

АЛДУНИН Анатолий Васильевич

ИССЛЕДОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛОС И ЛЕНТ ИЗ СТАЛИ И СПЛАВОВ
ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ С ЗАДАННЫМИ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ

Специальность 05.16.05 – «Обработка металлов давлением»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2011

Работа выполнена в Московском государственном открытом университете.

Официальные оппоненты:

профессор, доктор технических наук	Чиченёв Николай Алексеевич;
профессор, доктор технических наук	Гарбер Эдуард Александрович;
доктор технических наук	Трайно Александр Иванович.

Ведущая организация:

ОАО «Институт Цветметобработка».

Защита диссертации состоится 2 ноября 2011 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.060.02 при Учреждении Российской академии наук Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (Москва, Ленинский проспект, дом 49).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинский проспект, д. 49, Диссертационный совет Д 002.060.02, а также по электронной почте по адресу shelest99@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (Москва, Ленинский проспект, дом 49).

Автореферат разослан «___» _____ 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
профессор, доктор технических наук



А.Е. Шелест

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Расширение номенклатуры изготавливаемых конструкций, машин и приборов, эксплуатируемых в сложных условиях нагружения, предъявляет все более жесткие требования к комплексу физико-механических свойств и точности геометрических размеров полосового проката из стали и цветных металлов. Решающее влияние на структуру и свойства готовой продукции оказывают температурно-деформационные и скоростные условия горячей прокатки, последующего охлаждения и термообработки.

За последние десятилетия решены многие проблемы повышения эффективности процессов производства полосового проката. Однако, несмотря на большое число проведенных теоретических и экспериментальных исследований, актуальной остается проблема улучшения потребительских свойств производимых полос и обеспечения требуемого качества продукции из новых сплавов при минимальных затратах материальных и энергетических ресурсов.

Еще недостаточно изучены закономерности формирования структуры металла в процессе дробной деформации при горячей прокатке, а также не исчерпан ресурс пластичности и упрочнения новых материалов. Основные характеристики используемого технологического оборудования не всегда обеспечивают осуществление оптимальных по качественным показателям технологических режимов.

В связи с дальнейшим освоением быстродействующей управляющей и вычислительной техники большую актуальность имеют вопросы математического описания технологических процессов, включая физические явления в обрабатываемом металле, и разработки критериев оптимальности управления этими процессами.

Таким образом, исследование основных закономерностей формирования структуры и свойств при прокатке полос из различных металлов и сплавов, технологических и силовых ограничений, разработка математических моделей и алгоритмов имеют важное научное и практическое значение. Разработка на этой базе новых технологических и технических решений является актуальной задачей для листопрокатного производства.

Работа выполнена в соответствии с планами НИР МИСиС, ЛГТУ и МГОУ. Результаты исследований отмечены Серебряной медалью Международной выставки «Металл-Экспо» в 2005 году.

Цель работы. Совершенствование технологий производства полос и лент, разработка новых решений по управлению процессом их прокатки с использованием основных закономерностей формирования структуры и пластичности металла для получения заданных физико-механических свойств проката.

Для достижения поставленной цели в работе были сформулированы следующие задачи:

1) совершенствование методики физического моделирования условий формирования структуры низкоуглеродистой стали при дробной горячей деформации и последующем охлаждении применительно к условиям НШСГП;

2) разработка методики исследования продольной устойчивости прокатываемых полос при их боковом обжатии вертикальными валками;

3) исследование основных закономерностей и построение математических моделей формирования структуры и физико-механических свойств низкоуглеродистой стали и сплавов цветных металлов в условиях непрерывного и реверсивного полосовых станов горячей прокатки;

4) исследование напряженно-деформированного состояния прокатываемых полос с целью выравнивания распределения деформации по толщине, стабилизации уширения, обеспечения их продольной устойчивости в вертикальных валках и уточнения модели формирования структуры металла;

5) разработка основных принципов оптимизации процессов горячей прокатки полос по структуре и пластичности металла для создания на их основе усовершенствованных технологий производства, обеспечивающих повышение однородности физико-механических свойств готового проката;

6) использование результатов исследований при создании и внедрении новых технологических решений, обеспечивающих улучшение качества проката и повышение выхода годного.

Научная новизна. 1. Установлены основные закономерности и разработаны математические модели формирования заданной структуры при непрерывной горячей прокатке полос, учитывающие влияние параметров напряжен-

но-деформированного состояния металла в очаге пластической деформации; уточнена трехмерная диаграмма рекристаллизации аустенита стали СтЗсп в координатах «обратная температура – логарифм относительного обжатия – логарифм времени» для условий завершения первичной рекристаллизации и впервые построена подобная диаграмма для сплава «цинк-титан», позволяющие оптимизировать режим горячей прокатки полос по структуре и повышать однородность физико-механических свойств проката.

2. В результате уточнения и развития теории продольной устойчивости прокатываемых полос в горизонтальных и вертикальных валках полосового стана, минимизации процессов уширения, более полного использования ресурса пластичности металла и распределения деформации по толщине полосы установлены допустимые пределы изменения относительного обжатия, напряжения натяжения, температуры и скорости деформации для стабилизации процесса прокатки и улучшения качества металла.

3. Научно обоснована и разработана методология построения алгоритма расчета начальной настройки чистовой группы клетей НШСГП на производство проката с заданными структурой и механическими свойствами.

4. Разработаны и научно обоснованы зависимости физико-механических свойств бериллиевой бронзы и цинк-титанового сплава от основных технологических параметров, позволяющие производить прокат требуемого качества с широким диапазоном свойств в соответствии с международными стандартами.

5. Впервые установлена обобщенная зависимость величины предельного относительного обжатия ε_b раската от отношения размеров h/b и модуля упругости E в широком диапазоне их изменения при прокатке сплавов черных и цветных металлов в вертикальных валках полосовых станов для получения качественной продукции и развития математического обеспечения систем настройки валков.

Практическая значимость и реализация результатов работы. 1. Внедрен новый режим прокатки укрупненной полосовой заготовки из бериллиевой бронзы толщиной 6 мм за восемь проходов вместо девяти на двухвалковом стане 700×1300 (технологическая инструкция ТИ СМК-23/27-6-2003); уменьшено с четырех до трех число прокатных переделов; освоен выпуск лент с более ши-

роким диапазоном механических свойств и точностью по толщине, соответствующими требованиям международных стандартов; выход годного увеличен на 8,8 % за счет стабилизации структуры и механических свойств, а также сокращения расслоений, краевых трещин и обрывов при прокатке (Московский завод по обработке цветных металлов).

Результаты исследований использованы при проектировании нового завода по производству плоского проката из пружинных сплавов.

2. Разработанные математические модели структурообразования низкоуглеродистой стали СтЗсп используются в алгоритмах расчета сопротивления деформации прокатываемых полос в системе начальной настройки клеток чистой группы стана 2000; применение данных моделей повысило точность настройки стана, улучшило структуру и увеличило стабильность механических свойств производимых горячекатаных полос в 1,2-1,8 раза (Ново-Липецкий металлургический комбинат).

Усовершенствованный алгоритм расчета настройки НШСП необходим при разработке систем автоматического управления качеством горячекатаных стальных полос и технологическом проектировании станов нового поколения.

3. Разработаны температурно-деформационные и скоростные режимы горячей и неполной горячей прокатки полос из сплава «цинк-титан» на реверсивном четырехвалковом стане 400/1000×1000, при которых ресурс пластичности обрабатываемого материала используется более полно, чем по действующей технологии. Внедренный режим неполной горячей прокатки цинк-титанового сплава обеспечил улучшение и стабилизацию комплекса механических свойств готового проката с уменьшением диапазона их разброса в 1,4-1,6 раза (Московский завод по обработке цветных металлов).

4. Разработаны и внедрены рациональные режимы обжатий по ширине полос при горячей прокатке медных сплавов на реверсивном двухвалковом стане 850×1000, обеспечивающие уменьшение разноширинности на выходе из стана в среднем на 4 мм без потери продольной устойчивости полосы и перегрузки валков (Кольчугинский завод по обработке цветных металлов).

5. Разработанная методика расчета распределения пластической деформации по всему сечению прокатываемой полосы для уточнения числа проходов

и соответственно усилий используется при проведении занятий по дисциплине «Теория обработки металлов давлением» (Московский государственный открытый университет).

6. Использование и внедрение результатов работы в промышленности позволило получить экономический эффект около 15,2 млн. руб. и освоить производство новых видов прокатной продукции.

Обоснованность и достоверность основных положений и результатов диссертации определяется применением аналитических методов исследования, использованием фундаментальных основ теории прокатки, методов математической статистики, современных методов физического моделирования и пластометрических испытаний, применением компьютерных технологий и практической реализацией в условиях реального производства.

Личный вклад соискателя. При проведении исследований, результаты которых опубликованы в соавторстве, диссертантом предложены основные идеи и выполнены теоретические, технологические и технические разработки, а также сделан обобщающий анализ результатов.

Положения, выносимые на защиту. 1. Развитая методика и опытная установка для физического моделирования условий структурообразования стали при производстве полос на НШСП.

2. Основные закономерности и математические модели формирования заданной структуры низкоуглеродистой стали при непрерывной горячей прокатке полос и последующем охлаждении, учитывающие влияние напряженно-деформированного состояния металла в очаге пластической деформации.

3. Основные закономерности формирования физико-механических свойств бериллиевой бронзы и цинк-титанового сплава при прокатке полос на реверсивных станах.

4. Развитая теория продольной устойчивости полосы при боковом обжатии вертикальными валками полосового стана.

5. Основные принципы оптимизации процесса горячей прокатки полос по структуре и пластичности сплавов с использованием построенных диаграмм рекристаллизации и диаграммы предельной пластичности.

6. Усовершенствованный алгоритм расчета начальной настройки чистой группы клеток НШСГП на производство проката с заданной структурой и стабильными механическими свойствами, учитывающий энергосиловые и технологические ограничения, а также требования к геометрии полос.

Апробация результатов диссертации. Основные материалы работы лично доложены и обсуждены на: Всес. научно-техн. семинаре «Автоматизация листовых станов горячей прокатки», г. Кривой Рог, 1977 г.; Всес. научно-техн. конференции «Современные проблемы повышения качества металла», г. Донецк, 1978 г.; Всес. научно-техн. семинаре «Прогрессивные технологические процессы в производстве холоднокатаного листа», г. Липецк, 1981 г.; Всес. научно-техн. семинаре «Прогрессивные технологические процессы в производстве холоднокатаного листа», г. Липецк, 1985 г.; VII-ой Всес. научно-техн. конференции «Теплофизика технологических процессов», г. Тольятти, 1988 г.; Республиканской научно-техн. конференции «Наука – производству», г. Набережные Челны, 1990 г.; 7-ой Международной научно-техн. конференции «Моделирование и исследование сложных систем», г. Севастополь, 2000 г.; Всес. научно-техн. конференции «Ресурсоэнергосбережение – XXI век», г. С.-Петербург, 2000 г.; Международной научно-техн. конференции «Теория и практика производства проката», г. Липецк, 2001 г.; 4-ом Конгрессе прокатчиков, г. Магнитогорск, 2001 г.; научно-техн. конференции МГВМИ и Союза кузнецов «Состояние, проблемы и перспективы развития металлургии и обработки металлов давлением» г. Москва, 2003 г.; Международной научно-техн. конференции «Теория и практика производства листового проката», г. Липецк, 2005 г.; Бернштейновских чтениях по термомеханической обработке металлических материалов, г. Москва, 2006 г.; Всероссийской научно-техн. конференции «Состояние, проблемы и перспективы развития металлургии и обработки металлов давлением», г. Москва, 2007 г.; Международной научно-техн. конференции «Теория и практика производства листового проката», г. Липецк, 2008 г.; Международной научно-техн. конференции «Нанотехнологии и наноматериалы», г. Москва, 2009 г.; 6-ой Международной научно-практ. конференции «Современные технологии в области производства и обработки цветных металлов», г. Москва, 2009 г.; 8-ом Конгрессе прокатчиков, г. Магнитогорск, 2010 г.; Второй

международной научно-техн. конференции «Павловские чтения», г. Москва, 2010 г.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в монографии, 9 тезисах докладов, 41 научной статье, в том числе 22 публикациях в журналах, рекомендованных ВАК РФ, и двух изобретениях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 8 глав, выводов, 7 приложений. Она изложена на 369 страницах машинописного текста, содержит 95 рисунков, 44 таблицы, список использованных источников содержит 384 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Состояние вопроса и усовершенствование методов разработки технологий прокатки полос

Анализ качества производимых полос

Химическая неоднородность выплавляемой на НЛМК стали существенна от плавки к плавке и охватывает весь диапазон содержания элементов по ГОСТ, что может давать разницу в значениях σ_B стали СтЗсп до 118 МПа. Средние значения содержаний элементов в стали СтЗсп: 0,166 % C; 0,473 % Mn; 0,0066 % N и 0,047 % Al. Среднеквадратические отклонения от средних значений составили: $S_C = 0,0018$ %; $S_{Mn} = 0,0051$ %; $S_N = 0,00007$ % и $S_{Al} = 0,0021$ %.

Средние значения механических свойств полос толщиной 4-6 мм из стали СтЗсп, прокатываемых на стане 2000, и среднеквадратические отклонения от них составляют: $\bar{\sigma}_B = 466-472$ МПа, $S_{\bar{\sigma}_B} = 2,4-2,5$ МПа; $\bar{\sigma}_T = 326-338$ МПа, $S_{\bar{\sigma}_T} = 2,2-2,3$ МПа; $\bar{\delta} = 30,2-31,9$ %, $S_{\bar{\delta}} = 0,26-0,27$ % и $\overline{KCU}^{-20} = 0,83-0,92$ МДж/м², $S_{\overline{KCU}^{-20}} = 0,016-0,018$ МДж/м². Примерно в 20 % случаев σ_B выходит за верхний и до 10 % случаев δ – за нижний пределы допустимых по ГОСТ 14637-89 значений.

Результаты металлографического исследования образцов от полос толщиной 8 мм (СтЗсп) показали, что значения коэффициента вариации γ_d распре-

деления зерна лежат в пределах 59-67 %, в то время как для однородной структуры (ГОСТ 5639-82) это значение составляет $(49 \pm 2) \%$.

Таким образом, в условиях НШСГП одними из важнейших резервов стабилизации механических свойств металла являются снижение его разнотерности и регламентация среднего размера зерна феррита.

Колебания химического состава выплавляемого на Московском заводе ОЦМ сплава «цинк-титан» от партии к партии значительны. Средние значения содержания легирующих элементов: 0,114 % *Cu*; 0,079 % *Ti* и 0,0017 % *Al*. Среднеквадратические отклонения от средних значений составили соответственно: $S_{Cu} = 0,0445 \%$; $S_{Ti} = 0,0071 \%$ и $S_{Al} = 0,0018 \%$.

Для полос толщиной 0,7 мм, прокатываемых на стане 400/1000×1000, значения статистических характеристик по механическим свойствам равны: $\bar{\sigma}_B = 179,8$ МПа; $S_{\bar{\sigma}_B} = 7,5$ МПа; $\bar{\sigma}_{0,2} = 120,7$ МПа, $S_{\bar{\sigma}_{0,2}} = 6,4$ МПа; $\bar{\delta} = 60,5 \%$ и $S_{\bar{\delta}} = 8,7 \%$. Механические свойства проката из цинк-титанового сплава соответствуют требованиям стандарта, но их стабильность невысока – гистограммы имеют размытый характер.

После полунепрерывной разливки бериллиевых бронз концентрация бериллия в поверхностных слоях слитка из-за ликвации достигает 3 % при средней по объему 1,9 %. Статистические характеристики механических свойств лент толщиной 0,15-0,25 мм из бериллиевой бронзы БрБ2 в состоянии «твердое + старение»: $\bar{\sigma}_B = 1253$ МПа, $S_{\bar{\sigma}_B} = 77,1$ МПа; $\bar{\delta} = 1,54 \%$, $S_{\bar{\delta}} = 0,56 \%$ абс.; $\overline{HV} = 396,8$, $S_{\overline{HV}} = 12,0$; $\bar{t} = 3,95$ и $S_{\bar{t}} = 0,42$ (до старения). Механические свойства укладываются в пределы, определяемые ГОСТ 1789-70, но выходят за пределы норм стандарта *ASTM B 194*. Стабильность механических свойств не достаточно высокая – гистограммы имеют размытый характер.

Толщина производимых лент из бериллиевой бронзы нестабильна от партии к партии. Среднее значение толщины лент из сплава БрБ2, прокатанных на номинальную толщину $h_n = 0,25$ мм, составляет $\bar{h} = 0,243$ мм и среднеквадратическое отклонение $S_{\bar{h}} = 0,073$ мм. Толщина проката соответствует требованиям ГОСТ 1789-70, но до 30 % лент выходят за нижний предел требований стан-

дарта EN 1654. Современные требования потребителей по толщине лент в 2-3 раза выше норм российских стандартов.

Выход годного при производстве лент из бериллиевой бронзы по действующей на МЗОЦМ технологии не превышает 60 %.

Среднее значение ширины полос из меди М1, прокатанных на стане 850×1000 Кольчугинского завода ОЦМ на ширину 665^{+10} мм, для их середины составляет $\bar{B}_c = 671,9$ мм и среднеквадратическая ошибка $S_{\bar{B}} = 2,3$ мм, а для конца $\bar{B}_k = 674,1$ мм и $S_{\bar{B}} = 1,7$ мм. Ширина концов около 25 % полос выходит за максимально допустимый российским стандартом предел.

Проведенный анализ показывает, что в ряде случаев имеется несоответствие качества плоского проката, производимого по действующим технологиям, нормам российских и международных стандартов. Разброс показателей качества полос и лент из стали, цветных металлов и сплавов – механических свойств и геометрии обусловлен колебаниями химического состава материала, несовершенством технологий и нестабильностью их параметров.

Усовершенствование методов разработки технологий прокатки полос

Процесс формирования показателей качества металла при прокатке полос и лент различных сплавов протекает последовательно по технологическим стадиям черновой и чистовой прокатки, а также последующей упрочняющей обработки (рис. 1).

При наличии входных воздействий формирование показателей качества осуществляется под воздействием управляющих воздействий. На разных стадиях обработки действуют различные ограничения.

Формируемые при черновой прокатке показатели качества раската – толщина $H_{нк}$ и ширина $B_{нк}$ подката, относительная поперечная разнотолщинность $\delta H / H$, средний размер зерна \bar{d} и вариация его распределения γ_d . При чистовой прокатке формируются толщина h и ширина b полосы, ее продольная Δh и относительная поперечная $\delta h / h$ разнотолщинность, относительная величина амплитуды волны или короба проката A / λ , средний размер зерна \bar{d} и вариация его распределения γ_d , коэффициент анизотропии зерна $\bar{d}_{\downarrow} / \bar{d}_{\leftrightarrow}$. В результате

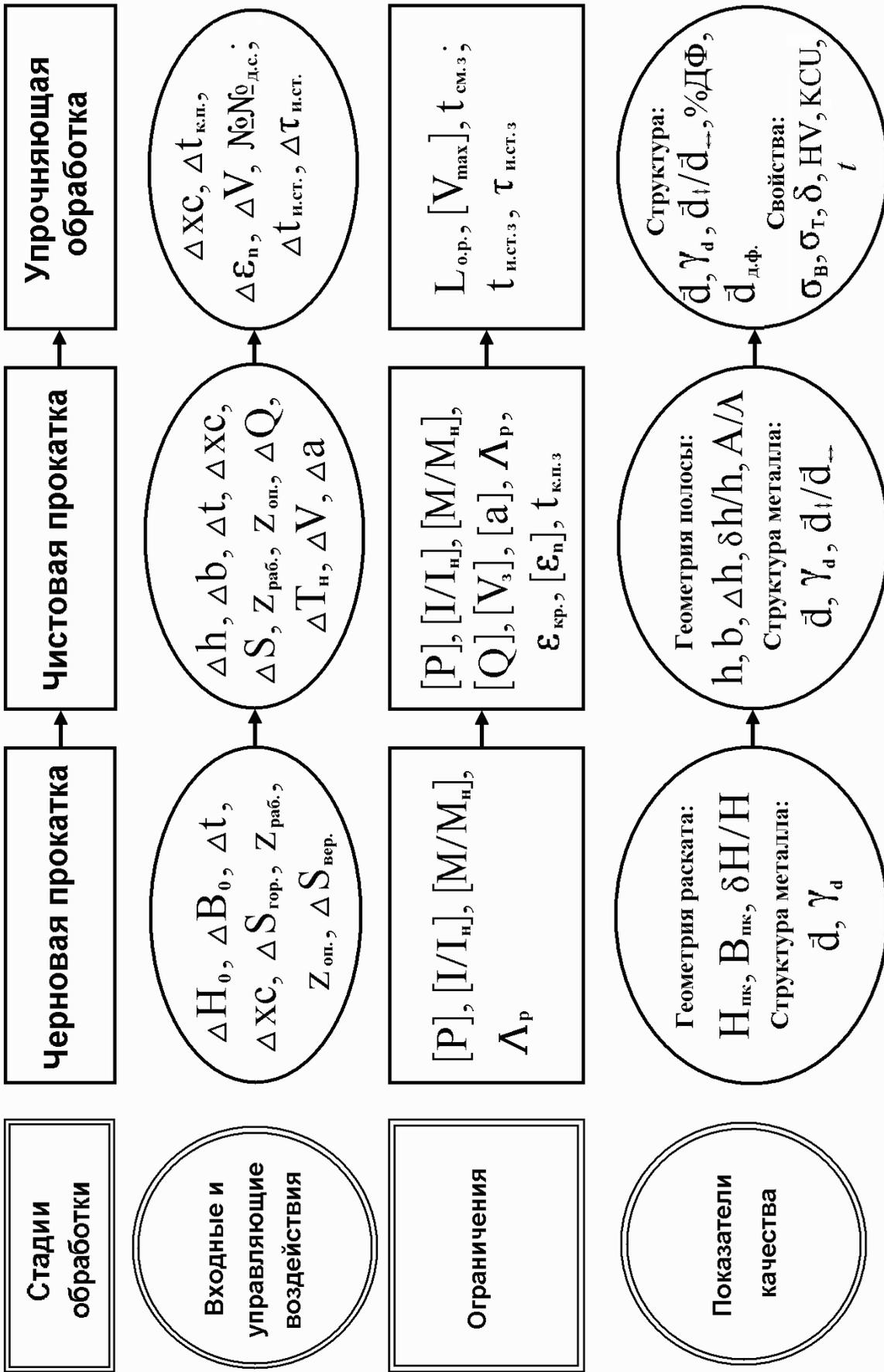


Рис. 1. Схема формирования показателей качества металла при прокатке полос и лент

упрочняющей обработки формируются окончательные показатели качества структуры (средний размер зерна \bar{d} , вариация его распределения γ_d , коэффициент анизотропии зерна $\bar{d}_{\uparrow} / \bar{d}_{\leftrightarrow}$, объемная доля дисперсной фазы $\%ДФ$, средний размер ее частиц $\bar{d}_{д.ф.}$) и физико-механические свойства металла (временное сопротивление σ_B , предел текучести σ_T , относительное удлинение δ , твердость HV , ударная вязкость KCU , глубина вытяжки по Эриксену t и др.).

Предложен усовершенствованный метод разработки технологий прокатки полос из различных сплавов (рис. 2).

Для получения готовых полос с заданной структурой и стабильными физико-механическими свойствами необходимы достоверные данные о сопротивлении металла деформации, предельной пластичности, основных закономерностях формирования структуры, равномерности деформации по толщине полосы и продольной устойчивости при обжатии раската вертикальными валками. Математические модели, построенные на основе этих данных, должны быть дополнены известными моделями формирования геометрии полосы. Для настройки полосового стана на производство качественной продукции требуется разработка критериев оптимизации процесса прокатки по структуре и пластичности деформируемого металла. Выбор одного из этих критериев оптимизации определяется конкретным сплавом, состоянием исходной заготовки (литая или горячекатаная) и условиями данного технологического процесса. После расчета режима прокатки по заданной структуре или ресурсу пластичности металла необходимы проверка равномерности деформации по толщине полосы, определение режимов обжатия полосы в вертикальных валках и ее натяжения. Вычисленные в итоге параметры напряженно-деформированного состояния в очаге деформации следует использовать для корректировки математической модели формирования структуры металла.

Для сплавов черных и цветных металлов характерны общие разновидности упрочнения в процессе термомеханического воздействия, а также одни и те же стадии последующего разупрочнения.

Однако, из-за различного характера изменения пластических свойств в температурном интервале обработки, основная часть исследуемых сплавов была условно разделена на две группы:

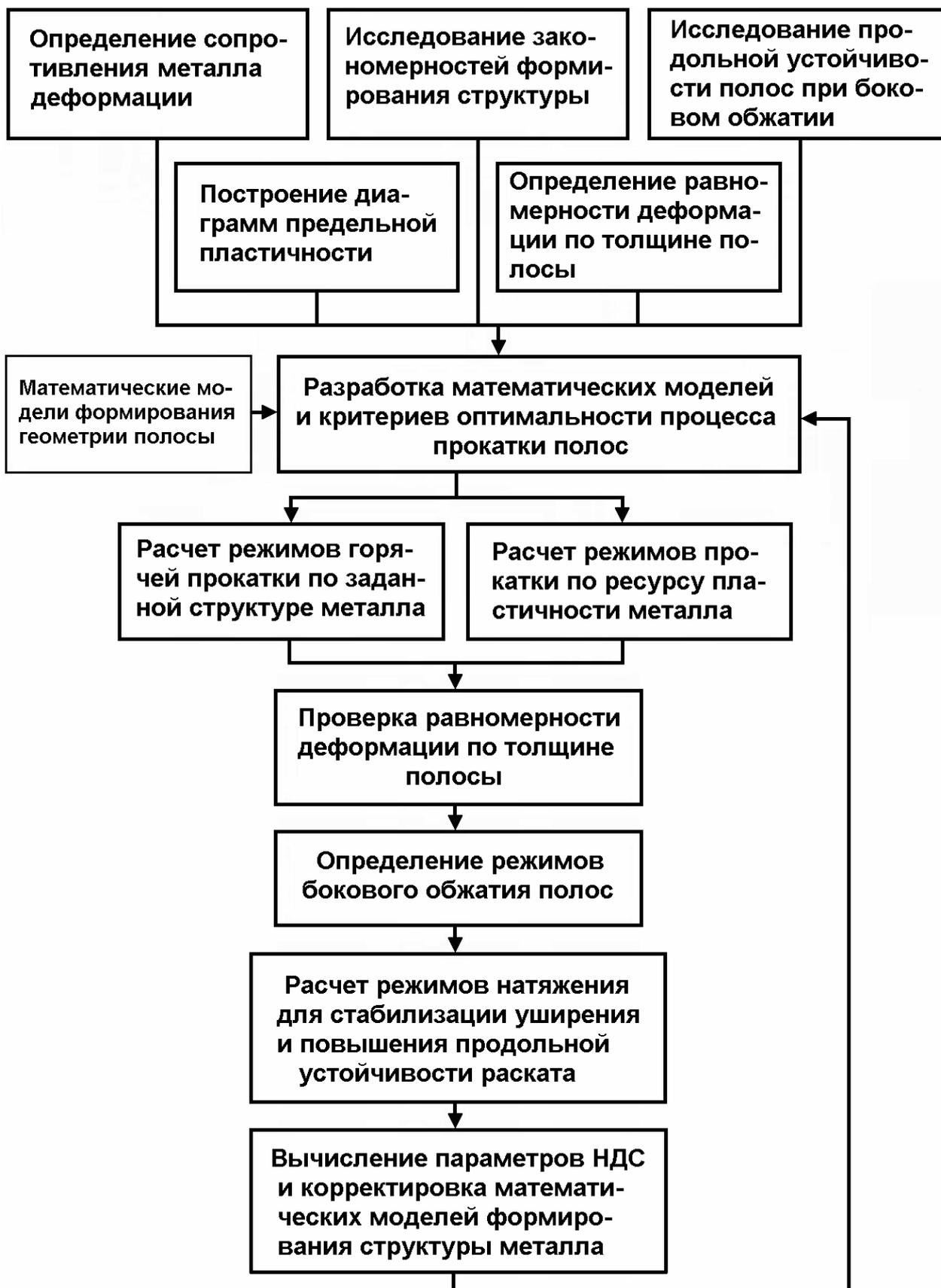


Рис. 2. Усовершенствование методов разработки технологий прокатки полос

- 1) с монотонно изменяющейся пластичностью. Представитель группы – низкоуглеродистая сталь СтЗсп (промышленный стан – НШСГП 2000 НЛМК);
- 2) с немонотонно изменяющейся пластичностью. Представители группы – бериллиевая бронза БрБ2 и сплав «цинк-титан» (технологический комплекс и стан Кварто 400/1000×1000 МЗОЦМ).

На меди и ее сплавах (М1, М3, МНЦ 15-20, Л68) проведены исследования продольной устойчивости полос при обжати вертикальными валками полосового стана (промышленные станы Дуо 260×400 и Дуо 850×1000 ЗАО «Кольчугцветмет»).

2. Методика исследований и обработки результатов экспериментов

Для моделирования дробной горячей деформации на НШСГП на базе лабораторного двухвалкового стана 250×400 была создана экспериментальная установка. Нижний прокатный валок стана выполнен трехступенчатым.

Для прокатки образцов из стали СтЗсп промышленной плавки (0,15 % *C*, 0,52 % *Mn*, 0,22 % *Si*, 0,037 % *S*, 0,019 % *P*, 0,031 % *Cu*, 0,033 % *Ni*, 0,052 % *Al*, 0,0065 % *N* и 0,008 % *O*) была принята средняя скорость деформации 100 с^{-1} (скорость прокатки $V_m = 5 \text{ м/с}$). Клиновидные образцы размером 5(10)×30×150 мм вырезали вдоль направления прокатки из раската, прокатанного в черновой группе НШСГП 2000 НЛМК на толщину 20 мм и охлажденного на воздухе. Деформация за первый проход менялась в пределах 0-50 % по длине клиновидного образца. Во втором проходе получали деформацию по длине 10-19 или 26-36 %. Разработанный блок автоматики обеспечивал паузу между двумя проходами 1 или 3 с и выдержку после второго прохода 0,3, 3 или 9 с. Перед прокаткой все образцы имели одинаковый размер зерна (нагрев 1100°C, 15 мин) и прокатаны сразу либо с подстуживанием и выдержкой 10 мин при температуре 1000, 950, 900 и 800°C. Прокатанные образцы после выдержки на воздухе сбрасывались в 12 %-ный раствор *NaCl* для частичной ребровой закалки. Таким образом, на одном образце получали набор относительных обжатий от 0 до 50 % по длине и набор скоростей охлаждения от 10 до 1000°C/с по ширине.

В разных поперечных сечениях образцов бывшее зерно аустенита выявлено травлением и измерено на микроскопе МИМ-7 и структурном анализаторе “Eriquant” методом секущих (по 200-250 хорд на сечение). Определяли среднюю величину хорды \bar{d} , вариацию ее распределения γ_d , среднеквадратические отклонения $S_{\bar{d}}$ и S_{γ} , доверительные интервалы $\pm \Delta \bar{d}$ для вероятности $P = 0,99$. Для отдельных образцов оценивали коэффициент анизотропии зерна E .

Для исследования продольной устойчивости при прокатке на полосовом двухвалковом стане 260×400 с вертикальными калиброванными роликами без натяжения и с натяжением раската разработан роликовый измеритель со сменной стрелочной индикаторной головкой типа ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм.

Результаты экспериментов обрабатывали методами математической статистики, в том числе с применением пакета стандартных компьютерных программ «Статистика 6».

3. Исследование формирования структуры полос из низкоуглеродистой стали

По результатам физического моделирования получены данные о формировании структуры аустенита стали СтЗсп при прокатке в один и два прохода (рис. 3).

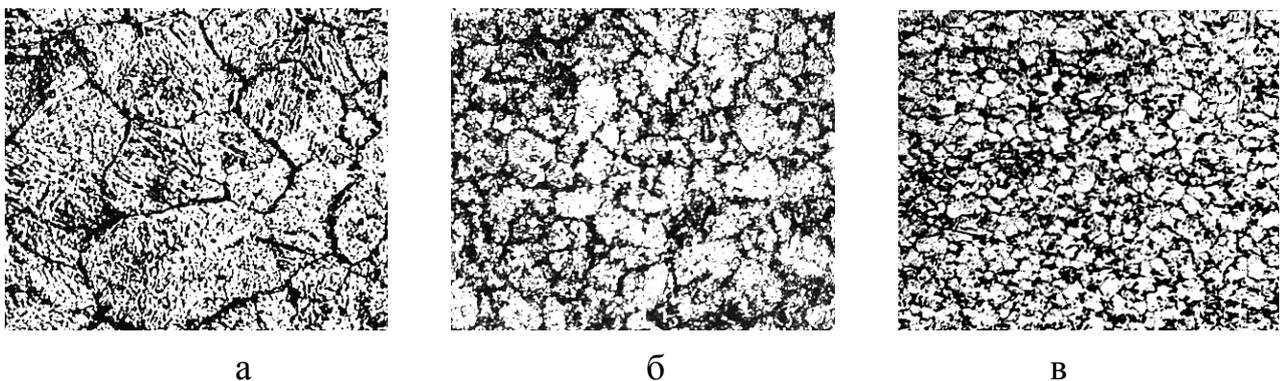


Рис. 3. Бывшее зерно аустенита стали СтЗсп при прокатке в один (б) и два (в) прохода ($\times 120$):
 а) исходное состояние; б) $t = 1070^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 50\%$, $\tau = 0,3$ с; в) $t = 930-920^\circ\text{C}$, $\varepsilon_1 = 40\%$, $\tau_{1-2} = 1$ с, $\varepsilon_2 = 36\%$, $\tau = 0,3$ с

Время первичной рекристаллизации после прокатки с относительными обжатиями 20-50 % при температуре 1070°C не превышает 0,3 с, а при 975°C – 1 с. Размер рекристаллизованного зерна составляет 30-48 мкм при исходном 80-82,5 мкм. При понижении температуры прокатки до 880°C время первичной рекристаллизации для относительных обжатий более 20 % составляет 1-3 с, а размер зерна – 25-35 мкм.

После прокатки с обжатием 10 % при $t = 880-975^\circ\text{C}$ и $\tau > 1$ с формируется разнородная структура.

Прокатка образцов при температуре 910-930°C в два прохода с обжатием в каждом из них по 10 % показала, что при паузах между обжатиями 1-3 с и выдержках после прокатки 0,3-9 с структура разнородная.

Основное влияние на размер рекристаллизованного зерна аустенита низкоуглеродистой стали СтЗсп при непрерывной горячей прокатке оказывает степень деформации и ее распределение по проходам, а также размер зерна перед деформацией.

Распределение деформации по толщине полос оценивали методом винтов при прокатке клиновидных образцов. При $\varepsilon_{\text{ср}} = 15$ % на глубине 1 мм $\varepsilon = 10$ %, а в поверхностном слое $\varepsilon = 21$ %. С увеличением среднего относительного обжатия до 30 % неравномерность деформации по толщине становится незначительной.

Металлографические исследования структуры, выполненные на двух клиновидных образцах, прокатанных при 880°C (первый после прокатки выдержан на воздухе 9 с и подвергнут частичной закалке, второй – охлажден на воздухе до комнатной температуры), дали практические данные для определения связи зерна аустенита и феррита при скоростях охлаждения в диапазоне фазовых превращений $W_{\gamma \rightarrow \alpha}$ от 2 до 37°C/с.

4. Исследование формирования физико-механических свойств и структуры полос из сплавов цветных металлов

Методом испытаний сплошных цилиндрических образцов на торсионном пластометре при скоростях деформации $\dot{\varepsilon} = 0,1-10 \text{ с}^{-1}$ в интервале температур t

= 450-800°C, применительно к условиям прокатки полосовых заготовок на двухвалковом стане 700×1300, исследовали реологические свойства бериллиевой бронзы БрБ2. Сопротивление пластической деформации σ_s сплава значительно зависит от температуры t , истинной деформации $\bar{\varepsilon}$ и скорости деформации $\dot{\varepsilon}$. Изменение температуры испытания с 450 до 800°C при неизменных значениях $\bar{\varepsilon}$ и $\dot{\varepsilon}$ приводит к существенному снижению сопротивления деформации ($\Delta\sigma_s = 246-330$ МПа).

В качестве показателя пластичности сплава БрБ2 была принята степень деформации сдвига Λ_p в момент разрушения образца при кручении. В координатах « $\Lambda_p - t - \lg \dot{\varepsilon}$ » построена диаграмма предельной пластичности сплава. Максимум диаграммы для разных скоростей деформации $\dot{\varepsilon}$ (0,1, 1 и 10 с⁻¹) соответствует $t = 650^\circ\text{C}$. При этой температуре и $\dot{\varepsilon} = 0,1$ с⁻¹ величина Λ_p достигает своего наибольшего значения 2,70. Определена область высокой пластичности сплава БрБ2: $t = 550-750^\circ\text{C}$; $0,1 \text{ с}^{-1} \leq \dot{\varepsilon} \leq 10 \text{ с}^{-1}$.

Пластометрическое моделирование первых четырех проходов при прокатке полосовой заготовки на двухвалковом стане 700×1300 показало, что происходит частичное суммирование деформационного наклепа по проходам. В итоге сопротивления в 4-ом проходе повышается на 12-15 %.

В условиях Московского завода ОЦМ исследовали влияние температуры t и времени искусственного старения τ на временное сопротивление σ_b и относительное удлинение δ сплава БрБ2 при различных исходных состояниях лент (A , $\frac{1}{4}H$, $\frac{1}{2}H$, H). Старение при $t = 300-340^\circ\text{C}$ и $\tau = 30-240$ мин обеспечивает максимальную прочность для всех исходных состояний ($\sigma_b = 1274-1431$ МПа).

На основе анализа многолетних производственных данных МЗОЦМ были определены границы изменения механических свойств бериллиевой бронзы марки БрБ2 в зависимости от степени деформации ε при холодной прокатке.

Исследовали зависимость механических свойств лент из бериллиевой бронзы БрБ2 от размера зерна (в мягком состоянии) и от содержания бериллия (мягкое состояние + старение). Уменьшении размера зерна с 33,3 до 10,0 мкм и увеличение среднего содержания бериллия в сплаве с 1,87 до 2,02 % дают одинаковый средний прирост σ_b около 46 МПа.

Исследовали процессы упрочнения-разупрочнения цинк-титанового сплава. Клиновидные образцы размерами $3(6) \times 20 \times 110$ мм из сплава «цинк-титан» промышленной партии (0,11 % *Cu*, 0,084 % *Ti*, 0,01 % *Al*, 0,002 % *Cd*, 0,007 % *Pb*, < 0,001 % *Sn*, 0,003 % *Fe*, остальное *Zn*) прокатывали на двухвалковом стане 300×450 со скоростью $V = 0,36$ м/с. Образцы вырезали из полученной с агрегата БПЛ-1000 заготовки ($h = 7$ мм) вдоль направления прокатки. Перед прокаткой все образцы нагревали в электропечи при температуре 275-277°C 45 мин. Далее образцы прокатывали либо сразу, при температуре 270°C, либо, после подстуживания на воздухе, при 220, 170 и 70°C. После прокатки и выдержки 1 – 10 с на воздухе или 40 – 600 с в печи при температуре прокатки полученное состояние фиксировали охлаждением образцов в воде. В 5-7 точках по длине прокатанных образцов производили измерения твердости по Виккерсу (HV_5), по 3-4 измерения на каждую точку. В поперечных сечениях образцов травлением выявляли зеренную структуру (рис. 4).

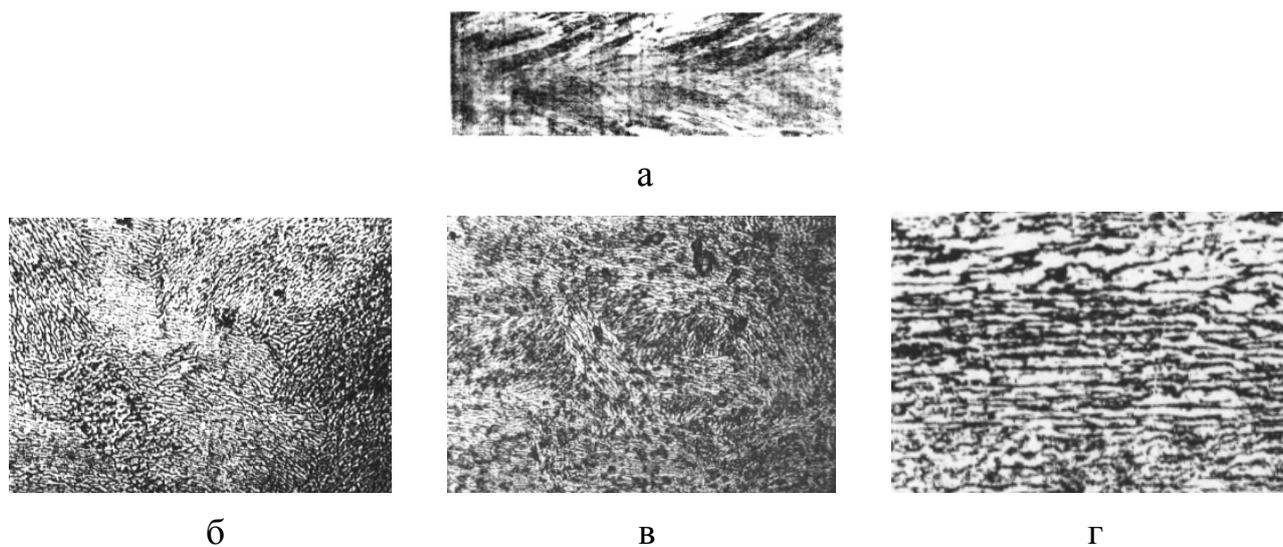


Рис. 4. Структура сплава «цинк-титан»:

а) после нагрева под прокатку $t = 275^\circ\text{C}$, $\tau = 45$ мин ($\times 3$);
после прокатки ($\times 115$):

б) $t = 270^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 20\%$, $\tau = 5$ с; в) $t = 270^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 30\%$, $\tau = 40$ с;

г) готовая полоса ($h = 0,7$ мм)

Установлено, что изменение среднего значения твердости и вариации ее распределения отражает стадии разупрочнения цинк-титанового сплава.

На двухвалковом стане 300×450 выполнили физическое моделирование условий формирования механических свойств полос при прокатке на реверсивном четырехвалковом стане 400/1000×1000. Карты из сплава «цинк-титан» ($h_0 = 7$ мм, $b_0 = 200$ мм, $l_0 = 180, 120$ и 90 мм) прокатывали за 1÷8 проходов ($V = 0,36$ м/с) с температурами начала прокатки 150, 190 и 270°С, паузами между обжатиями 32-33 с и последующим охлаждением на воздухе.

При $t_{н.п.} = 150^\circ\text{С}$ пластичность материала в начале прокатки наиболее низкая – относительное удлинение δ после 2-го прохода составляет 17,7 %.

При числе проходов более шести ($\varepsilon_\Sigma > 81\%$) обнаружен эффект атермического разупрочнения, когда после двух последних проходов σ_v уменьшается с 290,1-299,6 до 167,2-180,1 МПа.

5. Исследование условий достижения предельных напряжений и деформаций прокатываемых полос

Качество прокатываемых полос во многом зависит от распределения пластической деформации по их толщине, колебания уширения, продольной устойчивости и режима натяжения.

Распределение пластической деформации по толщине полосы

При рассмотрении задачи распределения деформации использовали метод линий скольжения.

Для тонко- и среднелистовой прокатки, заменяя граничные линии скольжения отрезками прямых, определяли угол скольжения.

На основе расчета углов захвата для условий горячей прокатки стали при коэффициенте контактного трения $f = 0,35$, коэффициенте Пуассона $\mu = 0,5$, разных значениях относительного обжатия ε и отношения половины толщины полосы к радиусу вала, получили графическую зависимость относительного обжатия $\varepsilon_{пл}$, приводящего к распределению пластической деформации по всей толщине полосы, от $h_0/2R$ (рис. 5). Применительно к условиям горячей прокатки полос из различных сплавов для диапазонов изменения $h_0/2R = 0,025-0,375$, $f = 0,30-0,57$ и $\mu = 0,3-0,5$ получена аналитическая зависимость для расчета $\varepsilon_{пл}$:

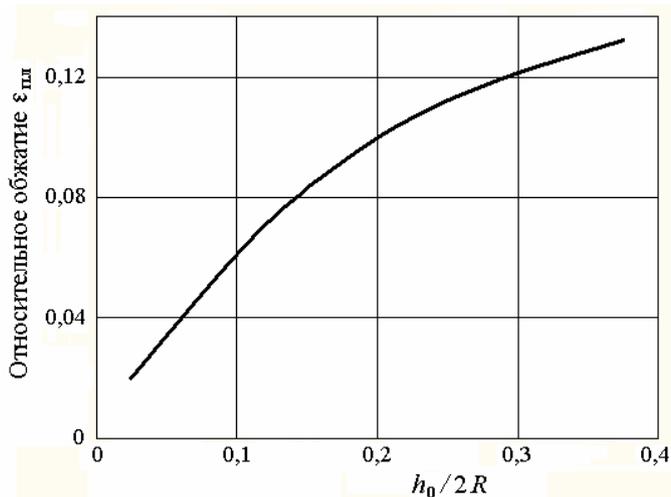


Рис. 5. Зависимость относительного обжатия $\varepsilon_{\text{пл}}$, приводящего к распределению пластической деформации по всей толщине при горячей прокатке стальных полос, от $h_0/2R$

$$\varepsilon_{\text{пл}} = a_0 + \frac{e^{a_1 \cdot \frac{h_0}{2R}}}{e^{0,19 \cdot f}}, \quad (1)$$

где a_0, a_1 - коэффициенты, зависящие от μ ($a_0 = -0,9038 + 0,0272 \cdot \mu^3$, $a_1 = 0,2490 + 0,1848 \cdot \mu^3$).

Зависимость (1) позволяет определять относительное обжатие, необходимое для распределения пластической деформации по всей толщине полосы при горячей прокатке различных сплавов.

Определение условий минимизации уширения при производстве полос

Использовали расчетные значения относительной величины нейтрального угла γ/α в зависимости от отношения радиуса рабочего вала к толщине полосы на входе в очаг деформации R/h_0 , относительного обжатия ε , а также коэффициентов заднего ξ_0 и переднего ξ_1 натяжения по методу Л.С. Кохана.

Для условий прокатки полос на различных станах были построены графические зависимости $\gamma/\alpha = f(R/h_0, \varepsilon)$, которые затем аппроксимировали регрессионными зависимостями. Так, например, для холодной прокатки лент из сплава БрБ2 с задним натяжением ($\xi_0 = 0,8$) получены следующие уравнения:

$$\frac{\gamma}{\alpha} = 0,00106 \cdot \frac{R}{h_0} - 1,4467 \cdot \varepsilon + 1,9667 \cdot \varepsilon^2 + 0,2254; \quad (2, \text{а})$$

$$\frac{\gamma}{\alpha} = 0,00175 \cdot \frac{R}{h_0} - 1,3051 \cdot \varepsilon + 1,9667 \cdot \varepsilon^2 - 0,0023 \cdot \frac{R}{h_0} \cdot \varepsilon + 0,1830. \quad (2, \text{б})$$

Используя критерий минимизации уширения ($\Delta b = \min$), дифференцируем уравнение (2, а) по ε и приравниваем полученный результат нулю, откуда оптимальное значение $\varepsilon_{\text{опт.}} = 0,3678$.

Вычисляем 2-ю производную и определяем ее знак $\frac{d^2(\gamma/\alpha)}{d\varepsilon^2} = 3,9334 > 0$.

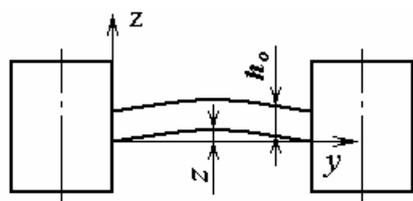
Таким образом, $\varepsilon_{\text{опт.}} = 0,3678 = \varepsilon_{\text{max}}$.

Дифференцируем уравнение (2, б) по ε и приравняем полученный результат нулю, получаем оптимальное отношение $(R/h_0)_{\text{опт.}} = 61,6$. Результаты расчетов промышленно апробированы на стане 125/380×320 Московского завода ОЦМ.

Продольная устойчивость полос при прокатке в вертикальных валках

Величина прогиба z полосы (рис. 6) под действием вертикальных валков при упругой деформации может быть определена из уравнения Эйлера:

$$E \cdot I \cdot \frac{d^2 z}{dy^2} = -P_y \cdot z, \quad (3)$$



где E – модуль упругости материала полосы; I – момент инерции при деформировании полосы вертикальными валками; P_y – усилие прокатки в вертикальных валках.

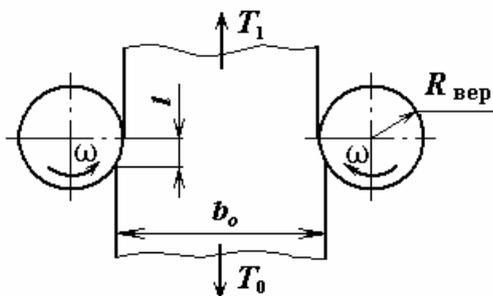


Рис. 6. Схема прокатки полосы в вертикальных валках

На основе решения уравнения (3) получена формула для определения критического усилия устойчивости полосы с исходной шириной b_0 :

$$P_y^{kp} = (\pi^2 \cdot E \cdot I) / b_0^2. \quad (4)$$

При упруго-пластическом изгибе момент инерции I для полос определяется зависимостью $I = (b_0 \cdot h_0^3) / 8$.

Относительное среднее давление при прокатке определяли по формуле А.А. Королева с последующим уточнением по нашей методике:

$$n_{cp} = \frac{2}{\varepsilon_{вер} \cdot \delta} \left[\left(\frac{1}{1 - \varepsilon_{вер}} \right)^{\frac{\delta-1}{2}} + \frac{\varepsilon_{вер}}{2} - 1 \right], \quad (5)$$

где $\varepsilon_{\text{вер}}$ - относительное обжатие; $\delta = 2f/\alpha$ - параметр прокатки; f - коэффициент контактного трения; α - угол захвата.

Среднее сопротивление металла в очаге деформации будет $\sigma_{cp} = n_{cp} \cdot \sigma_s$.

После определения усилия прокатки в вертикальных валках рассчитываем величину прогиба по формуле, полученной по методике Н.М. Беляева с нашими опытными данными:

$$z = \chi \cdot \frac{P_{\text{вер}} \cdot b_0^3}{48 \cdot E \cdot I}, \quad (6)$$

где χ - экспериментальный коэффициент (для стали $\chi = 0,10 - 0,11$ и для латуни $\chi = 0,09 - 0,12$).

По данной зависимости уточняется режим обжатия полос без натяжения.

При непрерывной прокатке с натяжением усилие прокатки изменяется. Положение нейтрального сечения очага деформации определяется отношением $Z = h_0/h_H$, где h_H - толщина полосы в нейтральном сечении. Параметр Z является сложной функцией нескольких переменных.

По результатам многочисленных расчетов для горячей прокатки с натяжением ($\xi_0 = \xi_1 = 0,8$) получена упрощенная зависимость для определения Z :

$$Z = -0,043 + 0,009 \cdot R/h_0 + 0,983 \cdot (R/h_0)^2 + 1,685 \cdot \varepsilon. \quad (7)$$

Для горячей прокатки последовательно определяются относительные обжатия для зоны отставания $\varepsilon_{\text{от}}$ и общее ε , а также параметры упрочнения $k_0 = 1 + \varepsilon_{\text{от}}$, $k_1 = (1 + k_0)/2$ и $k_2 = (k_0 + \varepsilon + 1)/2$.

Получено также уравнение для определения относительного среднего общего сопротивления пластической деформации σ_{cp}/σ_{s0} :

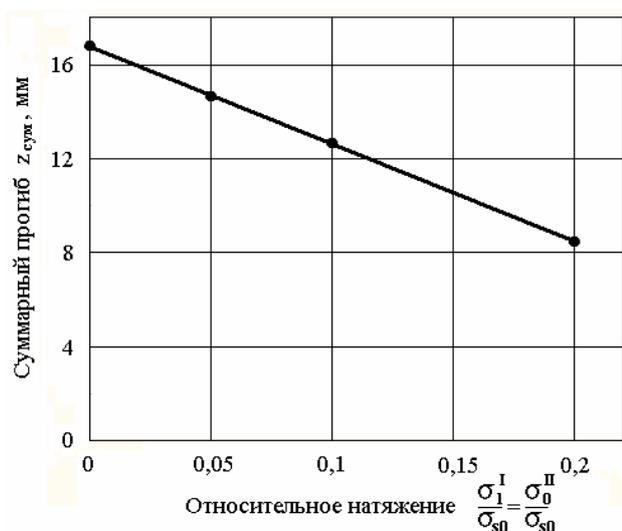
$$\sigma_{cp}/\sigma_{s0} = 1,12 + 0,12 \cdot \varepsilon \cdot R/h_0. \quad (8)$$

Продольное напряжение σ_l определяли из условия пластичности. Тогда на выходе из i -ой клетки непрерывного стана:

$$\sigma_l/\sigma_{s0} = 1,12 + 0,12 \cdot \varepsilon_i \cdot (R/h_i) - 1. \quad (9)$$

Действующее на полосу в межклетевом промежутке за i -ой клетью продольное усилие от горизонтальных валков $P_l = \sigma_l/\sigma_{s0} \cdot k_i \cdot \sigma_{s0} \cdot h_i \cdot b_i$ учитывали

при определении суммарного прогиба $z_{\text{сум}} = z - z_{\text{гор}}$, где $z_{\text{гор}}$ – величина компен-



сации прогиба под действием усилия от горизонтальных валков.

На рис. 7 представлен пример результатов подобных расчетов.

Рис. 7. Зависимость суммарного прогиба полосы (сталь Ст3, 30×1850 мм, $\varepsilon_y = 0,04$, $t = 1060^\circ\text{C}$) от натяжения в межклетевом промежутке

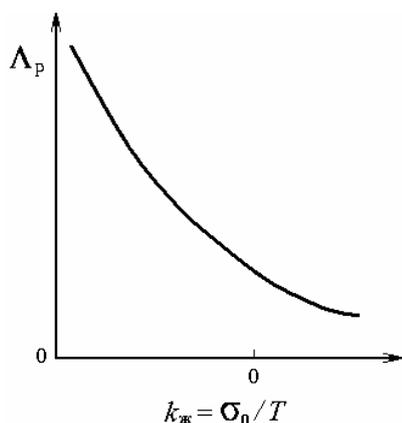
Таким образом, исправлять прогиб следует в процессе прокатки с применением межклетевого натяжения, которое позволяет минимизировать усилие прокатки.

Использование ресурса пластичности деформируемого металла

Для процессов с дробной деформацией в качестве критерия оптимальности может быть принята общая степень использования запаса пластичности материала:

$$\psi = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Lambda}{\Lambda_p} \right)_i^a < [\psi], \quad (10)$$

где Λ - степень деформации сдвига, $\Lambda = 2\sqrt{\varepsilon_z^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_z \cdot \varepsilon_y}$; ε_z , ε_y - относительные деформации обжатия и уширения; Λ_p - предельная величина степени деформации сдвига; i – номер прохода; n – количество проходов; $[\psi] = 0,90$ – допустимый запас использования пластичности; a – коэффициент суммирования запасов по проходам.



Коэффициент жесткости напряженного состояния:

$$k_{\text{ж}} = \frac{\sigma_0}{T} = \frac{\bar{\sigma}_z + \bar{\sigma}_y + \bar{\sigma}_x}{\sqrt{3}}, \quad (11)$$

Рис. 8. Схема диаграммы пластичности

где $\sigma_0 = \frac{\sigma_z + \sigma_y + \sigma_x}{3}$ – среднее напряжение; $\bar{\sigma}_z = \frac{\sigma_z}{\sigma_{T0}}$, $\bar{\sigma}_y = \frac{\sigma_y}{\sigma_{T0}}$, $\bar{\sigma}_x = \frac{\sigma_x}{\sigma_{T0}}$ – относительные напряжения; $T = \pm \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$ – интенсивность касательных напряжений.

Из условия пластичности, а также статической связи между поперечным σ_y и продольным σ_x напряжениями:

$$\sigma_x \cdot b_0 \cdot h_0 = \sigma_y \cdot h_0 \cdot l. \quad (12)$$

Подставляя в равенство (12) выражение длины дуги захвата $l = \sqrt{\Delta h \cdot R}$, получаем:

$$\sigma_x = (\sqrt{\Delta h \cdot R} \cdot \sigma_y) / b_0. \quad (13)$$

После всех преобразований для процесса прокатки:

$$k_{эс} = - \left[\bar{\sigma}_{z.сп} \left(\frac{\Delta h \cdot R}{b_0} + 2 \right) - 1 \right] / \sqrt{3}. \quad (14)$$

6. Разработка математических моделей и алгоритма настройки НШСГП на производство качественных стальных полос

Модель структурообразования полосы в условиях НШСГП

Для низкоуглеродистой стали СтЗсп построена уточненная трехмерная диаграмма рекристаллизации аустенита в координатах « $1/T - \lg \varepsilon - \lg \tau$ », позволяющая определять состояние зерна аустенита после каждого обжатия, перед началом последующего. Диаграмма содержит следующие области: *A* – инкубационного периода первичной рекристаллизации; *B* – первичной рекристаллизации; *C* – инкубационного периода собирательной рекристаллизации; *D* – собирательной рекристаллизации.

Границы областей диаграммы разделены гиперплоскостями, которые для пределов изменения $t = 880-1070^\circ\text{C}$, $\tau = 0,3-60$ с и $\varepsilon = 0,1-0,5$ описываются уравнениями:

$$\frac{1}{T} \cdot 10^4 = 0,6733 \cdot \lg \tau + 0,3914 \cdot \lg \varepsilon + 8,9202 \quad - \text{ для границы } A - B; \quad (15)$$

$$\frac{1}{T} \cdot 10^4 = 0,7728 \cdot \lg \tau + 0,7922 \cdot \lg \varepsilon + 8,6647 \quad - \text{ для границы } B - C; \quad (16)$$

$$\frac{1}{T} \cdot 10^4 = 0,6433 \cdot \lg \tau + 0,6710 \cdot \lg \varepsilon + 8,3123 \quad - \text{ для границы } C-D, \quad (17)$$

где T – температура, K ; τ – время, с; ε – относительное обжатие.

При серии обжатий с первичной рекристаллизацией между ними размер рекристаллизованного зерна аустенита \bar{d}_p может быть рассчитан по ходу прокатки, если известны размер исходного зерна \bar{d}_0 и коэффициенты измельчения зерна после каждой рекристаллизации. По результатам экспериментов для $\varepsilon > \varepsilon_{кр}$ впервые получена зависимость коэффициента измельчения от относительного обжатия:

$$k = A \cdot \varepsilon^{2/3}. \quad (18)$$

Результаты прокатки образцов за два прохода показали, что зависимость (18) может быть использована для прогноза размера зерна при серии циклов «деформация – рекристаллизация». Конечное зерно определяется произведением коэффициентов $k(\varepsilon)$.

Получены уравнения взаимосвязи зерна аустенита \bar{d}_γ с зерном феррита \bar{d}_α , для скоростей охлаждения в области фазовых превращений $W_{\gamma \rightarrow \alpha} = 2-37^\circ\text{C}/\text{с}$ при $\bar{d}_\gamma = 19,5-34,5$ мкм:

$$\bar{d}_\alpha = 10,35 + 0,1528 \cdot \bar{d}_\gamma - 0,0958 \cdot W_{\gamma \rightarrow \alpha}, \text{ мкм} \quad \text{при } 2^\circ\text{C}/\text{с} \leq W_{\gamma \rightarrow \alpha} < 19^\circ\text{C}/\text{с}; \quad (19)$$

$$\bar{d}_\alpha = 13,50 - 0,0929 \cdot W_{\gamma \rightarrow \alpha} - 0,8589 \cdot 10^{-3} \cdot W_{\gamma \rightarrow \alpha}^2, \text{ мкм} \quad \text{при } 19^\circ\text{C}/\text{с} \leq W_{\gamma \rightarrow \alpha} \leq 37^\circ\text{C}/\text{с}. \quad (20)$$

Определена также зависимость объемной доли перлита P от скорости охлаждения:

$$P = (12,47 \pm 0,727) + (0,20 \pm 0,068) \cdot W_{\gamma \rightarrow \alpha}, \%. \quad (21)$$

Данные уравнения позволяют определять значения технологических параметров процесса непрерывной горячей прокатки и последующего охлаждения для получения полос из низкоуглеродистой стали с заданной структурой и стабильными механическими свойствами.

Корректировка модели структурообразования прокатываемых полос по напряженно-деформированному состоянию металла

Вначале исследуем НДС металла на примере горячей прокатки полосы из стали СтЗсп в одной из клеток чистовой группы НШСП 2000 ($h_0 = 8$ мм, $b_0 =$

1050 мм, $R = 400$ мм) при обжатии $\varepsilon = 30$ %. Рассмотрим вариант при отсутствии упрочнения металла ($k = 1$) и без натяжения ($\xi_0 = \xi_1 = 1$).

Последовательно вычисляем длину дуги деформации $l_\delta = \sqrt{R \cdot \Delta h} = 30,98$ мм, угол захвата

$$\alpha = \sqrt{\frac{h_0 \cdot \varepsilon}{R}} = 0,0774 \text{ рад} = 4,439^\circ \text{ и параметр прокатки } \delta = 2f / \alpha = 9,04.$$

Тогда по нашей методике получаем значение коэффициента нейтрально-

го сечения: $Z = \frac{h_0}{h_H} = \left[\frac{\sqrt{1 + \frac{(\xi_0 \cdot \delta - 1)(\xi_1 \cdot \delta + 1)}{(1 - \varepsilon)^\delta}} - 1}{\delta \cdot \xi_0 - k} \right]^{1/\delta} = 1,207$. В нейтральном сечении

толщина полосы $h_H = h_0 / Z = 6,628$ мм и относительное напряжение

$$\bar{\sigma}_H = (1 - 1/\delta) \cdot Z^\delta + 1/\delta = 4,983. \text{ Нейтральный угол } \gamma = \arccos\left(1 - \frac{h_H - h_1}{D}\right) = 2,898^\circ \text{ и}$$

протяженность зоны опережения $x_H = R \cdot \sin \gamma = 20,22$ мм. Соответственно протяженность зоны отставания $x_{om} = l_\delta - x_H = 10,76$ мм, отношение $\gamma / \alpha = 0,653$.

Напряжения в серединах зон определяются координатами:

$$x_{on.cerp} = \frac{x_H}{2} = 10,11 \text{ мм}; \quad h_{on.cerp} = h_1 + 2 \cdot \left(R - \sqrt{R^2 - x_{on.cerp}^2} \right) = 5,86 \text{ мм};$$

$$x_{om.cerp} = x_H + \frac{x_{om}}{2} = 25,6 \text{ мм}; \quad h_{om.cerp} = h_1 + 2 \cdot \left(R - \sqrt{R^2 - x_{om.cerp}^2} \right) = 7,24 \text{ мм}.$$

Тогда, используя методику А.И. Целикова, определяем относительные напряжения в серединах зон опережения и отставания:

$$\bar{\sigma}_{om.cerp} = \left(1 - \frac{1}{\delta}\right) \left(\frac{h_0}{h_{om.cerp}}\right)^\delta + \frac{1}{\delta} = 2,308; \quad \bar{\sigma}_{on.cerp} = \left(1 + \frac{1}{\delta}\right) \left(\frac{h_{on.cerp}}{h_1}\right)^\delta - \frac{1}{\delta} = 1,550. \quad (22)$$

Среднее относительное напряжение:

$$\bar{\sigma}_{cp} = \left(1 - \frac{\gamma}{\alpha}\right) \bar{\sigma}_{om.cerp} + \frac{\gamma}{\alpha} \cdot \bar{\sigma}_{on.cerp} = 2,045. \quad (23)$$

При учете упрочнения металла $k = \frac{1 + k_\varepsilon}{2} = \frac{1 + (1 + \varepsilon)}{2} = 1,15$ величина $Z = 1,209$, $\gamma / \alpha = 0,649$ и $\bar{\sigma}_{cp} = 2,723$.

Далее исследуем влияние вариации заднего и переднего натяжений на си-

ловые и деформационные параметры прокатки указанной полосы. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние режимов натяжения на параметры горячей прокатки полосы
(сталь СтЗсп, $h_0 = 8$ мм, $b_0 = 1050$ мм, $\varepsilon = 0,3$)

№ п/п	Режим натяжения	Параметры		
		Z	γ/α	$\bar{\sigma}_{cp}$
1	$\xi_0 = \xi_1 = 1$	1,21	0,649	2,723
2	$\xi_0 = \xi_1 = 0,8$	1,21	0,649	2,184
3	$\xi_0 = 0,8; \xi_1 = 1$	1,222	0,628	2,445
4	$\xi_0 = 1; \xi_1 = 0,8$	1,192	0,680	2,383
5	$\xi_0 = \xi_1 = 0,7$	1,216	0,656	1,889

Наибольшее напряжение возникает при отсутствии переднего натяжения и вариации заднего. Наименьшее напряжение возникает при симметричном натяжении, когда $\xi_0 = \xi_1$. Различие между двумя режимами прокатки при отсутствии одного из натяжений и другом переменном (при $\xi = 0,7$) составляет 3,9 %.

По результатам расчетов получена зависимость для оценки среднего относительного напряжения $\bar{\sigma}_{cp}$ в зависимости от коэффициента натяжения при отсутствии одного из натяжений и варьируемом другом:

$$\bar{\sigma}_{cp} = 1,146 + 1,577 \cdot \xi_i. \quad (24)$$

Для симметричного натяжения уравнение для определения $\bar{\sigma}_{cp}$ имеет вид:

$$\bar{\sigma}_{cp} = 2,777 \cdot \xi_i - 0,054. \quad (25)$$

Уравнения (24) и (25) позволяют оценить среднее относительное напряжение в очаге деформации при заданном натяжении и обжатии $\varepsilon = 0,3$.

Из условия пропорциональности девиаторов напряжений и деформаций при прокатке полосы в гладких валках, когда $\sigma_y = 0$, получаем:

$$\frac{\sigma_z - \sigma_x}{\varepsilon_z - \varepsilon_x} = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} = -\frac{\sigma_z}{\varepsilon_y - \varepsilon_z}. \quad (26)$$

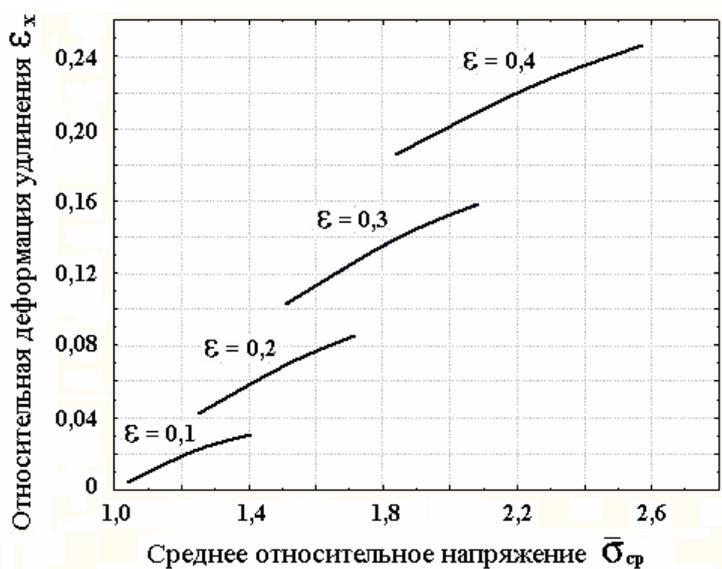
Используя условие пластичности, из выражения (26) в относительных напряжениях получаем:

$$\frac{1}{\varepsilon_z - \varepsilon_x} = \frac{\bar{\sigma}_x}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} = -\frac{\bar{\sigma}_z}{\varepsilon_y - \varepsilon_z}. \quad (27)$$

Далее следуют вычисления относительных деформаций удлинения ε_x и уширения ε_y при заданном относительном обжатии ε_z .

Из расчетов получили графическую зависимость $\varepsilon_x(\bar{\sigma}_{cp})$ для относительных обжатий $\varepsilon_z = 0,1 - 0,4$ (рис. 9).

Натяжение прокатываемых полос обеспечивает снижение среднего относительного напряжения на 26,5-28,4 %. Минимизация нагрузки на валки обеспечивается при отношении коэффициентов переднего и заднего натяжения $\xi_1 / \xi_0 = 1,27$.



печивается при отношении коэффициентов переднего и заднего натяжения $\xi_1 / \xi_0 = 1,27$.

Рис. 9. Зависимость относительной деформации ε_x от $\bar{\sigma}_{cp}$ при горячей прокатке полосы ($h_0 = 10\text{мм}$, $b_0 = 1050\text{мм}$)

Расчетная величина $\bar{\sigma}_{cp}$ в очаге деформации для модели меньше

чем для натуры в 1,1-1,6 раза из-за меньшего отношения b_0 / l_0 (в 15-19 раз).

Для модели и натуры, с учетом расчетных значений $\bar{\sigma}_{cp}$ при данном ε_z , рассчитывали ε_x и ε_y , а затем размеры пластически деформированного (эллипсоидного) зерна в направлении длины, ширины и толщины полосы (рис. 10):

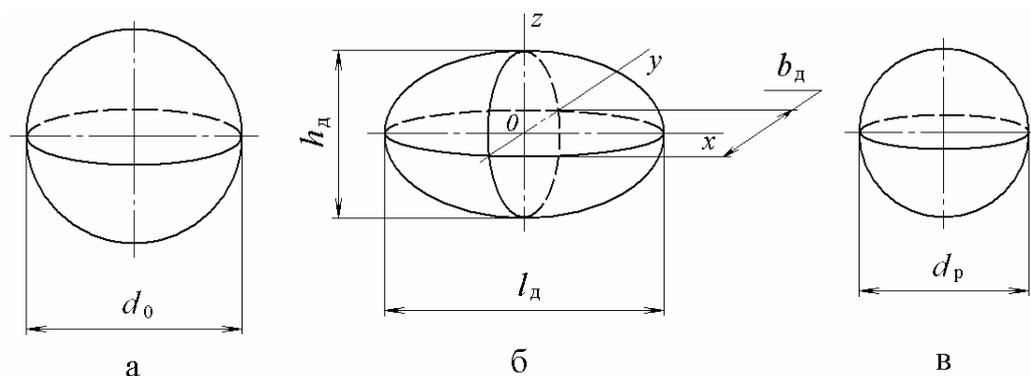


Рис. 10. Схема изменения зерна аустенита при горячей прокатке полосы: а) исходное состояние; б) пластически деформированное состояние; в) рекристаллизованное состояние

$$l_d = d_0(1 + \varepsilon_x); \quad b_d = d_0(1 + \varepsilon_y); \quad h_d = d_0(1 - \varepsilon_z). \quad (28)$$

При диаметре равного ему по объему сферического зерна $d_d = \sqrt[3]{l_d \cdot b_d \cdot h_d}$ коэффициент поправки по НДС при переходе от модели к натуре $k_n = d_{д.м}^3 / d_{д.н}^3$. Тогда коэффициент измельчения рекристаллизованного зерна в натуральных условиях с учетом поправки:

$$k_n = k_m \cdot k_n. \quad (29)$$

НШСГП как объект управления структурой прокатываемых полос.

Критерий оптимальности настройки

Оптимальная настройка НШСГП должна обеспечивать достижение наилучшего качества структуры готовых полос и максимальной производительности при наложенных ограничениях по энергосиловым параметрам, геометрии продукции, температуры конца прокатки $t_{к.п.}$ и смотки $t_{см.}$.

Основная цель управления – достижение минимальной разнотерности аустенита к началу ускоренного охлаждения на отводящем рольганге, а требуемый размер зерна феррита достигается подбором режима охлаждения полосы.

Разработан критерий оптимальности настройки чистовой группы

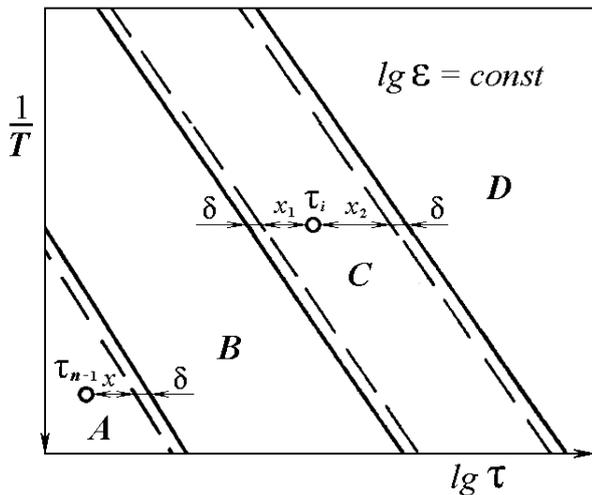
НШСГП:

$$K_{opt.} = \frac{Pr \cdot \bar{C}_j}{\sum_{i=1}^n G_i} = \max, \quad (30)$$

Рис. 11. Схема к определению риска выхода из области управления

где i - номер клетки чистовой группы; j - номер категории качества полосы;

Pr - производительность стана; $\bar{C}_j = C_j / C_1$ - относительная стоимость полос j -ой категории качества; C_1 - стоимость полос низшей (базовой) категории качества; C_j - стоимость полос j -ой категории качества; G_i - риск выхода из области управления за i -ой клетью; $G_i = \delta / x_1 + \delta / x_2$ - риск выхода из области управления C ; $G_{n-1} = \delta / x$ - риск выхода из области управления A .



Стоимость полос C_j определяется из условия $\delta_j \leq \delta < \delta_{j+1}$, где δ - заданная ширина пограничной запретной зоны в области управления, по оси lgt ; δ_j, δ_{j+1} - ширина запретных зон, гарантирующих прокатку полос повышенных категорий качества стоимостью C_j и C_{j+1} .

Усовершенствован алгоритм расчета начальной настройки НШСГП для управления структурой стальных полос с поддержанием их качества по геометрии, учитывающий энергосиловые и технологические ограничения.

7. Разработка математических моделей формирования физико-механических свойств и структуры полос и лент из сплавов цветных металлов

Кривые сопротивления деформации сплава БрБ2, полученные на торсионном пластометре при скоростях деформации $\dot{\varepsilon} = 0,1-10 \text{ с}^{-1}$ в интервале температур $t = 450-800^\circ\text{C}$, применительно к условиям прокатки полосовых заготовок на двухвалковом стане 700×1300 , описали уравнением:

$$\sigma_s = a_0 + a_1 \frac{\bar{\varepsilon}^{a_2} \cdot \dot{\varepsilon}^{a_3}}{t^{a_4}}, \quad (31)$$

где $\bar{\varepsilon} = \ln(h_0/h_1)$ - истинная деформация; $\dot{\varepsilon}$ - скорость деформации, с^{-1} ; t - температура, $^\circ\text{C}$; a_0, a_1, \dots, a_4 - коэффициенты.

При $t = 450-600^\circ\text{C}$: $a_0 = -115,4$; $a_1 = 133780,9$; $a_2 = 0,02$; $a_3 = 0,0499$; $a_4 = 0,9$. При $t = 650-800^\circ\text{C}$: $a_0 = -167,6$; $a_1 = 127159,2$; $a_2 = 0,002$; $a_3 = 0,03$; $a_4 = 0,9$.

Уравнение диаграммы предельной пластичности бериллиевой бронзы БрБ2 получено в виде:

$$\Lambda_p = a_0 + a_1 \cdot \frac{1}{t} + a_2 \cdot \lg \dot{\varepsilon} + a_3 \cdot (\lg \dot{\varepsilon})^2, \quad (32)$$

где t - температура, $^\circ\text{C}$; $\dot{\varepsilon}$ - скорость деформации, с^{-1} ; a_0, a_1, \dots, a_3 - коэффициенты; $a_0 = 2,8170$; $a_1 = -338,223$; $a_2 = -0,2650$; $a_3 = -0,0710$.

Были получены регрессионные зависимости для расчета предела текучести $\sigma_{0,2}$ и временного сопротивления σ_b сплава БрБ2 в диапазонах изменения $\varepsilon = 0-37\%$ и содержания бериллия $1,8-2,0\%$ при холодной прокатке:

$$\sigma_{0,2} = -(1120,4 \pm 58,7) + (19,16 \pm 0,95) \cdot \varepsilon - (0,20 \pm 0,024) \cdot \varepsilon^2 + (743,1 \pm 30,7) \cdot Ve, \text{ МПа}; \quad (33)$$

$$\sigma_B = -(816,6 \pm 20,7) + (9,30 \pm 0,33) \cdot \varepsilon - (0,05 \pm 0,008) \cdot \varepsilon^2 + (680,7 \pm 10,8) \cdot Be, \text{ МПа}, \quad (34)$$

где ε – степень деформации, %; Be – содержание бериллия, %.

Для определения временного сопротивления σ_B и относительного удлинения δ после искусственного старения для пределов изменения $t = 240-480^\circ\text{C}$, $\tau = 3-240$ мин и $\varepsilon = 0-37$ % получены уравнения:

$$\sigma_B = -(3045,3 \pm 185,0) + (22,07 \pm 1,05) \cdot t + (7,25 \pm 0,51) \cdot \tau - (0,02 \pm 0,001) \cdot t \cdot \tau + (5,07 \pm 0,48) \cdot \varepsilon - (0,03 \pm 0,0015) \cdot t^2 - (0,01 \pm 0,0012) \cdot \tau^2, \text{ МПа}; \quad (35)$$

$$\delta = (137,1 \pm 7,3) - (0,625 \pm 0,041) \cdot t - (0,2438 \pm 0,0201) \cdot \tau + (0,0005 \pm 0,00005) \cdot t \cdot \tau - (0,2962 \pm 0,0189) \cdot \varepsilon + (0,0008 \pm 0,00006) \cdot t^2 + (0,0002 \pm 0,00005) \cdot \tau^2, \text{ \%}, \quad (36)$$

где t – температура старения, $^\circ\text{C}$; τ – время, мин; ε – относительная деформация перед старением, %.

Построена трехмерная диаграмма рекристаллизации сплава «цинк-титан». Диаграмма определяет следующие области состояния структуры сплава: A – возврата и полигонизации; B – первичной рекристаллизации; C – рекристаллизованного состояния.

Уравнения гиперплоскостей, разделяющих области различных состояний структуры, для пределов изменения $t = 70-270^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 0-0,51$ и $\tau = 1-600$ с имеют следующий вид:

$$\frac{1}{T} \cdot 10^4 = 2,2445 \cdot \lg \tau + 6,6249 \cdot \lg \varepsilon + 20,8509 \quad - \text{ для границы } A - B; \quad (37)$$

$$\frac{1}{T} \cdot 10^4 = 2,2124 \cdot \lg \tau + 5,8815 \cdot \lg \varepsilon + 19,0120 \quad - \text{ для границы } B - C, \quad (38)$$

где T – температура, K ; τ – время, с; ε – относительное обжатие.

Применительно к условиям неполной горячей прокатки получены регрессионные уравнения для определения временного сопротивления σ_B , относительного удлинения δ и твердости HV_5 сплава «цинк-титан» для интервалов изменения $t_{н.п.} = 150-270^\circ\text{C}$, $\varepsilon_\Sigma = 29,6-91,4$ % при $\dot{\varepsilon}_{cp} \approx 10\text{c}^{-1}$, $\tau_{п.} = 33-35$ с, $t_{к.п.} = 37-42^\circ\text{C}$:

$$\sigma_B = 724,07 - 23,56 \cdot \varepsilon_\Sigma + 0,0076 \cdot \varepsilon_\Sigma^3 - 0,0001 \cdot \varepsilon_\Sigma^4 + 38,71 \cdot \cos(\varepsilon_\Sigma); \quad (39)$$

$$\delta = -33,20 + 2,87 \cdot \varepsilon_\Sigma + 0,0164 \cdot t_{н.п.} - 0,0459 \cdot \varepsilon_\Sigma^2 + 0,0003 \cdot \varepsilon_\Sigma^3; \quad (40)$$

$$HV_5 = 60,80 + 0,6020 \cdot \varepsilon_\Sigma - 0,2141 \cdot t_{н.п.} - 0,0061 \cdot \varepsilon_\Sigma^2 + 0,0005 \cdot t_{н.п.}^2, \quad (41)$$

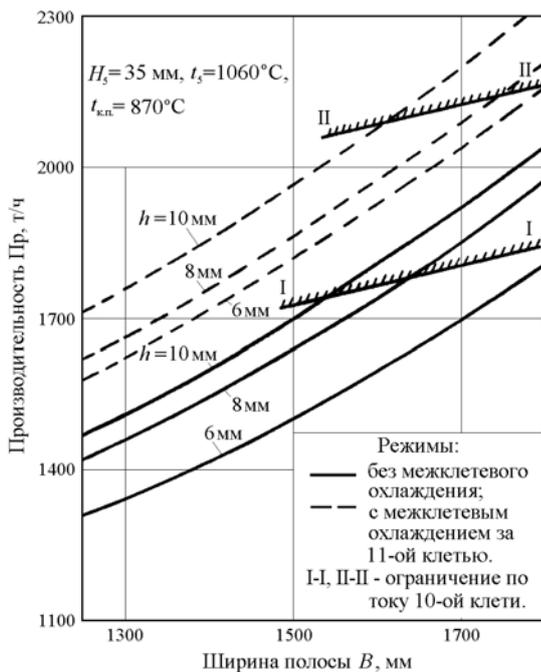
где ε_Σ – суммарное обжатие, %; $t_{н.п.}$ – температура начала прокатки, $^\circ\text{C}$.

Полученные зависимости используются на Московском заводе ОЦМ для расчета режимов производства лент с заданными физико-механическими свойствами.

8. Разработка и освоение новых технологий и режимов производства полос и лент заданного качества

Проверку разработанной методологии проектирования технологий производства применили к производству качественного полосового проката из черных и цветных металлов.

Так, для стали СтЗсп, с использованием алгоритма управления структурой, были рассчитаны предлагаемые режимы горячей прокатки полос толщиной 6, 8, 10 мм в чистовой группе НШСГП 2000 НЛМК, защищенные патентом.



При использовании принудительного охлаждения за 11-ой клетью производительность чистовой группы стана увеличивается на 13-17 % (рис. 12).

Рис. 12. Зависимость производительности чистовой группы НШСГП 2000 по предлагаемым режимам от ширины полосы

В табл. 2 для сравнения приведены действующий и опытные режимы (расчет и факт) обжатий при прокатке полос $8 \times 1600 \text{ мм}$ (СтЗсп).

Предлагаемый режим обжатий обеспечивает для готовой полосы (табл. 3) более высокие средние значения предела текучести σ_T и временного сопротивления σ_B , а также сужает диапазон их разброса ($\Delta\sigma_T$ - с 37 до 23-29 МПа, $\Delta\sigma_B$ - с 45 до 24-39 МПа).

Однако из-за необходимости поддержания устойчивости полосы ввиду неблагоприятной станочной профилировки и отключения систем противоизги-

Таблица 2

Варианты распределения относительных обжатий (ε , %) по клетям чистовой группы НШСП 2000 при прокатке полос 8×1600 мм (СтЗсп)

Варианты	Номер клетки						
	6	7	8	9	10	11	12
Действующий режим обжатий							
Факт	29,8	24,6	15,2	16,8	14,1	11,3	17,2
Опытные режимы обжатий							
Расчет	15,6	20,5	25,5	27,0	25,2	5,3	11,1
Факт I	14,5	24,4	26,8	25,7	24,8	11,1	17,8
II	20,1	23,9	18,7	24,9	16,8	8,8	19,1

Таблица 3

Параметры структуры и механические свойства полос 8×1600 мм (СтЗсп) для разных вариантов распределения обжатий по клетям (см. табл. 2)

Варианты	Параметры структуры					Механические свойства*			
	\bar{d}_α , мкм	S_d , мкм	E	γ_d , %	S_γ , %	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	KCV^{+20} , МДж/м ²
Действующий режим обжатий									
-	8,62	0,20	0,89	64,4	4,6	<u>270,8-308,0</u> 287,5	<u>425,8-470,9</u> 444,9	<u>30,7-36,5</u> 33,5	<u>0,61-1,53</u> 1,05
Опытные режимы обжатий									
I	7,39	0,18	0,97	65,4	4,0	<u>278,3-301,2</u> 290,0	<u>437,3-476,0</u> 458,2	<u>25,3-35,9</u> 31,3	<u>0,66-1,53</u> 1,06
II	7,87	0,19	0,94	67,2	4,2	<u>282,5-312,0</u> 298,5	<u>457,1-480,7</u> 469,2	<u>30,4-35,3</u> 32,9	<u>0,61-1,48</u> 1,28

Примечание: * - в числителе разброс, в знаменателе – среднее значение (3-5 образцов)

ба рабочих валков в шести первых клетях действительные обжатия в 8-11-ой клетях отклонялись от заданных оптимальных (до 50 % отн.). Расчет показал, что для фактически реализованных режимов I и II (см. табл. 2) первичная рекристаллизация после клетей 8 и 10 не закончена и не удалось существенно снизить разнотерность готовых полос и повысить ударную вязкость.

Более успешной реализации предлагаемых режимов обжатий способствует использование систем гидравлического противоизгиба рабочих валков во всех клетях чистовой группы НШСП. Согласно расчетам необходимые усилия противоизгиба не превышают 80 т (784,8 кН), что может быть обеспечено имеющимся оборудованием.

Расчеты с использованием уравнения (16) показали, что получение более однородной структуры полосовой низкоуглеродистой стали возможно путем корректировки междеформационных пауз и межклетевых расстояний. Данный подход был реализован при создании обводного устройства нереверсивной двухвалковой клетки, защищенного авторским свидетельством на изобретение. В процессе опытно-промышленного опробования данного устройства достигнуто улучшение структуры и механических свойств полосовой стали СтЗсп.

Для улучшения качества лент из *бериллиевой бронзы* была разработана схема нового технологического процесса (рис. 13).

Предлагаемый технологический процесс отличается от действующего прежде всего увеличенным размером слитка. Для выплавки бериллиевых бронз используется шихта более стабильного состава, в связи с чем отпала необходимость учета влияния ее состава на механические свойства готовых лент.

На основе результатов исследования предельной пластичности сплава БрБ2 определен диапазон рационального температурно-скоростного режима дробной деформации, охватывающий область высокой пластичности: $t = 550-750^{\circ}\text{C}$; $0,1 \text{ c}^{-1} \leq \dot{\epsilon} \leq 10,0 \text{ c}^{-1}$.

Предложен следующий способ оптимизации процесса прокатки по пластичности.

На I-м этапе, приняв за основу опорный (действующий) режим прокатки, перемещаем при $\dot{\epsilon} = const$ температурный интервал прокатки Δt до достижения условия $F_n = max$ (рис. 14). При этом определяем точку 1, описывающую температурно-скоростной режим в первом проходе.

На II-м этапе на проекции поверхности диаграммы прокладываем от точки 1 базовый (действующий) маршрут прокатки (рис. 15) и определяем вдоль этого маршрута (при $t = var$ и $lg \dot{\epsilon} = var$) площадь развертки сечения 1- m под кривой $\Lambda_p = \Lambda_p(t, lg \dot{\epsilon})$. Здесь m - количество проходов.

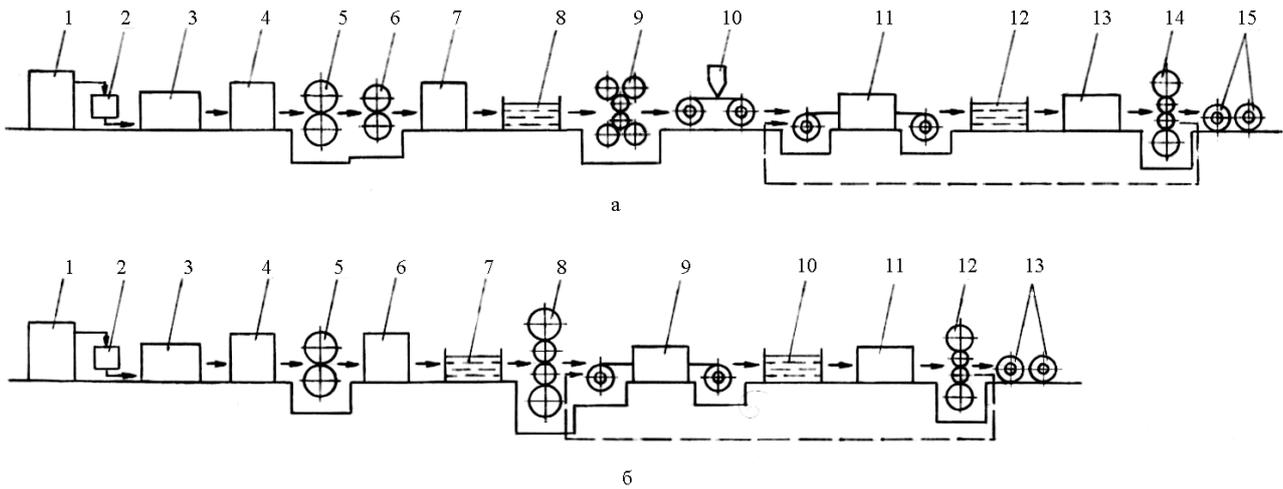


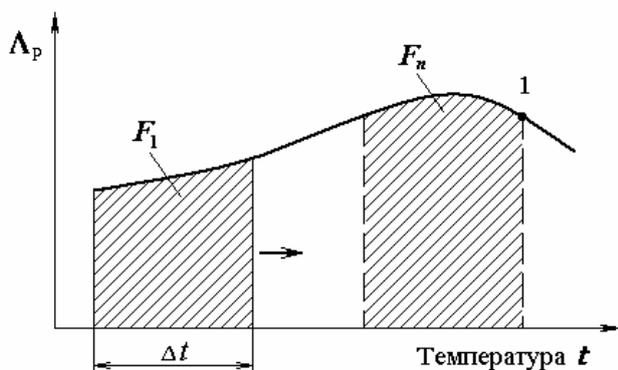
Рис. 13. Схемы технологических процессов и состав оборудования для производства лент из бериллиевых бронз:

а) действующая

1 - индукционная плавильная печь; 2 - кристаллизатор; 3 - фрезагрегат; 4 - нагревательная печь; 5 - двухвалковый стан 700×1300; 6 - двухвалковый стан 450×900; 7 - шахтная печь; 8 - закалочная ванна; 9 - шестивалковый стан 160/350×450; 10 - установка аргоно-дуговой сварки; 11 - лентозакалочная печь; 12 - травильная ванна; 13 - линия щеточной зачистки поверхности; 14 - четырехвалковый стан 125/380×320; 15 - склад готовых рулонов;

б) предлагаемая

1 - индукционная плавильная печь; 2 - кристаллизатор; 3 - фрезагрегат; 4 - нагревательная печь; 5 - двухвалковый стан 700×1300; 6 - шахтная печь; 7 - закалочная ванна; 8 - четырехвалковый стан 250/750×800; 9 - лентозакалочная печь; 10 - травильная ванна; 11 - линия щеточной зачистки поверхности; 12 - четырехвалковый стан 125/380×320; 13 - склад готовых рулонов

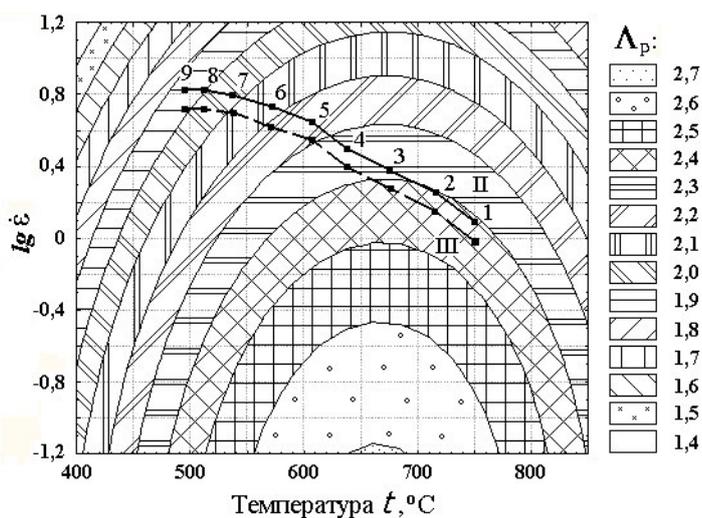


На III-м этапе методом итераций находим новое положение сечения 1-м, используя критерий оптимальности:

Рис. 14. Схема оптимизации режима прокатки на I-м этапе

$$K_{opt.} = F \cdot Pr = \max, \quad (42)$$

где Pr – производительность стана.



Было произведено перераспределение обжатий по проходам на двухвалковом стане 700×1300:

Рис. 15. Схема оптимизации на II-м и III-м этапах (на примере бронзы БрБ2)

степени деформации в проходах 2-7 увеличены с 17,5-31,6 до 19,2-35,1%, а число проходов уменьшено с девяти до восьми. Предложено горячую прокатку производить при температуре 550-750°C до толщины 6 мм со смоткой раската в рулон. Исключается прокатка на двухвалковом стане 450×900, рулонные заготовки после нагрева и закалки прокатывают на четырехвалковом стане 250/750×800 с 6 до 1,5 мм за пять проходов. Отпадает необходимость в аргонодуговой сварке нескольких лент в один рулон перед прокаткой на четырехвалковом стане 125/380×320. При прокатке лент толщиной 0,8 мм с натяжением на стане 125/380×320 минимизация уширения раската достигнута в 3-ем проходе, где отношение $R/h_0 = 62,5$, что близко к его оптимальному значению (61,6).

Применение старения при температуре 320°C обеспечивает максимальную прочность для всех исходных состояний ($\sigma_b = 1301-1421$ МПа). Использование разных исходных состояний и разных режимов старения позволило получать широкую гамму механических свойств готового проката в соответствии с международными стандартами.

При переходе на новую технологию улучшено качество проката по механическим свойствам, обеспечена точность по толщине на уровне требований международных стандартов. Выход годного увеличился на 8,8 %.

Анализ действующего на четырехвалковом стане 400/1000×1000 МЗОЦМ температурно-деформационного и скоростного режима прокатки полос из сплава «цинк-титан» показал, что ресурс пластичности обрабатываемого материала используется далеко неполно (на 65-70 %).

С учетом реологических свойств цинк-титанового сплава был разработан

оптимальный режим неполной горячей прокатки полос толщиной 0,7 мм (табл. 5), при котором ресурс пластичности используется более полно по сравнению с

Таблица 5

Режимы прокатки полос 0,7×750 мм из сплава «цинк-титан» на реверсивном четырехвалковом стане 400/1000×1000

Номер прохода	Параметры									
	h_0 , мм	h_1 , мм	ε , %	V , м/с	$\dot{\varepsilon}$, с ⁻¹	t , °С	σ_s , МПа	$\frac{\sigma_0}{\sigma_s}$	$\frac{\sigma_1}{\sigma_s}$	P^* , МН
Действующий режим										
1	7,0	6,2	11,4	0,7	6,3	190	135,1	0,074	0,084	2,01/1,91
2	6,2	4,8	22,6	0,8	10,8	158	214,2	0,029	0,038	3,34/3,17
3	4,8	3,6	25,0	1,2	19,4	127	268,2	0,052	0,044	3,55/3,37
4	3,6	2,5	30,6	1,2	24,7	107	278,7	0,044	0,049	3,60/3,42
5	2,5	1,7	32,0	1,2	30,4	88	298,5	0,080	0,055	3,45/3,28
6	1,7	1,3	23,5	1,2	31,6	73	346,1	0,059	0,084	3,12/2,96
7	1,3	0,95	26,9	1,2	38,6	55	371,1	0,107	0,067	3,37/3,20
8	0,95	0,7	26,3	1,2	44,7	60	386,4	0,067	0,102	3,62/3,44
Предлагаемый режим										
1	7,0	6,4	8,6	0,7	5,5	140	117,2	0,080	0,085	2,30/2,19
2	6,4	5,4	15,6	0,8	8,8	125	198,2	0,080	0,085	2,14/2,03
3	5,4	4,1	24,1	0,9	13,4	116	246,5	0,080	0,085	2,77/2,63
4	4,1	2,8	31,7	1,1	21,6	98	266,0	0,080	0,085	3,49/2,37
5	2,8	1,85	33,9	1,2	29,5	85	284,4	0,080	0,085	3,56/3,38
6	1,85	1,3	19,7	1,2	34,0	70	333,7	0,080	0,085	3,61/3,43
7	1,3	0,95	26,9	1,2	38,6	54	371,8	0,080	0,085	3,37/3,20
8	0,95	0,7	26,3	1,2	44,7	60	386,4	0,085	0,090	3,62/3,44

Примечание: * - в числителе расчет по упрощенной методике А.И. Целикова, в знаменателе – факт

действующим режимом. При этом механические свойства соответствуют требованиям Европейского стандарта EN 988, их разброс уменьшился в 1,4-1,6 раза. Новый процесс позволил уменьшить нагрузку на валки на 8-10 %.

Экспериментально установлено интенсивное разупрочнение сплава «цинк-титан», деформированного при температуре 270°С с обжатием $\varepsilon > 22$ %. Для данного сплава $\varepsilon = 22$ % является критическим по размеру зерна. За время прокатки полосы в первых проходах промышленного реверсивного стана (при относительных обжатиях $\varepsilon > 22$ % и температуре $t = 300-350$ °С) успевает пройти не только первичная, но и в значительной степени собирательная рекристаллизация.

На основе построенной диаграммы рекристаллизации сплава «цинк-титан» разработан также режим горячей прокатки, обеспечивающий получение полос с достаточно изотропной структурой и высокой пластичностью, а также снижающий нагрузки на оборудование. Это позволяет использовать потребителю готовый прокат для получения деталей методом глубокой вытяжки без дополнительного отжига.

С использованием разработанного роликового измерителя выпучивания полосы на промышленном двухвалковом стане 260×400 с вертикальными роликами исследовано влияние обжатия боковых кромок и натяжения при различных значениях отношения h_0/b_0 на потерю продольной устойчивости прокатываемых полос из меди и медных сплавов. Установлены необходимые величины натяжения для стабилизации процесса и расширение границ обжатия кромок полосы.

Результаты исследования продольной устойчивости обжимаемых вертикальными роликами на стане 260×400 полос (при прокатке без натяжения) были дополнены известными из литературы подобными опытными данными по горячей прокатке полос из слябов медных сплавов и углеродистой стали. Для пределов изменения $h/b = 0,006-0,072$ и $E = (7,42-12,71) \cdot 10^4$ МПа обобщенная зависимость предельного относительного обжатия ε_b от отношения размеров h/b и модуля упругости E была описана уравнением регрессии:

$$\varepsilon_b = (5,5 \pm 0,34) \cdot 10^{-4} \cdot h/b \cdot E, \% . \quad (43)$$

Использование данного уравнения для расчета настройки вертикальных валков обеспечило: снижение разноширинности полос при горячей реверсивной прокатке медных сплавов на двухвалковом стане 850×1000 Кольчугинского завода ОЦМ в среднем на 4 мм без потери продольной устойчивости; уменьшение потерь металла на обрезь на 0,5 % и соответствие качества продукции стандартам.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Развита теория процессов прокатки полос и лент из стали и сплавов цветных металлов, получены основные закономерности формирования струк-

туры и свойств обрабатываемого металла, предложены основные принципы оптимизации режимов пластического деформирования полос, разработаны и внедрены в производство новые и усовершенствованные технологии производства проката с заданными структурой и свойствами.

2. Усовершенствованы методика и экспериментальная установка для физического моделирования условий структурообразования низкоуглеродистой стали при дробной горячей деформации с малыми паузами и последующем охлаждении, воспроизводящая реальные температурно-деформационные, геометрические, кинематические и временные параметры процесса прокатки полос на НШСГП.

3. С использованием результатов физического моделирования установлены основные закономерности и созданы математические модели формирования структуры в процессе горячей прокатки полос из низкоуглеродистой стали и сплавов цветных металлов; предложены диаграммы рекристаллизации аустенита стали СтЗсп и сплава «цинк-титан» в спрямляющих координатах, в которых упрощается их математическое описание, что позволяет использовать эти диаграммы в быстродействующих алгоритмах управления структурой и механическими свойствами прокатываемых полос.

4. В результате развития теории влияния натяжения на продольную устойчивость раската при его боковом обжатии вертикальными валками полосового стана установлена линейная зависимость величины прогиба полосы от напряжения натяжения при его изменении в пределах $(0-0,2) \cdot \sigma_s$. Определено оптимальное соотношение коэффициентов переднего и заднего натяжения для минимизации силовых параметров процесса прокатки $\xi_1 / \xi_0 = 1,27$.

5. Предложен метод минимизации уширения прокатываемых полос за счет уменьшения протяженности зоны отставания (поиска максимума относительной величины нейтрального угла γ / α) путем регулирования обжатия и натяжения, позволяющий повысить выход годного и стабилизировать нагрузку на рабочие валки.

6. Создана методология оптимизации режимов горячей прокатки полос с использованием диаграмм рекристаллизации и предельной пластичности, сущность которой состоит: в минимизации разнородности металла за счет пере-

распределения обжатий по проходам; в выборе интервалов температур и скоростей деформации с высокой пластичностью материала с учетом нижнего ограничения относительного обжатия по условию распределения деформации по всей толщине полосы. Режимы прокатки полос из стали СтЗсп, рассчитанные с использованием усовершенствованного алгоритма расчета начальной настройки чистовой группы клетей НШСГП, промышленно апробированы на стане 2000.

7. На основе результатов испытаний образцов на кручение определены реологические свойства бериллиевой бронзы БрБ2: получено уравнение для расчета сопротивления деформации сплава применительно к условиям прокатки полосовых заготовок на двухвалковом стане 700×1300; определена зависимость предельной пластичности сплава от температуры и скорости деформации, позволившая установить область температур и скоростей деформации с повышенной пластичностью сплава. Разработан новый ресурсосберегающий вариант технологии и рациональные режимы производства лент из бериллиевой бронзы: для горячей прокатки полосовой заготовки предложено использовать укрупненную заготовку с уменьшением числа проходов с девяти до восьми; сокращено с четырех до трех число прокатных переделов; разработаны режимы искусственного старения, позволившие освоить производство новых видов прокатной продукции.

8. По итогам промышленных экспериментов получены регрессионные зависимости физико-механических свойств сплава БрБ2 от размера зерна, содержания бериллия и степени деформации при холодной прокатке, а также температуры и времени искусственного старения лент из различных исходных состояний. Данные уравнения позволяют прогнозировать механические свойства готовой прокатной продукции в различных состояниях поставки.

9. Для сплава «цинк-титан» с использованием построенной диаграммы рекристаллизации и результатов физического моделирования процесса пластического деформирования разработаны температурно-деформационные и скоростные режимы горячей и неполной горячей прокатки полос на реверсивном четырехвалковом стане 400/1000×1000, обеспечивающие стабилизацию их механических свойств и снижение нагрузки на валки на 8-10 %. По результатам

физического моделирования получены уравнения для прогнозирования механических свойств цинк-титанового сплава в зависимости от суммарного относительного обжатия и температуры начала прокатки.

10. Создано и промышленно апробировано обводное устройство реверсивной двухвалковой прокатной клетки, обеспечивающее завершенность первичной рекристаллизации низкоуглеродистой стали СтЗсп к началу последующего обжатия и улучшение качества полос по структуре и механическим свойствам.

11. Получено обобщенное регрессионное уравнение для определения предельного относительного бокового обжатия ε_b раската из стали и медных сплавов в вертикальных валках в зависимости от отношения h/b и модуля упругости E материала полосы в широком диапазоне их изменения. Использование данного уравнения для расчета настройки вертикальных валков реверсивного стана 850×1000 позволило стабилизировать ширину полос из медных сплавов при горячей прокатке без потери продольной устойчивости.

* * *

Внедрение новых технологических режимов прокатки полос на НЛМК, Московском и Кольчугинском заводах ОЦМ позволило получить экономический эффект около 15,2 млн. руб., в том числе около 255 тыс. руб. в ценах до 1991 г. и освоить производство новых видов проката.

Основное содержание диссертации опубликовано
в монографии

1. Кохан, Л.С. Листовая прокатка металлов и заготовок из металлических порошков [Текст] / Л.С. Кохан, И.Г. Роберов, А.В. Алдунин, К.А. Гостев – М.: МГВМИ, 2008. – 224 с.

в тезисах докладов

2. Алдунин, А.В. Формирование структуры при скоростной горячей прокатке низкоуглеродистой стали [Текст] / А.В. Алдунин, В.М. Белявская, В.И. Лизунов и др. // Вопросы металловедения и термической обработки стали и ти-

тановых сплавов: Тезисы докладов V Уральской школы металлоспециалистов (г. Киров, 13 – 18 марта 1977 г.). – Пермь: Перм. обл. правл. НТО машпром, 1977. – С. 37.

3. Григорян, Г.Г. Учет технологических ограничений при управлении качеством полосы в чистовой группе широкополосного стана [Текст] / Г.Г. Григорян, А.С. Гуров, Р.Л. Шаталов, А.В. Алдунин // Автоматизация листовых станов горячей прокатки: Материалы всесоюзного научн.-техн. семинара (г. Кривой Рог, 12 – 16 сентября 1977 г.). – М.: ЦНИИТЭИ приборостроения, 1977. – С. 69 – 70.

4. Штремель, М.А. Алгоритм управления структурой стальных полос на непрерывном широкополосном стане горячей прокатки [Текст] / М.А. Штремель, В.И. Лизунов, А.В. Алдунин // Современные проблемы повышения качества металла: Материалы конференции. – Донецк: ДПИ, 1978. – С. 155 – 156.

5. Штремель, М.А. Управление структурой при горячей прокатке малоуглеродистых сталей на непрерывно-широкополосном стане [Текст] / М.А. Штремель, В.И. Лизунов, А.Ф. Пименов, Ю.А. Мухин, Ю.Д. Железнов, В.В. Шкатов, А.В. Алдунин // Прогрессивные технологические процессы в производстве холоднокатаного листа: Тезисы докладов Всесоюзного научн.-техн. семинара (г. Липецк, октябрь 1981 г.). – М.: ЦНИИТЭИ, 1981. – С. 34.

6. Алдунин, А.В. Преобразование разнородности аустенита при горячей прокатке полосовой низкоуглеродистой стали [Текст] / А.В. Алдунин, В.В. Шкатов, Ю.А. Мухин // Прогрессивные технологические процессы в производстве холоднокатаного листа: Тезисы докладов Всесоюзного научн.-техн. семинара (г. Липецк, май 1985 г.). – М.: ЦНИИТЭИ, 1985. – С. 9 – 10.

7. Алдунин, А.В. Модель распределения температуры по толщине горячекатаной полосы на отводящем рольганге НШС [Текст] / А.В. Алдунин // Теплофизика технологических процессов: Тезисы докладов VII-ой Всес. научн.-техн. конференции (г. Тольятти, 18 – 20 октября 1988 г.). – Тольятти: ТПИ, 1988. – С. 26.

8. Алдунин, А.В. Резервы повышения конструктивной прочности горячекатаного полосового металла [Текст] / А.В. Алдунин, И.М. Володин // Наука – производству: Тезисы докладов Республиканской научн.-техн. конференции,

посвященной 10-летию КамПИ (г. Набережные Челны, 27 – 29 марта 1990 г.). – Набережные Челны: КамПИ, 1990. – С. 7 – 8.

9. Босхамджиев, Н.Ш. Ресурсоэнергосберегающая технология производства тонких полос из «титан-цинка» [Текст] / Н.Ш. Босхамджиев, Р.Л. Шаталов, А.В. Алдунин // Ресурсоэнергосбережение – XXI век: Тезисы докладов конференции (г. С.-Петербург, 14 – 16 ноября 2000 г.). – С.-П.: РЭСТЭК. – 2000. – С. 59.

10. Зисельман, В.Л. Разработка режимов термомеханической обработки, улучшающих механические свойства лент из бериллиевой бронзы [Текст] / В.Л. Зисельман, Р.Л. Шаталов, А.В. Алдунин // Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов: Тезисы (г. Москва, 25 – 26 октября 2006 г.). – М.: МИСиС, 2006. – С. 79.

В СТАТЬЯХ

11. Железнов, Ю.Д. Моделирование дробной горячей деформации на непрерывном стане [Текст] / Ю.Д. Железнов, Г.Г. Григорян, А.В. Алдунин, О.В. Максимова // Изв. вуз. Черная металлургия. – 1979. – № 1. – С. 64 – 67.

12. Железнов, Ю.Д. Об учете неравномерности деформации по толщине полосы при управлении процессом прокатки на широкополосном стане [Текст] / Ю.Д. Железнов, Г.Г. Григорян, А.В. Алдунин // Новые технологические процессы обработки металлов давлением: Научные труды МИСиС. – М.: Металлургия, 1979. – № 112. – С. 45 – 49.

13. Железнов, Ю.Д. Улучшение механических свойств стальных полос при непрерывной горячей прокатке [Текст] / Ю.Д. Железнов, Г.Г. Григорян, Р.Л. Шаталов, А.В. Алдунин и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. – 1981. – № 7. – С. 64 – 68.

14. Григорян, Г.Г. Модель распределения температуры по толщине полосы при ее охлаждении на отводящем рольганге НШС [Текст] / Г.Г. Григорян, Р.Л. Шаталов, А.В. Алдунин, А.П. Гиря // Изв. вуз. Черная металлургия. – 1981. – № 9. – С. 73 – 76.

15. Мухин, Ю.А. Проблемы улучшения структуры и свойств горячекатаных стальных полос в условиях НШС [Текст] / Ю.А. Мухин, А.В. Алдунин // Тонколистовая прокатка. Межвуз. сб. – Воронеж: ВПИ, 1981. – С. 27 – 32.

16. Штремель, М.А. Преобразование зерна при первичной рекристаллизации [Текст] / М.А. Штремель, В.И. Лизунов, В.В. Шкатов, А.В. Алдунин // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1984. – № 6. – С. 2 – 5.

17. Алдунин, А.В. Резервы стабилизации механических свойств горячекатаных полос [Текст] / А.В. Алдунин, А.П. Гирия // Теория и практика тонколистовой прокатки. Межвуз. сб. – Воронеж: ВПИ, 1986. – С. 135 – 139.

18. Мухин, Ю.А. Моделирование условий горячей прокатки на непрерывном стане [Текст] / Ю.А. Мухин, В.В. Шкатов, А.В. Алдунин, И.Л. Бобылев // Изв. вуз. Черная металлургия. – 1987. – № 2. – С. 44 – 48.

19. Босхамджиев, Н.Ш. Проблемы прокатки полос из цинкового сплава с заданными размерами и физико-механическими свойствами [Текст] / Н.Ш. Босхамджиев, Р.Л. Шаталов, А.В. Алдунин // Моделирование и исследование сложных систем: Сб. трудов международной научн.-техн. конференции. Т. 1 (г. Севастополь, 9 – 17 сентября 2000 г.). – М.: МГАПИ, 2001. – С. 38 – 40.

20. Кудин, М.В. Производство полосового проката из сплава «титан-цинк» [Текст] / М.В. Кудин, Н.Ш. Босхамджиев, Р.Л. Шаталов, А.В. Алдунин // Теория и практика производства проката: Сб. научн. трудов Международной научн.-техн. конференции (г. Липецк, 6 – 7 февраля 2001 г.). – Липецк: ЛГТУ, 2001. – С. 179 – 183.

21. Кудин, М.В. Производство качественных коррозионностойких полос из цинк-титана [Текст] / М.В. Кудин, Н.Ш. Босхамджиев, В.Л. Зисельман, Р.Л. Шаталов, Д.К. Фигуровский, А.В. Алдунин // Цветные металлы. – 2001. – № 3. – С. 71 – 75.

22. Шаталов, Р.Л. Разработка режимов горячей прокатки полос из сплава титан-цинк [Текст] / Р.Л. Шаталов, А.В. Алдунин, Н.Ш. Босхамджиев // Сб. трудов четвертого конгресса прокатчиков. Т. 1 (г. Магнитогорск, 16 – 19 октября 2001 г.). – М.: Черметинформация, 2002. – С. 86 – 89.

23. Шаталов, Р.Л. Разработка режимов горячей деформации полос из цинкового сплава на основе моделирования методами кручения и прокатки [Текст] / Р.Л. Шаталов, А.В. Алдунин, Н.Ш. Босхамджиев // Производство проката. – 2002. – № 3. – С. 18 – 20.

24. Алдунин, А.В. Установление распределения напряжений в очаге пластической деформации методом структурного анализа [Текст] / А.В. Алдунин, Н.Д. Лукашкин, Л.С. Кохан и др. // Сб. трудов VI Международного Конгресса «Кузнец-2002. Состояние, проблемы и перспективы развития КШП, КП машин и обработки металлов давлением». Вып. 2 (г. Москва, 3 – 5 июня 2002 г.). – М.: МГВМИ, 2002. – С. 29 – 31.

25. Лукашкин, Н.Д. Построение режима обжатий при горячей прокатке низкоуглеродистой стали с учетом процессов структурообразования [Текст] / Н.Д. Лукашкин, Л.С. Кохан, А.В. Алдунин, А.В. Борисов // Состояние, проблемы и перспективы развития металлургии и обработки металлов давлением: Сб. трудов МГВМИ и Союза Кузнецов. Вып. 3. – М.: МГВМИ, 2003. – С. 70 – 73.

26. Алдунин, А.В. Влияние горячей деформации на кинетику превращения аустенита низкоуглеродистой стали при охлаждении [Текст] / А.В. Алдунин // Состояние, проблемы и перспективы развития металлургии и обработки металлов давлением: Сб. трудов МГВМИ и Союза Кузнецов. Вып. 3. – М.: МГВМИ, 2003. – С. 103 – 109.

27. Шаталов, Р.Л. Определение коэффициента контактного трения при горячей прокатке полос из сплава «цинк-титан» [Текст] / Р.Л. Шаталов, А.В. Алдунин, Н.Ш. Босхамджиев // Производство проката. – 2004. – № 3. – С. 13 – 14.

28. Зисельман, В.Л. Особенности технологии и основные проблемы производства плоского проката из бериллиевых бронз [Текст] / В.Л. Зисельман, Р.Л. Шаталов, А.В. Алдунин // Цветные металлы. – 2004. – № 11. – С. 107 – 110.

29. Алдунин, А.В. Построение качественной диаграммы рекристаллизации низкоуглеродистой стали для расчета режимов горячей прокатки полос [Текст] / А.В. Алдунин // Проблемы повышения качества подготовки специалистов в области художественной обработки металлов: Материалы II Всероссийской межвузовской научн.-практ. конференции (г. Москва, 16 ноября 2004 г.). – М.: МГВМИ, 2004. – С. 127 – 129.

30. Зисельман, В.Л. Совершенствование режимов горячей деформации полосовой заготовки из бериллиевых бронз на основе пластометрического моделирования [Текст] / В.Л. Зисельман, Р.Л. Шаталов, А.В. Алдунин // Теория и

практика производства листового проката. Ч. 1 (г. Липецк, 8 – 9 февраля 2005 г.). – Липецк: ЛГТУ, 2005. – С. 90 – 93.

31. Зисельман, В.Л. Определение зависимости сопротивления пластической деформации бериллиевой бронзы от технологических параметров для условий горячей прокатки [Текст] / В.Л. Зисельман, Р.Л. Шаталов, А.В. Алдунин, Н.Н. Литвинова // Состояние, проблемы и перспективы развития металлургии и обработки металлов давлением: Сб. трудов МГВМИ. Вып. 5. – М.: МГВМИ, 2005. – С. 94 – 96.

32. Зисельман, В.Л. Совершенствование технологии производства и качество лент из бериллиевых бронз [Текст] / В.Л. Зисельман, Н.Ш. Босхамджиев, Р.Л. Шаталов, А.В. Алдунин, С.Ю. Передерий // Цветные металлы. – 2005. – № 12. – С. 86 – 89.

33. Шаталов, Р.Л. Усовершенствование режимов прокатки лент из бериллиевой бронзы на основе пластометрического исследования реологических свойств сплава [Текст] / Р.Л. Шаталов, В.Л. Зисельман, А.В. Алдунин, А.О. Коньков // Цветные металлы. – 2006. – № 1. – С. 74 – 77.

34. Зисельман, В.Л. Разработка рациональных режимов термомеханической обработки для получения качественных лент из бериллиевых бронз [Текст] / В.Л. Зисельман, Р.Л. Шаталов, А.В. Алдунин // Металлург. – 2006. – № 2. – С. 72 – 75.

35. Zisel'man, V.L. Developing efficient regimes of thermomechanical treatment for obtaining quality strip made of beryllium bronzes [Текст] / V.L. Zisel'man, R.L. Shatalov, A.V. Aldunin // Metallurgist. – 2006. – V. 50. – N. 1-2. – P. 102 – 107.

36. Алдунин, А.В. Технология производства качественных лент из бериллиевой бронзы на основе использования ресурса пластичности и закономерностей формирования свойств [Текст] / А.В. Алдунин, Р.Л. Шаталов, В.Л. Зисельман, Т.А. Койнов // Состояние, проблемы и перспективы развития металлургии и обработки металлов давлением: Сб. трудов МГВМИ.– М.: МГВМИ, 2007. – Вып. 6. – С. 183 – 186.

37. Шаталов, Р.Л. Исследование продольной устойчивости полос из медных сплавов при прокатке в вертикальных валках полосового стана [Текст] /

Р.Л. Шаталов, А.В. Алдунин, С.А. Карпов, А.Е. Шиманаев // *Металлург.* – 2007. – № 10. – С. 57 – 59.

38. Алдунин, А.В. Разработка режимов горячей прокатки низкоуглеродистой стали с использованием закономерностей структурообразования [Текст] / А.В. Алдунин // *Производство проката.* – 2007. – № 11. – С. 7 – 8.

39. Алдунин, А.В. Проникновение пластической деформации по толщине прокатываемой полосы [Текст] / А.В. Алдунин, Л.С. Кохан // *Изв. вузов. Черная металлургия.* – 2007. – № 11. – С. 34 – 37.

40. Алдунин, А.В. Определение условий минимизации уширения при производстве плоского проката [Текст] / А.В. Алдунин, Л.С. Кохан // *Изв. вузов. Черная металлургия.* – 2008. – № 1. – С. 40 – 43.

41. Шаталов, Р.Л. Исследование влияния натяжения на продольную устойчивость полос из медных сплавов, прокатываемых на стане с вертикальными валками [Текст] / Р.Л. Шаталов, А.В. Алдунин, С.А. Карпов // *Цветные металлы.* – 2008. – № 4. – С. 74 – 75.

42. Шаталов, Р.Л. Исследование продольной устойчивости полос из медных сплавов, прокатываемых на стане с вертикальными валками [Текст] / Р.Л. Шаталов, А.В. Алдунин, С.А. Карпов. – Теория и практика производства листового проката. Сб. научн. тр. Часть 1. – Липецк: ЛГТУ, 2008. – С. 152 – 157.

43. Алдунин, А.В. Исследование влияния основных металлофизических факторов на упрочнение бериллиевой бронзы при производстве лент [Текст] / А.В. Алдунин, Р.Л. Шаталов, Н.Ш. Босхамджиев, В.Л. Зисельман // *Цветные металлы.* – 2008. – № 5. – С. 58 – 61.

44. Алдунин, А.В. Основные принципы оптимизации процессов горячей прокатки полос по структуре и пластичности металла [Текст] / А.В. Алдунин // *Изв. вузов. Черная металлургия.* – 2008. – № 5. – С. 23 – 26.

45. Алдунин, А.В. Устойчивость прокатки полос в вертикальных валках полосового стана [Текст] / А.В. Алдунин, Л.С. Кохан // *Изв. вузов. Черная металлургия.* – 2008. – № 7. – С. 16 – 20.

46. Aldunin, A.V. Stability of Strip Rolling in Vertical Rollers [Текст] / A.V. Aldunin, L.S. Kokhan // *Steel in Translation.* – 2008. – V. 38. – N. 7. – P. 517 – 521.

47. Алдунин, А.В. Разработка рациональной компоновки оборудования на участке «чистовая группа – моталки» непрерывного широкополосного стана [Текст] / А.В. Алдунин // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2009. – № 1. – С. 19 – 22.

48. Алдунин, А.В. Упрочнение бериллиевой бронзы при производстве лент [Текст] / А.В. Алдунин, Р.Л. Шаталов // Нанотехнологии и наноматериалы: Материалы Международной научно-техн. конференции (г. Москва, 30 – 31 марта, 1 апреля 2009 г.). – М.: МГОУ, 2009. – С. 238 – 241.

49. Aldunin, A.V. Rational Configuration of Finishing Group and Winding Unit for a Continuous Broad-Strip Mill [Текст] / A.V. Aldunin // Steel in Translation. – 2009. – V. 39. – N. 1. – P. 7 – 10.

50. Алдунин, А.В. Разработка и внедрение ресурсосберегающих технологий производства плоского проката из сплавов цветных металлов с заданными свойствами [Текст] / А.В. Алдунин, Р.Л. Шаталов, Н.Ш. Босхамджиев, В.Л. Зисельман // Цветная металлургия. – 2009. – № 11. – С. 29 – 30.

51. Алдунин, А.В. Использование диаграммы рекристаллизации цинк-титанового сплава для разработки режимов горячей прокатки полос [Текст] / А.В. Алдунин // Цветные металлы. – 2010. – № 9. – С. 73 – 75.

в изобретениях

52. А. с. 1127656 (СССР). Железнов, Ю.Д. Обводное устройство нереверсивной прокатной клетки ДУО [Текст] / Ю.Д. Железнов, А.В. Алдунин // Бюл. – 1984. – № 45.

53. Патент 2396134 (Россия). Алдунин, А.В. Способ производства горячекатаных полос из низкоуглеродистой стали [Текст] / А.В. Алдунин // Бюл. – 2010. – № 22.