины проекции дуги захвата на направление прокатки.

3. Получены экспериментальные данные по влиянию присадок на коэффициент трения при прокатке полос из алюминиевых сплавов с применением в качестве СОЖ водомасляной эмульсии.

Практическая значимость работы:

1. При помощи разработанной модели определены граничные условия для расчета контактных напряжений в клетях стана горячей прокатки 2800.

2. Разработанная модель внедрена в автоматическую систему управления технологическим процессом стана горячей прокатки 2800, в результате чего снижена отбраковка по утолщенным концам на горячекатаных рулонах.

3. С учетом предложенных изменений в составе эмульсола, усовершенствован процесс прокатки горячекатаных заготовок под корпусную ленту из сплава 3104БТ, в результате чего снижен показатель фестонистости.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Модель учета контактного взаимодействия рабочих валков и полосы при горячей прокатке алюминиевых сплавов с применением водной эмульсии.

2. Методика по определению фактора трения в условиях промышленного производства в зависимости от режимов обжатий, температурно-скоростных параметров процесса прокатки, реологических свойств обрабатываемого материала и состояния эмульсии.

3. Результаты экспериментальных исследований влияния химического состава водной эмульсии на показатели трения в очаге деформации в лабораторных и промышленных условиях.

Достоверность полученных результатов исследования определяется полнотой рассмотренного материала на достаточно высоком научно-теоретическом уровне с учетом современных достижений в теории обработки металлов давлением, применением современного комплекса Gleeble 3800 с модулем Hydrowedge, моделированием процесса горячей прокатки на лабораторном стане и верификации результатов в условиях промышленного производства АО «Самарского металлургического завода».

Апробация работы. Материалы диссертации были представлены и обсуждены на IX международном конгрессе «Цветные металлы и минералы», на Международной конференции «Ал21/Плоский прокат».

Публикации. Всего по теме исследования опубликовано 9 работ, среди которых 3 в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ и 5 в изданиях, индексируемых базой Scopus и Web of Science.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы в количестве 114 наименований и 3 приложений. Работа изложена на 171 странице, содержит 60 рисунков и 19 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность и степень проработанности темы, указывается цель работы и задачи, дается характеристика предмета, объекта исследования и научной новизны диссертации.

В **первой главе** описываются современные технологические процессы прокатки полос из алюминиевых сплавов, приведен обзор работ, посвященных расчетам и моделированию прокатки с учетом смазки, приведены параметры и методика исследования, а также отмечены преимущества и недостатки выбранного метода. Также были подробно рассмотрены модели, описывающие контактное взаимодействие между валком и поверхностью полосы, отмечены закономерности и коэффициенты, описывающие трение в зоне контакта. Рассмотрена модель трения Ванхайма Т. и Бэя Н. Описаны сложности, возникающие при применении в качестве СОЖ водной эмульсии. Представлен механизм формирования масляного клина в очаге деформации, а также рассмотрены функциональные свойства эмульсии в зависимости от ее состава. Указаны общие параметры эмульсии, которая используется на стане горячей прокатки 2800.

Во **второй главе** представлена математическая модель, позволяющая определять условия трения, встречающиеся при прокатке: граничное трение, смешанное трение, гидродинамическое трение. Блок схема модели представлена на рисунке 1.

В модели изменение фактической площади контакта выражается через коэффициент α , который в свою очередь определяется функцией от давления и показателя трения:

$$\alpha = A(p_k, m), \quad (1)$$

где m – фактор трения трения, а p_k отношение давления к пределу текучести.

В условиях граничного трения для расчёта контактных напряжений при пластической деформации микро-выступов на поверхности полосы целесообразно использовать закон Зибеля с учётом коэффициента α :

$$\tau = m\tau_s A(p_m, m), \quad (2)$$

где $\tau_s = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}$ – предел текучести при чистом сдвиге.

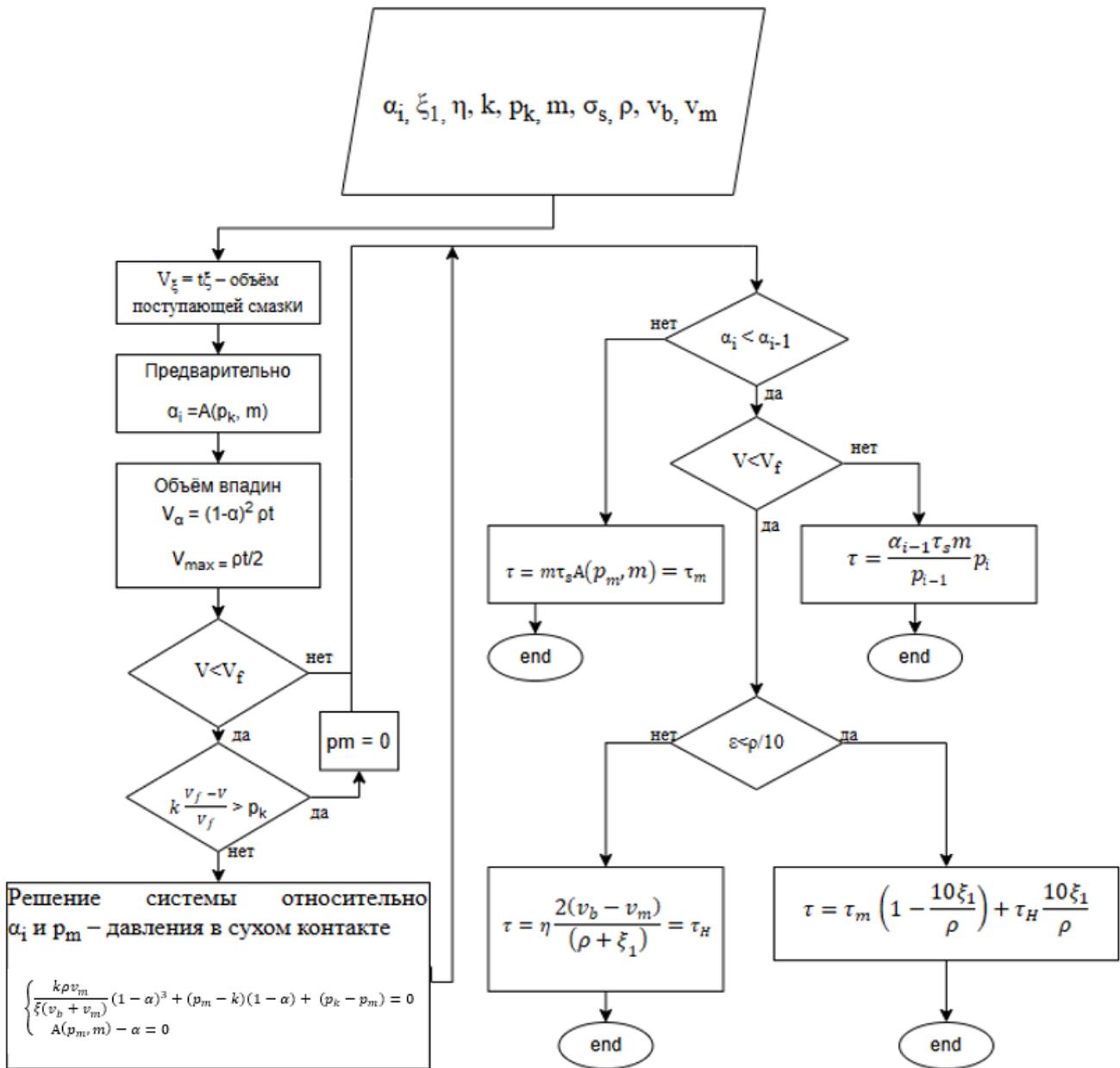


Рисунок 1 – Блок схема модели расчета контактных касательных напряжений

В условиях, когда деформации микровыступов локализована, для определения контактных напряжений более обосновано применять закон Амонтона–Кулона:

$$\tau = \frac{\alpha_{i-1} \tau_s m}{p_{i-1}} p_i, \quad (3)$$

где m – базовое значение фактора трения, которое может меняться в зависимости от условий прокатки и состояния смазки.

С учетом гидравлического давления смазки уравнения для определения контактного давления и фактической площади контакта образуют систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{k\rho v_m}{\xi(v_b + v_m)} (1 - \alpha)^3 + (p_m - k)(1 - \alpha) + (p_k - p_m) = 0 \\ A(p_m, m) - \alpha = 0 \end{cases}, \quad (4)$$

где: v_b – линейная скорость валка, v_m – скорость движения металла во входном сечении очага деформации, k – коэффициент сжимаемости смазки, ρ – комбинированная шероховатость, ξ – толщина смазочной пленки.

Для того, чтобы определять границу перехода от одного вида трения к другому, вводится параметр - толщина смазки на контакте твердых поверхностей, ξ_1 :

$$\xi_1 = \frac{V_\xi - V_\alpha}{t} = \frac{[V_\xi - \rho t(1 - \alpha_i)^2 / 2]}{t}, \quad (5)$$

где V_ξ – объем подаваемой смазки, V_α - объем впадин, а t - расстояние между микровыступами.

В условиях, когда толщина смазочной пленки значительно превышает комбинированную шероховатость, при расчетах необходимо пользоваться жидкостным законом трения и тогда контактные напряжения определяются по следующей формуле:

$$\tau = \eta \frac{2(v_b - v_m)}{(\rho + \xi_1)}, \quad (6)$$

где η – вязкость смазки.

При смешанном (полужидкостном) контактом взаимодействии касательные контактные напряжения вычисляются исходя из двух составляющих:

$$\tau = \tau_m \left(1 - \frac{10\xi_1}{\rho}\right) + \tau_H \frac{10\xi_1}{\rho}, \quad (7)$$

где τ_m – контактные касательные напряжения, определяемые по формуле (2), τ_H – контактные касательные напряжения, определяемые по формуле (6).

Разработанная модель позволяет рассчитывать контактные напряжения с применением законов трения, подходящих к условиям контактного взаимодействия, определяемого параметрами прокатки.

В третьей главе описана система контроля и регулирования технологических процессов стана горячей прокатки 2800, описан лабораторный стан, на котором проводился полнофакторный эксперимент по определению влияния присадок на условия трения.

Приведена методика определения реологических свойств обрабатываемого материала. Для описания данного постоянного уровня сопротивления деформации алюминиевых сплавов в зависимости от температурно-скоростных параметров деформации используется общепринятая формула Селларса:

$$\sigma_s = 1/\alpha \left(\operatorname{arcsch} \left(\frac{Z}{A} \right)^{1/n} \right), \quad (8)$$

где Z – это параметр Зенера–Холломона, который описывает деформационное поведение металлических материалов:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp \left(\frac{Q}{RT} \right), \quad (9)$$

A , α , n , Q – константы исследуемого материала, подлежащие определению регрессионным анализом по результатам экспериментов на установке Gleeble 3800; R – газовая универсальная постоянная; T – температура деформации (К).

Представлены параметры эмульсии, применяемой на стане промышленной прокатки.

Для разработки многофункциональной зависимости была рассчитана теоретическая толщина начальной пленки масляного клина и ее отношение к комбинированной шероховатости трущихся поверхностей при горячей прокатке полос из различных алюминиевых сплавов по заводским режимам в диапазоне изменения объемной доли масляной фазы от 3 до 6% (диапазон характерный для промышленных СОЖ). Коэффициенты давления-вязкости были взяты из справочников для современных минеральных масел.

Анализ теоретически рассчитанного соотношения толщины масляного клина к комбинированной шероховатости трущихся поверхностей в соответствии с критериями кривой Штрибека–Герси позволяет сделать вывод, что во время горячей прокатки полос из алюминиевых сплавов для черновых (предварительных) проходов характерны условия граничного трения, в то время как для чистовых (окончательных) проходов характерны условия смешанного (полужидкостного).

Приведены результаты экспериментальных исследований на лабораторном стане по влиянию присадок на величину контактного трения (рис. 2). Аппроксимацией экспериментальных данных получены формулы для определения коэффициента трения для клетки № 1 и клетки № 5:

$$\mu_1 = -0,05C - 0,01475E - 0,039K + 0,9124, \quad (10)$$

$$\mu_5 = -0,01C - 0,00679E - 0,0134K + 0,3152. \quad (11)$$

где C – концентрация масляной фазы эмульсии, %;

E – доля эфиров, %;

K – доля кислот, %.

На основе этих данных проведена оптимизация состава эмульсии для широкополосного полунепрерывного стана горячей прокатки. Оптимизация состава эмульсии проводилась с целью снижения текстурной неоднородности горячекатаных заготовок под баночную ленту за счет снижения до минимально допустимого предела сил трения при горячей прокатке.

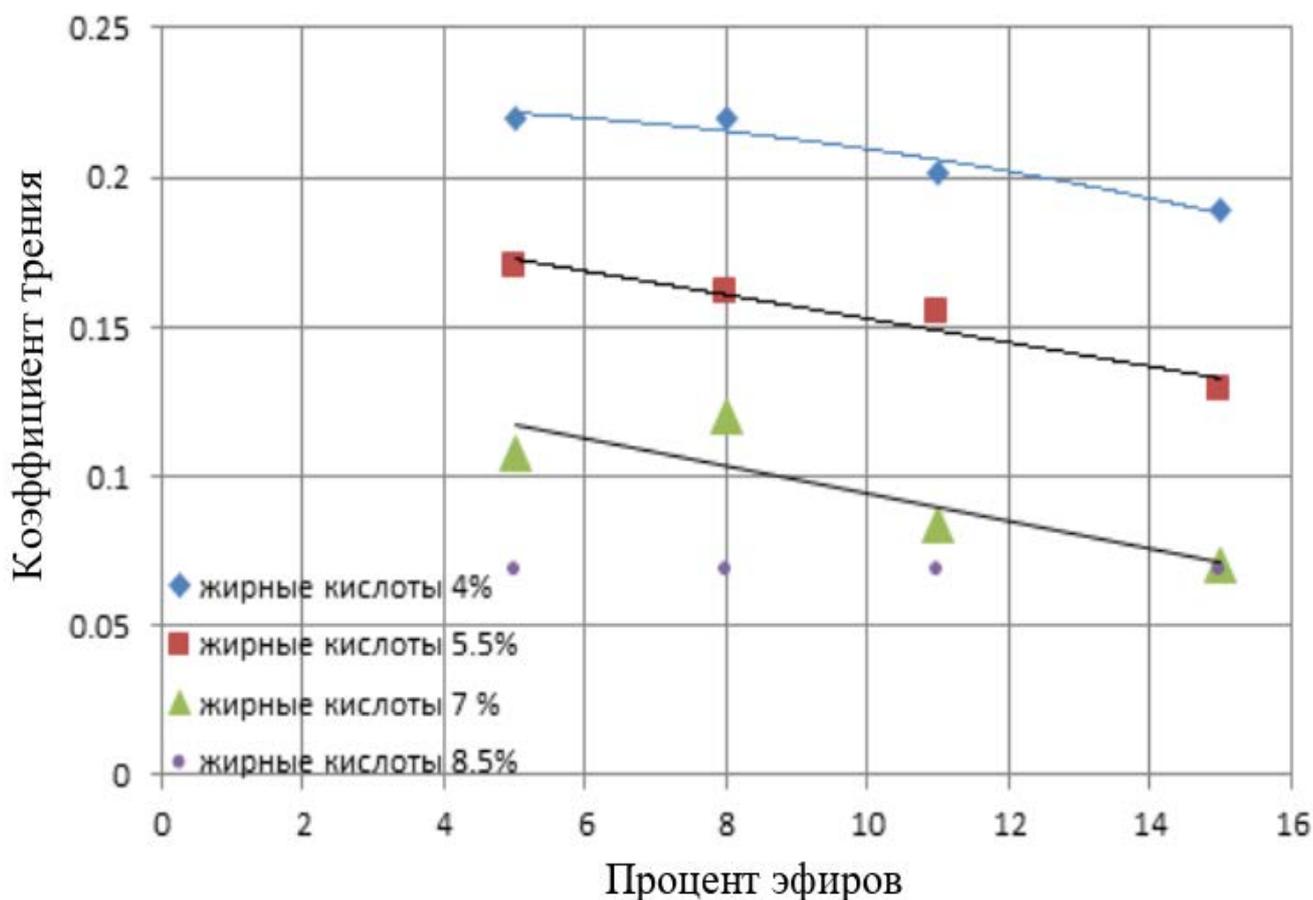


Рисунок 2 – Влияние присадок на коэффициент трения

Для дальнейшей оптимизации состава эмульсии был осуществлен промышленный эксперимент. В ходе эксперимента варьировались следующие параметры: концентрация эмульсии, содержание жирных кислот и их эфиров.

Окончательно состав эмульсола был скорректирован: содержание масла в эмульсии 3%; в масле содержание кислот 5,8–6,2% и эфиров 12,5–13,5%. Эмульсия с новой формулой позволяет получать полосы с фестонистостью, не превышающей 2.5%, и исключает дефект типа черных точек. Результат корректировки состава эмульсии представлен на рисунке 3.

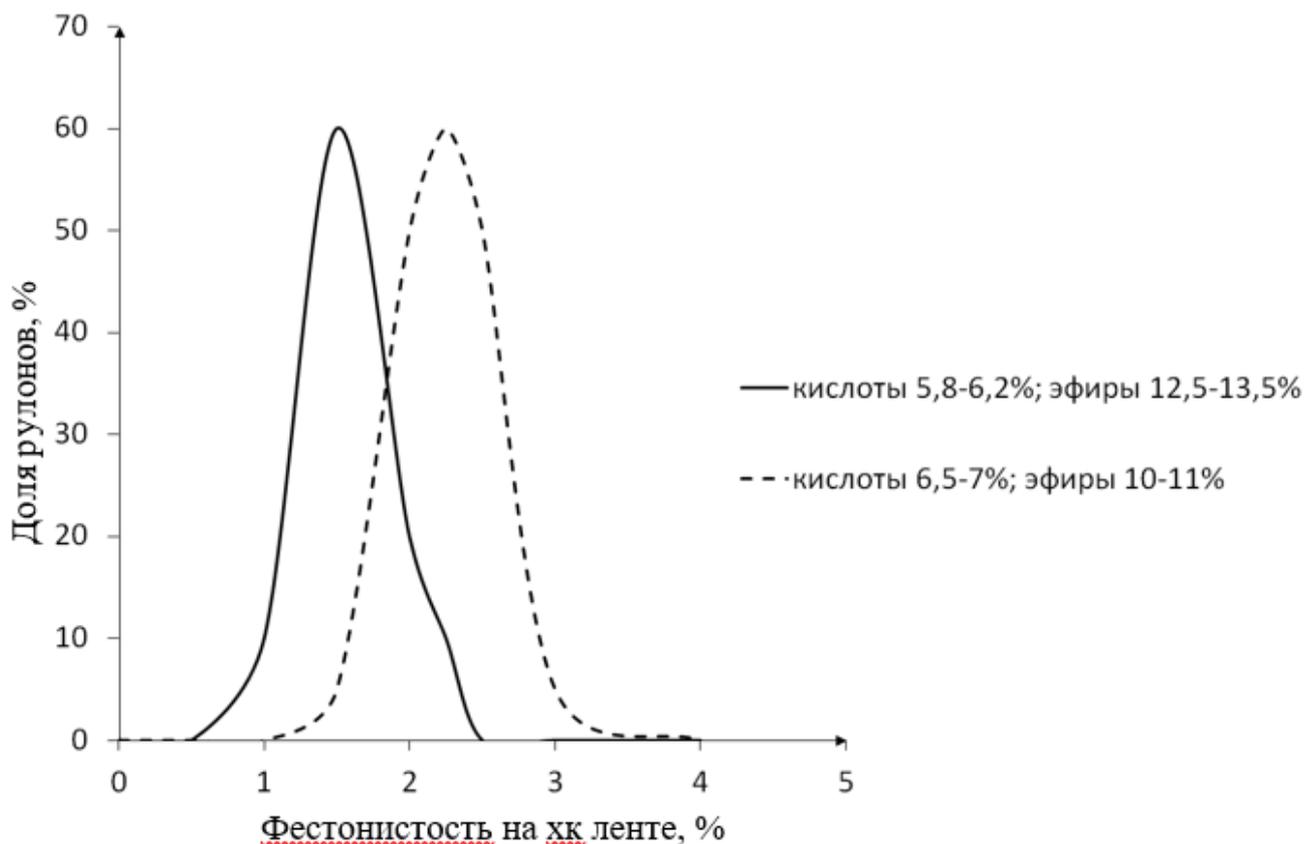


Рисунок 3 – Влияние эмульсии, используемой при горячей прокатке, на фестонистость после холодной прокатки

Четвертая глава включает в себя описание практического применения разработанных методик в промышленном производстве. Показана годовая статистика применения новой формулы эмульсии. Эмульсия показала достаточную для промышленного использования стабильность. За год на эмульсии с уточненным составом было обработано свыше 7000 горячекатаных заготовок под баночную ленту, среднее значение фестонистости снижено до уровня 2,7% на рулонах толщиной

0,245 мм, 2,8% на толщине 0,274 мм и 2% на толщине 0,4 мм.

На рисунке 4 представлены расчетные эпюры контактных напряжений на примере прокатки полосы из сплава AA5182 по клетям стана горячей прокатки, построенные при помощи разработанной модели.

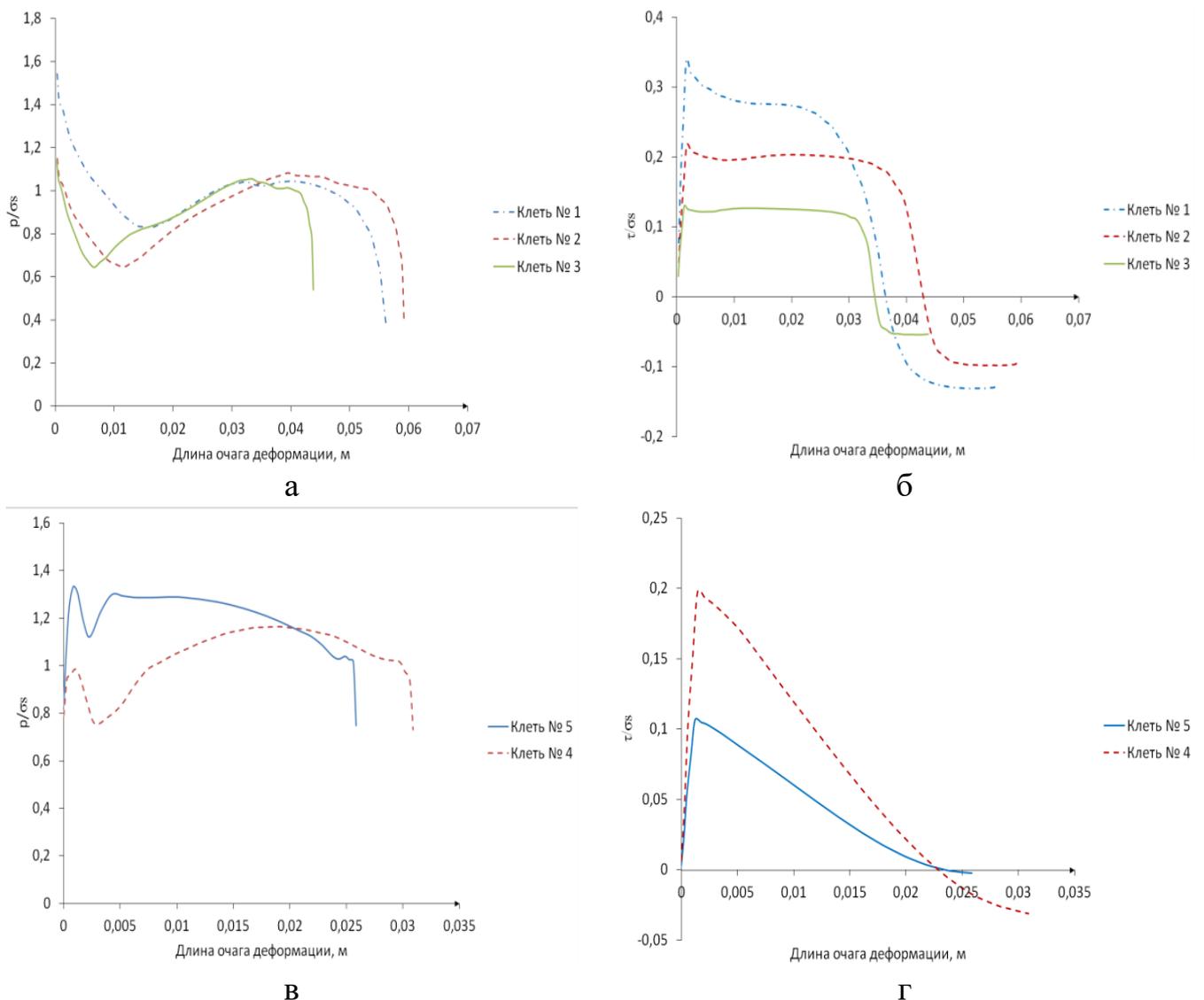


Рисунок 4 – Эпюры распределения величины нормального давления (а, в) и касательных напряжений (б, г) по длине очага деформации при прокатке полосы из сплава AA5182 в непрерывной группе стана горячей прокатки

Полученные эпюры на первых трех клетях соответствуют экспериментальным данным о контактных напряжениях, полученных при прокатке полос с отношением l_d/H_{cp} от 1,1 до 5 на валках с встроенными штифтовыми месдозами. Расчетный момент и усилие прокатки на всех клетях совпадают с фактическим значением с отклонением не более 3%. Увеличение скорости прокатки, снижение температуры полосы и уменьшение угла захвата на клетях №4 и №5 приводят к повышению количества смазки в пространстве между валком и полосой. В результате этого доля гидродинамической составляющей повышается, и эпюры напряжений принимают вид, характерный для жидкостного условия контакта. При расчетах необходимо учитывать параметры, влияющие на подачу смазки в очаг деформации.

Основываясь на вышеприведённом анализе разработана, методика по определению фактора трения в условиях промышленного производства в зависимости от режимов обжатий, температурно-скоростных параметров процесса

прокатки, реологических свойств обрабатываемого материала и состояния эмульсии.

При граничном трении контактные касательные напряжения будут определяться:

- фактической площадью контакта, получившейся в результате деформации микронеровностей, доля которой от геометрической поверхности контакта α вычисляется по формуле (1,4);

- фактором трения m , входящим в соотношения (1–4).

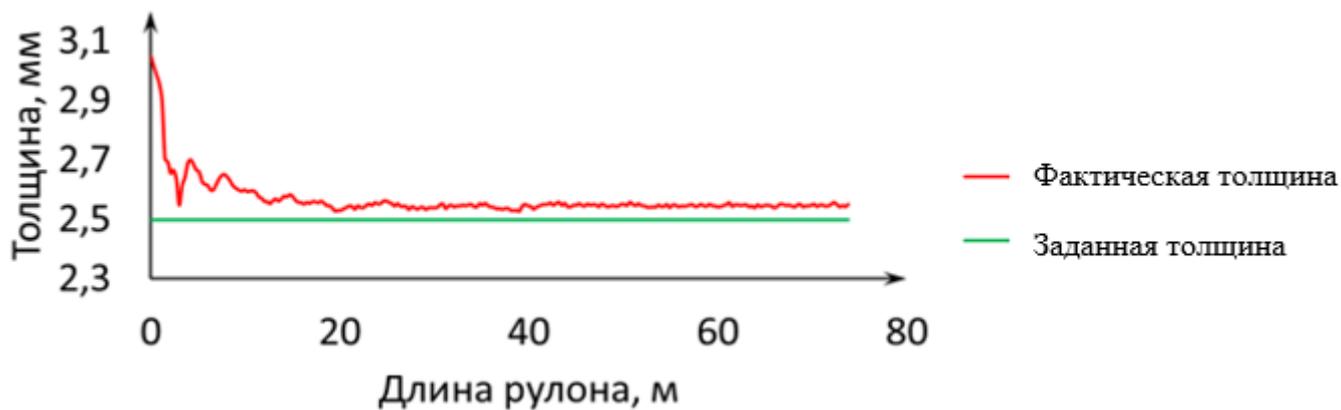
Для использования в расчетах фактор m должен быть определен путем пересчета из данных, полученных путем измерения на стане горячей прокатки. Расчет производится в два этапа: на первом (при известных температурах начала и окончания прокатки, усилиях прокатки, скоростях движения полосы, температуре и расходе эмульсии) вычисляются теоретические температуры деформации по клетям; на втором этапе по данным температурам и скоростям деформации рассчитываются значения напряжений и производится определение таких значений m , которые обеспечивают совпадение рассчитанных и измеренных показателей опережения с заданной точностью.

Повышение точности определения фактора трения m позволяет значительно повысить точность прогнозирования величины усилия прокатки, и за счет этого оптимизировать алгоритм начальной настройки стана на прокатку полосы.

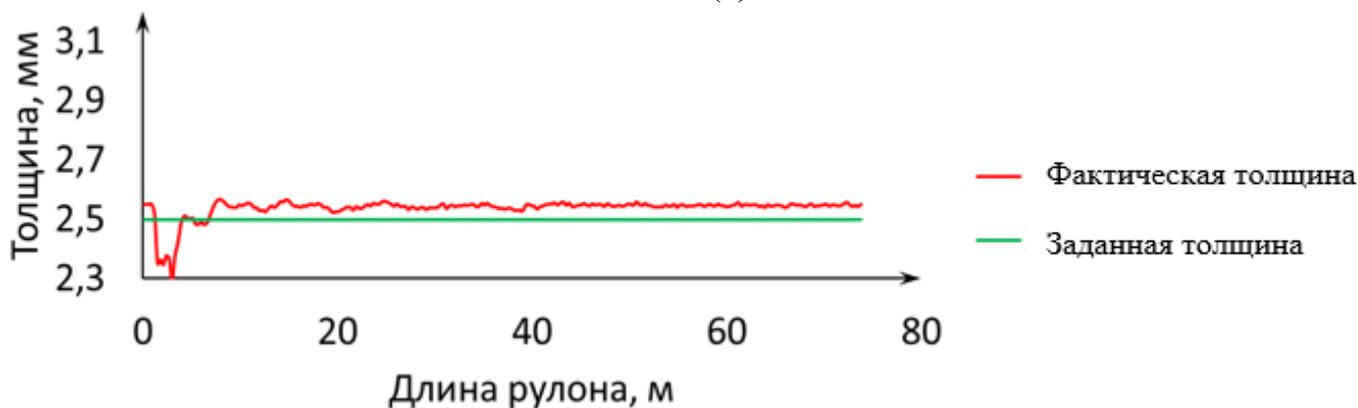
С применением разработанной модели определена функция для расчета фактора трения в зависимости от вязкости масляной фазы эмульсии η , скорости прокатки v , предела текучести σ_s и длины проекции дуги захвата на направление прокатки l_d :

$$m = 1.31 \left(\frac{\eta v}{\sigma_s l_d} \right)^{-0.42}. \quad (12)$$

Функция интегрирована в автоматическую систему управления стана. В результате внесенных изменений повышена точность расчетов режимов прокатки и значительно сократилась скорость адаптации системы. Длина дефектного конца рулона, на котором происходит настройка стана на требуемую толщину, сократилась с 80–100 м до 20–30 м (рисунок 5), что обеспечило увеличение выхода годного на 2%.



(а)



(б)

Рисунок 5 – График выхода толщины полосы на заданную: со старой моделью на основе формулы Леванова (а); по новой модели на основе уравнения (12) (б)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В диссертации на основе выполненных исследований предложены комплексные научно-технические и технологические решения, направленные на совершенствование процесса горячей прокатки посредством разработки новой математической модели, уточняющей условия трения на поверхностях в системе «рабочий прокатный валок – заготовка». Разработанная модель апробирована и внедрена в автоматическую систему управления технологическим процессом пятиклетевого стана горячей прокатки 2800. В процессе проведенных теоретических и практических исследований получены следующие результаты и выводы.

1. Разработана и предложена математическая модель расчета контактных напряжений при прокатке с использованием водной эмульсии. Особенности данной модели состоят: в едином подходе к моделированию различных режимов контактного трения, в учете влияния на величину истинной поверхности контакта механических свойств прокатываемого материала, комбинированной шероховатости материала и инструмента, геометрических и кинематических характеристик очага деформации и вязкости масляной фазы, в учете влияния размера частиц масляной фазы эмульсии на объем смазки поступающей в очаг деформации в единицу времени.

2. Разработанная модель прошла адаптацию на массиве данных, полученных с использованием автоматизированной системе управления непрерывной группой стана горячей прокатки. Усилие прокатки, рассчитанное с применением разработанной модели, с высокой степенью точности согласуются с фактическими замерами. Коэффициент детерминации при использовании модели составляет 0,9378, что говорит о ее адекватности, стандартное отклонение равно 0,064.

3. Соотношения, полученные на основе модели включены в алгоритм автоматической настройки клеток стана непрерывной горячей прокатки 2800, АО «Самарский металлургический завод».

4. С помощью метода физического моделирования определены аналитические зависимости по определению коэффициентов трения в зависимости от доли эфиров и кислот в составе эмульсола для каждой клетки непрерывной группы.

5. Проведены теоретические, экспериментальные и промышленные исследования влияния показателей эмульсии, температурно-скоростных параметров прокатки и свойств обрабатываемого материала на виды контактного трения между рабочим валком и поверхностью полосы. Установлено, что при содержании масляной фазы в эмульсии от 4 до 6% первые три клетки стана непрерывной прокатки работают в условиях граничного трения, а в чистовых клетях № 4 и № 5 вид трения носит смешанный характер (полужидкостной).

6. С учетом предложенных изменений в составе эмульсола оптимизирован процесс горячей прокатки полос из сплава 3104БТ. Применение эмульсии с уточненным составом эмульсола позволило снизить фестонистость на конечных рулонах до 2,7% на рулонах толщиной 0,245 мм, 2,8% при толщине 0,274 мм и 2% при толщине 0,4 мм.

7. Внедрение модели позволило сократить участок полосы, на котором идет настройка на годную толщину, с 80–100 м до 20–30 м, что позволило увеличить выход годного на 2%.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России

1. Латушкин И.А. Разработка методики учета влияния толщины смазочно-охлаждающей жидкости на коэффициент трения при горячей прокатке полос из алюминиевых сплавов / Латушкин И.А., Яшин В. В., Арышенский Е.В., Коновалов С.В., Клепов Д.Н., Шевелев Р.В. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2024. – № 12. – С. 42–48.

2. Латушкин И.А. Исследование антифрикционных свойств прокатной смазки для алюминиевых сплавов методом предельного обжатия / И.А. Латушкин, Е.В. Арышенский, В.В. Яшин, А.В. Баев // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 3. – С. 15-18.

3. Латушкин И.А. Физическое моделирование алюминиевого сплава 8011 с повышенным содержанием железа в условиях горячей деформации на комплексе Gleeble / И.А. Латушкин, Е.В. Арышенский, Н.Г. Колбасников, М.С. Тептерев // Производство проката. – 2018. – № 6. – С. 3-8.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science

4. Латушкин И.А. Математическая модель контактных напряжений при горячей прокатке полос из алюминиевых сплавов с использованием водной эмульсии / И.А. Латушкин // Технология легких сплавов. – 2024. – №4. – С.73-80.

5. Латушкин И.А. Применение математической модели расчета контактных напряжений при горячей прокатке полос из алюминиевых сплавов в условиях прокатки ленты из сплава AA5182 на пятиклетевом стане непрерывной прокатки / И.А. Латушкин, В.В. Яшин, Е.А. Суздальцев, Е. В. Арышенский // Технология легких сплавов. – 2025. – №1. – С.40-47

6. Латушкин И.А. Анализ формул расчета коэффициента трения применительно к горячей прокатке полос из алюминиевых сплавов / И.А. Латушкин, Е.А. Суздальцев, Д.Н. Клепов, В.В. Яшин, Е.В. Арышенский, С.В. Коновалов // Технология легких сплавов. – 2024. – № 2. – С. 62-67.

7. Latushkin I.A. A Study of Texture Component Distribution Over the Cross Section of an Aluminum Alloy 8011 Billet with Hot Rolling in a Four-Stand Continuous Group / I.A. Latushkin, V.V. Yashin, E.V. Aryshenskii, S.V. Konovalov, V.Y. Aryshenskii // Metal Science and Heat Treatment. – 2019. – Vol. 61, No. 5-6. – P. 300-304.

8. Латушкин И.А. Реологические свойства деформируемых алюминиевых сплавов 01570 и AA5182 в условиях горячей деформации / И.А. Латушкин, В.В. Яшин, С.В. Рушиц, Е.В. Арышенский // Цветные металлы. – 2019. – № 3. – С. 64-69.

В других изданиях:

9. Латушкин И.А. Анализ изгиба алюминиевой полосы с высоким очагом деформации с помощью компьютерного моделирования / И.А. Латушкин, Д.Н. Клепов, В.В. Яшин, Е.В. Арышенский, Ф.В. Гречников // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2022. – Т. 15, № 6. – С. 739-748.