

На правах рукописи

Чикишев Денис Николаевич



**СОЗДАНИЕ КОМПЛЕКСА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ
РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТОЛСТОЛИСТОВОГО
ПРОКАТА ИЗ МИКРОЛЕГИРОВАННЫХ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ
НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
КОМПЕНСАЦИИ**

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Магнитогорск – 2021

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Научный консультант – Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Салганик Виктор Матвеевич

Официальные оппоненты: **Мазур Игорь Петрович**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный
технический университет»,
заведующий кафедрой
обработки металлов давлением (г. Липецк)

Шаталов Роман Львович,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Московский политехнический
университет», профессор кафедры «Обработка
материалов давлением и аддитивные
технологии» (г. Москва)

Эфрон Леонид Иосифович,
доктор технических наук,
АО «Выксунский металлургический завод»,
научный руководитель инженерно-
технологического центра (г. Выкса)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Институт металлургии и
материаловедения им. А.А. Байкова Российской
академии наук» (г. Москва)

Защита состоится «18» мая 2021 г. в 14⁰⁰ час. на заседании диссертационного совета Д 212.111.01 на базе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, малый актовЫй зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на сайте <http://www.magtu.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Мезин Игорь Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Российская Федерация остаётся крупнейшей мировой державой, обеспечивающей топливно-энергетическими ресурсами многие страны. Объёмы добычи и транспортировки экологически чистого «голубого топлива» – природного газа – остаются на достаточно высоком уровне и продолжают расти, несмотря на серию санкционных мероприятий в отношении нашего государства. Идёт непрерывное освоение новых рубежей добычи газа, подчас с суровыми геолого-климатическими условиями. Продолжается строительство стратегических магистральных газопроводов «Сила Сибири», «Северный поток-2», «Турецкий поток», «ТАПИ», развитие северного мегапроекта «Ямал», Восточной газовой программы, а также освоение российского шельфа Арктики и Дальнего Востока.

Указанное выше говорит о высокой и растущей потребности газовой отрасли топливно-энергетического комплекса (ТЭК) России в наиболее ответственном виде металлопродукции – трубах большого диаметра (ТБД). Для удовлетворения потребностей ПАО «Газпром» и других энергетических компаний необходим высококачественный толстолистовой прокат (ТЛП) из микролегированных трубных сталей (МЛТС). Уровень свойств такой продукции предварительно формируется и последовательно изменяется на стадиях выплавки, доводки и непрерывной разливки МЛТС, и далее в процессах нагрева, прокатки и охлаждения ТЛП.

Таким образом, «МЛТС-ТЛП» – это сложная технологическая система, в которой реализуется многофакторный процесс последовательного формирования требуемых показателей качества полупродукта и готовой продукции. Диктуемое потребителями повышение комплекса требований к металлопродукции в сочетании с необходимостью обеспечения роста эффективности производства влечёт за собой неизбежный риск недостижения целевых показателей качества. В этих условиях особенно возрастает роль завершающих процессов технологической системы – непрерывной разливки кристаллизующейся слэбовой заготовки и её контролируемой прокатки. Более того, прокатная составляющая системы должна выполнять и важную компенсационную функцию в случае возможного отклонения некоторых характеристик полупродукта.

Для совершенствования технологической системы «МЛТС-ТЛП» в контексте обозначенной проблемы должна быть сформулирована концепция эффективного компенсационного воздействия, что требует разработки особого инструментария для научного анализа и решения технологических задач. Мы называем такой инструментарий методологией эффективной технологической компенсации. Данная методология включает совокупность взаимосвязанных научных приёмов, методов, алгоритмов и программ для анализа и синтеза эффективных технологических решений в системе «МЛТС-ТЛП».

Применение нового научного подхода позволило перейти к решению ключевых системных задач, связанных с получением толстолистового проката из микролегированных трубных сталей с реализацией эффективных ресурсосберегающих технологий производства.

Целью работы является создание комплекса ресурсосберегающих технологических решений по получению высококачественного толстолистового проката из микролегированных трубных сталей классов прочности K56-K65 на основе разработки и применения методологии эффективной технологической компенсации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие научно-технологические задачи:

1. Разработать новый подход совершенствования технологии производства толстолистового проката из микролегированной трубной стали на основе определения компенсационного воздействия на систему через совокупность технологических параметров температурно-деформационной обработки металла;

2. Сформировать комплекс математических и физических моделей для определения компенсационных технологических воздействий в системе производства толстолистового проката из микролегированных трубных сталей;

3. Установить зависимости механических свойств толстолистового проката от химического состава микролегированных трубных сталей категорий прочности K56-K65 в диапазоне изменения технологических параметров контролируемой горячей прокатки для выявления основных принципов эффективной технологической компенсации;

4. Применить разработанный методологический подход при определении рациональных технологических параметров толстолистовой контролируемой прокатки для компенсации целенаправленного снижения содержания легирующих элементов в трубных сталях классов прочности K56-K65;

5. Разработать методику поиска ресурсосберегающих компенсирующих режимов толстолистовой прокатки непрерывнолитых слябов с поверхностными дефектами (трещинами) из микролегированных трубных сталей при условии обеспечения сокращения величины обрезки боковых кромок листов;

6. Теоретически обосновать выбор компенсирующих режимов асимметричного деформирования непрерывнолитых слябов с температурным градиентом по толщине при условии минимизации sk_i -эффекта на переднем участке толстолистового раската;

7. Расширить представления об интенсифицировании компенсирующего деформационного воздействия на центральные слои металла при производстве толстолистового проката из непрерывнолитых слябов с повышенным уровнем осевой химической неоднородности.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1) Разработан новый научный подход совершенствования технологии производства толстолистового проката из микролегированной трубной стали, заключающийся в определении наиболее эффективного компенсационного воздействия на систему через комплекс технологических параметров температурно-деформационной обработки металла на этапах формирования непрерывнолитой заготовки и листа с целью обеспечения требуемых механических свойств продукции. В основе подхода стоит контроль химического состава и характеристик микролегированной трубной стали на ранних стадиях производства для корректировки последующих режимов обработки металла (нагрева под прокатку, режимов деформации по проходам, режимов термомеханической обработки и ускоренного охлаждения толстолистового проката) с применением комплексного критерия ресурсосбережения.

2) Установлены зависимости механических свойств толстолистового проката, таких как прочность, пластичность, вязкость (ИПГ) от химического состава, в том числе микролегирующих элементов трубных сталей категорий прочности K56-K65 в диапазоне изменения технологических параметров контролируемой горячей прокатки, на основе которых сформулированы принципы эффективной технологической компенсации, состоящие в интенсификации температурно-деформационных воздействий в случае снижения (в 2-4 раза) содержания микролегирующих элементов в трубных сталях, повышенного (на 5-10%) уровня осевой химической неоднородности, наличия поверхностных дефектов (трещин) и температурного градиента (15-20°C и более) по толщине непрерывнолитого сляба.

3) Разработан и реализован комплекс математических и физических моделей на основе конечно-элементного, нейросетевого и фрагментарного методов, отличающийся возможностью определения эффективных компенсационных технологических воздействий в системе производства толстолистового проката из микролегированных трубных сталей:

– толстолистовой термомеханической прокатке непрерывнолитых слябов из экономнолегированных трубных сталей классов прочности K56-K65 со сниженным содержанием легирующих элементов (ванадия, ниобия, никеля и др.) с учётом допустимого изменения деформационных и температурных воздействий на металл для достижения высокого комплекса прочностных, пластических и вязких свойств проката;

– толстолистовой прокатке непрерывнолитых слябов с поверхностными трещинами (продольными, поперечными и угловыми), трансформирующимися в дефекты листа с учётом фактора формы очага деформации и особенностей перемещения металла на лицевые поверхности раската вследствие температурной асимметрии;

– асимметричной толстолистовой прокатке непрерывнолитых слябов с неравномерным распределением температуры по толщине заготовки, приводящей к повышенной подгибке раската с учётом влияния фактора формы очага деформации, уровня критического обжата и рассогласования скоростей рабочих валков на напряжённо-деформированное состояние металла;

– толстолистовой прокатке непрерывнолитых слябов с повышенным уровнем осевой химической неоднородности, трансформирующейся в дефекты листа с учётом интенсивности предварительного мягкого обжата кристаллизующейся заготовки и температурно-деформационных воздействий на металл при контролируемой прокатке.

4) Предложен новый подход, состоящий в определении рациональных технологических параметров толстолистовой контролируемой прокатки для компенсации целенаправленного снижения содержания легирующих элементов в стали, отличающийся возможностью разработки компенсационных температурно-деформационных воздействий (интенсификации режимов черновой прокатки и ускоренного охлаждения в 1,2-1,5 раза) при производстве листов толщиной до 34,6 мм с повышенным (на 15%) комплексом прочностных, пластических и вязких свойств из экономнолегируемых трубных сталей классов прочности K56-K65 со сниженным (до 75%) содержанием марганца, хрома, ниобия, ванадия, меди и никеля.

5) Разработана методика поиска ресурсосберегающих режимов толстолистовой прокатки непрерывнолитых слябов из микролегируемой трубной стали, обеспечивающая сокращение (на 20-30 мм) величины обрезки боковых кромок толстолистового проката за счёт блокирующих воздействий на движение поверхностных трещин путём уменьшения коэффициента вытяжки (до 1,12-1,22) при разбивке ширины, снижения параметра формы очага деформации (до 0,75) на черновой и чистовой стадиях контролируемой прокатки, а также применения компенсирующей схемы поперечной прокатки.

6) Получено теоретическое обоснование определения компенсирующих режимов асимметричного деформирования непрерывнолитого сляба с температурным градиентом (15-20°C и более) по толщине, минимизирующих ski-эффект на переднем участке толстолистового раската за счёт рассогласования скоростей рабочих валков (до 15%) в зависимости от соотношения степени деформации, величины критического обжата за проход, положения нейтральной точки, толщины раската и температуры по сечению металла.

7) Развита положения об интенсифицировании деформационного воздействия на центральные слои металла при производстве толстолистового проката из непрерывнолитых слябов с повышенным (на 5-10%) уровнем осевой химической неоднородности за счёт разработки компенсирующих режимов дифференцированного мягкого обжата по ширине кристаллизующейся заготовки и переменной деформации по длине прокатываемого металла с максимизацией прикладываемой нагрузки в средней части раската.

Практическая значимость результатов заключается в следующем:

1. Разработан рациональный химический состав трубной стали класса прочности K56, микролегированной бором, со снижением содержания марганца на 17 (отн.)%, хрома – на 50 (отн.)% и ниобия – на 40 (отн.)% при сохранении требуемого уровня механических свойств ТЛП (патент РФ № 2593803);

2. Разработана и внедрена технология производства ТЛП из экономнолегированных трубных сталей со сниженным в два раза содержанием ванадия, обеспечивающая получение ТЛП класса прочности K60 толщиной 15,7-23,9 мм по ТУ 14-101-725-2009 и ТУ 14-101-5574-2009 с требуемым уровнем механических свойств (патент РФ № 2583973);

3. Разработана ресурсосберегающая технология производства ТЛП толщиной 25,8-34,6 мм по ТУ 14-101-725-2009 и ТУ 14-101-944-2013 из экономнолегированных трубных сталей класса прочности K52 (X56), K60 (X70) и DNV SAWL 485 с повышенной на 15% хладостойкостью в усовершенствованной технологической системе «МЛТС-ТЛП» (патент РФ № 2477323).

4. Разработана и внедрена в условиях ПАО «ММК» технология, реализующая принцип металлосбережения путём уменьшения на 20 мм норм обрези боковых кромок на основе компенсирующих воздействий, блокирующих движение трещин за счёт рационального значения коэффициента вытяжки (1,12-1,22) при разбивке ширины, снижения параметра формы очага деформации до 0,75 и применения схемы поперечной прокатки (патент РФ № 2490080).

5. Разработана и внедрена в ПАО «ММК» технология, позволившая стабилизировать процесс получения ТЛП из непрерывнолитых заготовок с неравномерной температурой металла по сечению за счёт минимизации ски-эффекта на переднем участке раската путём применения компенсирующих асимметричных режимов деформирования с рассогласованием скоростей рабочих валков в диапазоне 0,1-15,0% в зависимости от соотношения степени деформации, величины критического обжатия за проход, толщины раската и температуры металла (патент РФ № 2486974).

6. Разработана и внедрена в ПАО «ММК» сквозная технология производства ТЛП из непрерывнолитых слябов с повышенным уровнем осевой химической неоднородности, позволившая повысить механические свойства ТЛП в среднем на 12,6% на основе компенсирующего перераспределения обжатий по ширине кристаллизующегося сляба и дифференцированной степени деформации по длине раската (НИОКР по договору № 229991).

7. Основные результаты диссертационной работы получены и внедрены в промышленное производство при выполнении научно-исследовательских работ в рамках хозяйственной тематики между МГТУ и ММК (семь завершённых НИОКР).

8. Значимость результатов диссертационного исследования подтверждается успешным выполнением госбюджетных работ: государственного задания на выполнение НИР в сфере научной деятельности, АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы», ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, программы стратегического развития ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

9. Способы производства ТЛП из МЛТС, включающие экономнолегированные химические составы стали и компенсирующие технологические воздействия на процессы получения заготовок и проката, защищены пятью патентами РФ.

10. Суммарный экономический эффект от внедрения новых технологических решений, полученных по результатам работы, в условиях действующего промышленного производства составил более 175 млн рублей.

Методология и методы исследования

Основным научным подходом в диссертационной работе является методология эффективной технологической компенсации. В работе выполнен анализ и обобщение результатов математического и физического моделирования, а также промышленных экспериментов. В качестве материалов для проведения обширных исследований использовались непрерывнолитые заготовки и ТЛП из МЛТС классов прочности К56-К65.

Теоретическая часть работы выполнена с применением современных методов математического моделирования – метода конечных элементов с использованием специализированных инженерных программных комплексов Deform, Abaqus и Ansys, а также нейросетевого моделирования с использованием программного комплекса Statistica. Для подтверждения адекватности применяемых моделей и лабораторного исследования использовали физическое моделирование с применением специализированного оборудования ИЦ «Термодеформ-МГТУ» – плавильной печи ИСТ-0,03/0,05 И1 с двумя плавильными узлами, промежуточным ковшом и изложницей, вакуумной печи (ZG-0,06L) с машиной непрерывного литья заготовок, камерной печи ПКМ 3.6.2/12.5, гидравлического пресса П6334 и реверсивного стана «Дуо 500» горячей прокатки, совмещённого с установкой ускоренного контролируемого охлаждения. Промышленные эксперименты проводились в условиях ПАО «ММК».

Положения, выносимые автором на защиту:

1) Новый научный подход совершенствования технологии производства толстолистового проката из микролегированной трубной стали, заключающийся в определении наиболее эффективного компенсационного воздействия на систему через комплексный критерий ресурсосбережения в процессах температурно-деформационной обработки металла;

2) Зависимости механических свойств толстолистового проката от химического состава микролегированных трубных сталей категорий прочности K56-K65 в диапазоне изменения технологических параметров контролируемой горячей прокатки, а также принципы эффективной технологической компенсации для случаев снижения содержания микролегирующих элементов, повышенного уровня осевой химической неоднородности, наличия поверхностных дефектов и температурного градиента по толщине непрерывнолитого сляба;

3) Комплекс математических и физических моделей на основе конечно-элементного, нейросетевого и фрагментарного методов с возможностью определения эффективных компенсационных технологических воздействий в системе производства толстолистового проката из микролегированных трубных сталей;

4) Новый подход, состоящий в определении рациональных технологических параметров толстолистовой контролируемой прокатки для компенсации целенаправленного снижения содержания легирующих элементов в трубных сталях классов прочности K56-K65;

5) Методика поиска ресурсосберегающих режимов толстолистовой прокатки непрерывнолитых слябов из микролегированной трубной стали, обеспечивающая сокращение величины обрезки боковых кромок толстолистового проката;

6) Теоретическое обоснование определения компенсирующих режимов асимметричного деформирования непрерывнолитого сляба с температурным градиентом по толщине, минимизирующих ски-эффект на переднем участке толстолистового раската;

7) Положения об интенсифицировании деформационного воздействия на центральные слои металла при производстве толстолистового проката из непрерывнолитых слябов с повышенным уровнем осевой химической неоднородности.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов, достигнутых в диссертационном исследовании, обеспечивается применением аппарата математических моделей, базирующихся на современных достижениях в области теории ОМД, физики металлов и металлургии, а также методов компьютерного моделирования технологических процессов; большим объемом данных физических и промышленных экспериментов, испытаний механических свойств, а также применением статистической обработки данных по общепризнанным методикам.

Основные положения диссертационной работы успешно апробировались на конференциях и конгрессах различного уровня: Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии обработки металлов давлением» (г. Москва, 2011 г.), V конференции молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий» (г. Москва,

2014 г.), Международном научно-техническом конгрессе «ОМД 2014» (г. Москва, 2014 г.), VI-XI Конгрессах прокатчиков (Череповец, Липецк, Москва, Магнитогорск, 2005-2017 гг.), Международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии» (г. Санкт-Петербург, 2009 г.), Международной научно-практической конференции «Инженерные системы» (г. Москва, 2010 г.), Международной научно-практической конференции «Трубы» (г. Челябинск, 2014-2016 гг.), Международной конференции молодых специалистов «Металлургия XXI века» (г. Москва, 2005-2007 гг.), Международной научно-технической конференции «Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов» (г. Санкт-Петербург, 2007 г.), Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, 2011-2019 гг.), METAL 2019 - 28th International Conference on Metallurgy and Materials и др. конференциях.

Внедрение результатов диссертационных исследований. Результаты диссертационной работы в виде новых технологических решений внедрены в промышленных условиях ПАО «ММК», используются при проведении научно-исследовательской работы обучающихся, чтении специальных дисциплин по направлению «Металлургия» в ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

Личный вклад автора. Результаты диссертационной работы и научные положения, выносимые на защиту, основываются на многочисленных исследованиях под руководством и с активным участием автора при проведении НИР в рамках хоздоговорных и госбюджетных тематик. Личный вклад соискателя состоит в постановке цели и задач исследования, обоснованном выборе методов решения научно-технических и технологических проблем, создании комплекса моделей, анализе и интерпретации результатов численного и физического моделирования, проведении лабораторных и производственных экспериментальных исследований, формулировке основных положений и выводов. Опытное-промышленное опробование, коррекция и внедрение в производство разработанных новых технологических решений осуществлялось при непосредственном участии автора.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы достаточно полно отражено в 46 научных трудах, из них 17 статей в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ, 3 статьи в изданиях, входящих в наукометрические базы данных Web of Science и Scopus, 3 монографии, 5 патентов РФ на изобретения.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и 9 приложений. Текст диссертации изложен на 372 страницах машинописного текста, иллюстрирован 216 рисунками, содержит 56 таблиц. Библиографический список включает 353 источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во вводной части диссертации показана её актуальность, обусловленная стратегическим значением и ростом потребности нефтегазового комплекса страны в толстолистовом прокате из микролегированных трубных сталей с уникальным сочетанием свойств; сформулированы цель, задачи, методы исследования, а также научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе проведён анализ современного состояния и основных направлений развития процессов получения микролегированных трубных сталей (МЛТС) и толстолистового проката (ТЛП) как элементов технологической системы «МЛТС-ТЛП».

Выполнен литературный обзор существующих и перспективных требований потребителей к качественным характеристикам проката из микролегированных трубных сталей. Рассмотрена современная металлургическая концепция разработки МЛТС и ТЛП для нефтегазовой отрасли. Выполнен анализ направлений развития теории, техники и технологий в области производства МЛТС и получения ТЛП для труб большого диаметра (ТБД). При изучении работ научных школ Матросова Ю.И., Морозова Ю.Д., Эфрона Л.И., Колбасникова Н.Г., Рудского А.И., Коджаспирова Г.Е., Настича С.Ю., Колесникова А.Г., Шабалова И.П., Мазура И.П., Зайцева А.И., Пышминцева И.Ю., Выдрина А.В., Хлусовой Е.И., Родионовой И.Г., Маркова С.И., Орлова В.В., Матросова М.Ю., Погоржельского В.И., Шахпазова Е.Х., Гуркалова П.И., Рыбина В.В., Горынина И.В., Мальшевского В.А., Салганика В.М., Рашникова В.Ф., Песина А.М., Денисова С.В., Румянцева М.И., Хайстеркампа Ф., Хулки К. и других учёных, посвященных данной тематике, а также опыта ведущих металлургических предприятий отмечено, что одним из ключевых факторов конкурентоспособности ТЛП на мировом рынке является применение эффективных ресурсосберегающих технологий, включающих материалосбережение, энергосбережение и металлосбережение.

Показано, что топливно-энергетический комплекс играет важнейшую стратегическую роль в экономике и промышленности России. При этом развитие нефтегазового комплекса предполагает, с одной стороны, увеличение рабочего давления транспортируемых углеводородов, а с другой – повышение надёжности и безопасности эксплуатации трубопроводных магистралей. Выполнение этих требований неизбежно сопровождается повышением стоимости МЛТС и ТЛП. Дальнейший рост комплекса свойств диктует необходимость разработки новых ресурсосберегающих технологий.

Анализ показал, что процессы производства микролегированных трубных сталей и толстолистового проката являются взаимосвязанными и взаимозависимыми, что позволяет представить их в виде технологической системы «МЛТС-ТЛП», связывающей сталеплавильный и листопрокатный комплексы. Обеспечение эффективности ресурсосберегающих технологий в этой системе представляет собой сложную научно-техническую проблему.

Для успешного решения такой проблемы необходимо построить эффективный методологический подход, формирующий наиболее полное представление об элементах технологической системы, связях между ними и особенностях взаимодействия, рычагах управления технологическими процессами, что в конечном итоге позволит получить высококачественный толстолистовой прокат из микрولةгированных трубных сталей.

Во второй главе разработана методология эффективной технологической компенсации в виде инструментария для научного анализа и комплексного совершенствования технологической системы «МЛТС-ТЛП».

Для наиболее полного охвата и эффективного анализа всех возможных воздействий предложено рассматривать производственно-технологическую структуру, включающую три иерархических уровня (этажа). Каждый уровень (этаж) в этой структуре состоит из интеллектуальной и производственной ступени с формированием соответствующих интеллектуально-производственных модулей (ИПМ). В технологической системе «МЛТС-ТЛП» интеллектуальная ступень первого уровня (этажа) обеспечивает оперативную работу отдельных производственных агрегатов, на втором – связана с разработкой моделей, алгоритмов, программ и определением на их основе рациональных значений технологических параметров. На третьем уровне (этаже) иерархии генерируется комплексная методология как совокупность взаимосвязанных элементов нижних уровней (рис. 1).

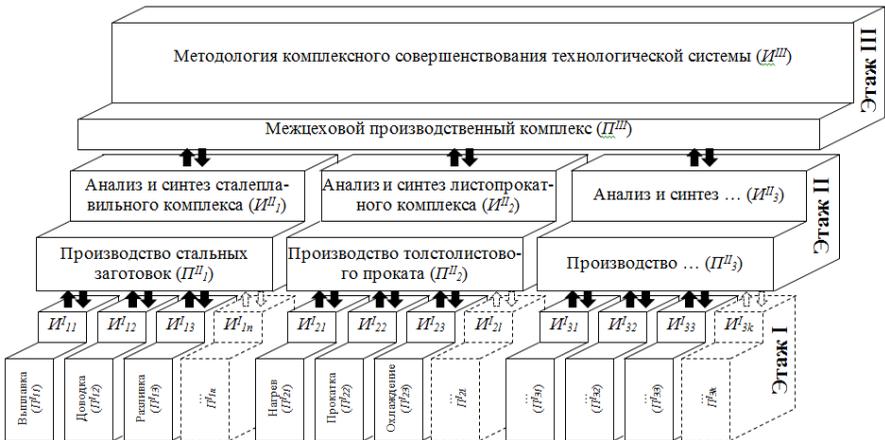
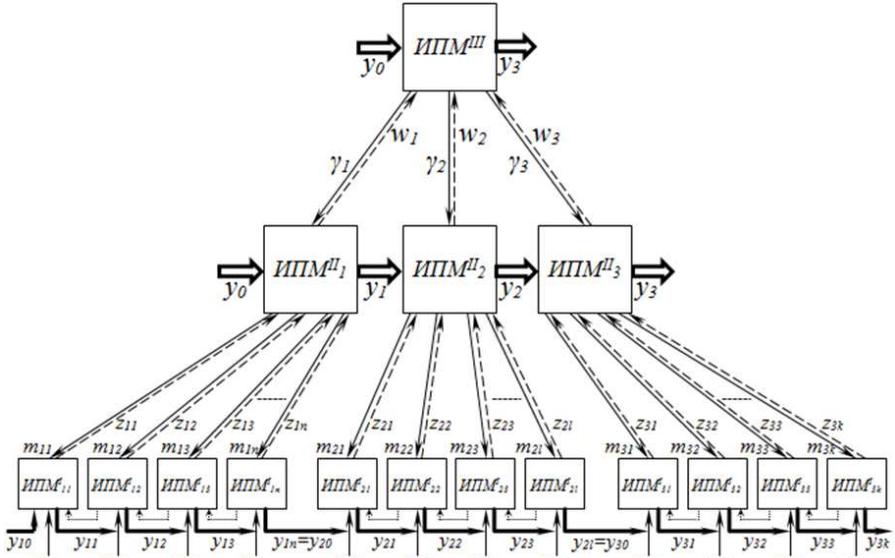


Рис. 1. Иерархическая схема интеллектуально-производственной структуры технологической системы «МЛТС-ТЛП»

В результате преобразования иерархической структуры в трёхуровневую систему взаимодействия интеллектуально-производственных модулей получили следующую картину взаимодействий (рис. 2). Применение инструмента декомпозиции этих модулей позволило выделить в них интеллектуаль-

ную и производственную составляющие (соответственно – ИСМ и ПСМ) для каждого уровня иерархии (рис. 3). Общие принципы формализации материального потока, проходящего через интеллектуально-производственные модули технологической системы «МЛТС-ТЛП», послужили основным механизмом для многоэтапной разработки эффективных ресурсосберегающих технологий.

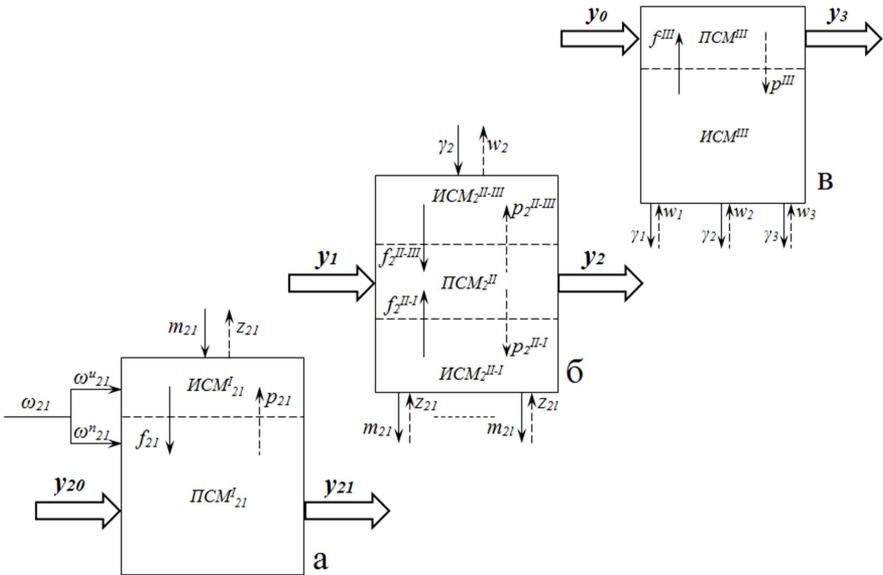


ИПМ – интеллектуально-производственный модуль; y – материальный поток; w – сигналы обратной связи; γ – координирующие сигналы; z – обобщенная технологическая информация; m – технологические режимы (управляющие воздействия); ω – внешние воздействия

Рис. 2. Взаимодействие интеллектуально-производственных модулей в трёхуровневой технологической системе «МЛТС-ТЛП»

На первом этапе выполнялся анализ производственных составляющих на всех уровнях рассматриваемой иерархии. Далее осуществлялся синтез – преобразование элементов технологической системы «МЛТС-ТЛП». В итоге определялась совокупность координирующих сигналов на высшем уровне в сталеплавильный и листопрокатный комплексы.

При переходе на второй уровень эти сигналы преобразовывались в исходные данные для моделирования, на основе которого разрабатывались ресурсосберегающие технологии в системе «МЛТС-ТЛП». Результаты осуществляемого в $ИСМ_i^{II-1}$ локального моделирования отдельных технологических операций и процессов передавались на первый уровень в виде режимов (управляющих воздействий).



f – функциональные (технологические) воздействия;
 p – обобщённая технологическая информация

Рис. 3. Интеллектуально-производственные модули (ИПМ) первого (а), второго (б) и третьего (в) уровней иерархии

При совершенствовании технологической системы «МЛТС-ТЛП» первостепенное значение отдавалось разработке эффективных технологических воздействий, а также выявлению резервов дополнительных компенсационных возможностей ИПМ. При этом недостаточное технологическое воздействие на предшествующих операциях компенсировалось целенаправленным усилением одного из показателей с целью обеспечения требуемого уровня свойств. Более того, располагая определённым резервом мощности последующих технологических воздействий, решались задачи о целенаправленном понижении уровня некоторых воздействий на предыдущих этапах.

Соответственно, в технологическую систему вводится особый показатель уровня функционального воздействия ξ , позволяющий управлять эффективными компенсационными воздействиями. С учётом этого показателя уровень свойств ТЛП будет формироваться следующим образом:

$$q_{ki} = q_{0i} \times f_{1i}^{\xi_{1i}} \times \dots \times f_{(k-1)i}^{\xi_{(k-1)i}} \times f_{ki}^{\xi_{ki}}. \quad (1)$$

В случае, если в одном из ИПМ наблюдается недостаточное функциональное воздействие (например, $\xi'_1 < 1$), то такое состояние системы может

быть исправлено эффективным компенсационным технологическим воздействием на последующих ИПМ (например, $\xi'_{k-1} > 1$). При этом выбор необходимого воздействия определяется на основании анализа технологической системы с применением критерия эффективности ресурсосбережения:

$$K_{ij}^{PC} = \{K_{ij}^{MaC}; K_{ij}^{MeC}; K_{ij}^{\partial nC}\}, \quad (2)$$

где K_{ij}^{MaC} , K_{ij}^{MeC} , $K_{ij}^{\partial nC}$ – соответственно критерии материало-, металло- и энергосбережения, характеризующие сокращение исходных материалов, потерь металла и энергетических затрат при производстве МЛТС и ТЛП.

Ключевая роль в этом подходе принадлежит моделированию с применением аппарата математических и физических моделей. Для математического описания сложных многофакторных металлургических процессов применяли методы конечно-элементного и нейросетевого моделирования. На базе метода конечных элементов построены расчётные схемы, реализованные в программных комплексах Deform, Abaqus и Ansys. При этом фундаментальная система уравнений, описывающая поведение сплошной среды при деформировании, оставалась неизменной:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{ki}}{\partial x_i} + \rho X_k = 0; & \varepsilon_{ik} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \frac{\partial U_k}{\partial x_i} \right); \\ \sigma_{ik} - \delta \sigma_0 = 2G(\varepsilon_{ik} - \delta \varepsilon_0); & p_{iv} = \sigma_{ik} l_k, \end{cases} \quad (3)$$

где $\sigma_{ki} = \sigma_{ik}$ – компоненты тензора напряжений; ρ – плотность тела; X_k – компоненты объёмной силы; ε_{ik} – компоненты тензора деформаций; U_i , U_k – компоненты перемещений; δ – коэффициент, равный 0 (при $i \neq k$) и 1 (при $i = k$); σ_0 – среднее гидростатическое напряжение; G – модуль упругости; ε_0 – средняя деформация; p_{iv} – проекции напряжения на граничной поверхности; l_k – направляющие косинусы.

Решение поставленных задач выполнялось согласно следующей последовательности: описание реологии деформируемой среды и граничных условий; назначение искоемых (варьируемых) величин, выбор вариационного принципа и составление вариационного уравнения; представление выбранного вариационного принципа для конкретной деформируемой среды с помощью физических уравнений; решение вариационного уравнения методом конечных элементов.

Точность решения задачи зависела от применяемой модели описания деформируемой среды. Применяя метод вязко-пластических слабо сжимае-

мых конечных элементов Кудо-Мори-Осакада-Песина, напряжения $\{\sigma\}$ рассчитывали в зависимости от скорости деформации $\{\dot{\epsilon}\}$:

$$\{\sigma\} = [D]\{\dot{\epsilon}\}; \quad \{\dot{\epsilon}\} = \frac{2}{3}\dot{\epsilon}'_{ij}\dot{\epsilon}'_{ij} + \frac{1}{g}\dot{\epsilon}_0^2, \quad (4)$$

где $[D]$ – матрица жёсткости конечного элемента; $\dot{\epsilon}'_{ij}$ – девиатор скоростей деформации; $\dot{\epsilon}_0$ – объёмная скорость деформации.

Геометрию деформируемого материала определяли по координатам узлов конечных элементов:

$$\begin{aligned} x_i(t + \Delta t) &= x_i(t) + \dot{U}_{xi} \cdot \Delta t; & y_i(t + \Delta t) &= y_i(t) + \dot{U}_{yi} \cdot \Delta t; \\ z_i(t + \Delta t) &= z_i(t) + \dot{U}_{zi} \cdot \Delta t, \end{aligned} \quad (5)$$

где x_i, y_i, z_i – координаты узла i ; t – начальное время; Δt – приращение времени; $\dot{U}_{xi}, \dot{U}_{yi}, \dot{U}_{zi}$ – скорости перемещений i -го узла по оси x, y и z соответственно.

Зарождение и раскрытие несплошностей при прокатке оценивали по критерию, учитывающему максимальное растягивающее напряжение σ_{\max} :

$$\int_{\bar{\epsilon}} \frac{\sigma_{\max}}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} \geq C, \quad (6)$$

где C – критическое значение критерия разрушения.

Для статистического анализа большого объёма технологических данных применяли метод нейросетевого моделирования. С использованием нейронных сетей в работе решались прямые и обратные задачи с определением необходимых технологических режимов для достижения требуемого комплекса механических свойств ТЛП при заданном химическом составе МЛТС и геометрических параметрах изделия.

При математическом моделировании ключевой проблемой являлось обеспечение адекватности применяемого аппарата, что потребовало дополнительных исследований. Предложено выполнять фрагментарное физическое моделирование, заключающееся в имитации с помощью моделирующего оборудования самых важных технологических операций. В диссертационной работе использовались результаты фрагментарного физического моделирования металлургических процессов, полученные в условиях инжинирингового центра «Термодеформ-МГТУ».

В третьей главе разработаны новые технологические решения для получения ТЛП из экономнолегированных трубных сталей, сочетающих комплекс высоких прочностных, пластических и вязких свойств. Для этого вы-

полнена оценка технологической значимости основных операций при производстве ТЛП. Определены эффективные способы компенсации понижения свойств ТЛП от реализации материалосберегающих мероприятий в подсистеме получения МЛТС. Оценены возможности использования технологического резерва имеющегося оборудования для дополнительного повышения уровня свойств производимого ТЛП.

Снижение содержания дорогостоящих легирующих элементов было компенсировано новыми режимами контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения, внедрённых в условиях ТЛС 5000 ПАО «ММК». В результате был получен ТЛП с заданным комплексом механических свойств, отвечающим требованиям ПАО «ЧТПЗ».

Для анализа были выбраны наиболее востребованные МЛТС класса прочности K56-K65 и ТЛП толщиной от 15 до 25 мм. В качестве замещающих технологических воздействий исследовались режимы нагрева и обжаты, направленные на улучшение деформационной проработки рекристаллизующегося аустенита, а также режимы ускоренного контролируемого охлаждения. Установлено, что применение данного комплекса воздействий является наиболее эффективным при снижении ванадия, как одного из дорогостоящих микролегирующих элементов в МЛТС. Также исследовалась возможность компенсации снижения содержания дорогостоящих легирующих элементов (Nb, V, Ni, Cr, Cu, Mo) в МЛТС микродобавками бора и технологическими воздействиями, обеспечивающими повышение прочностных свойств ТЛП.

Для проведения комплексного исследования разработан аппарат моделей, позволяющий анализировать все этапы термомеханической обработки ТЛП (нагрев сляба, черновая прокатка, подстуживание промежуточного раската, чистовая прокатка, ускоренное охлаждение). В качестве физической модели процесса термомеханической обработки ТЛП использовали оборудование инжинирингового центра «Термодеформ-МГТУ».

Применение разработанного комплекса моделей позволило определить температуру нагрева сляба, режимы обжаты и охлаждения, спрогнозировать рост зерна аустенита, исследовать прочностные характеристики ТЛП. Установлено, что для эффективного измельчения зерна аустенита на черновой стадии прокатки необходимо снижать температуру нагрева сляба до 1160°C, а прокатку проводить за 4-6 проходов с частными обжатыми не менее 17-18%. Это гарантирует получение в центре раската зёрен размером 60-80 мкм, а на поверхности – 30-40 мкм.

С учетом ограничивающих производственных факторов, для более эффективного измельчения зерна аустенита предложено черновую прокатку проводить за большее количество (7-8) проходов с частными обжатыми на уровне 12-13% при пониженной температуре нагрева сляба (1160-1170°C).

В качестве исходной заготовки необходимо применять сляб толщиной не менее 300 мм.

Таким образом, применение комплекса моделей первого и второго иерархического уровней позволило спрогнозировать достигаемые прочностные характеристики ТЛП с учётом влияния химического состава МЛТС, режимов термомеханической прокатки и ускоренного охлаждения. Результаты теоретических исследований позволили перейти с совершенствованием технологической системы «МЛТС-ТЛП» – решению прикладных научно-технических задач производства ТЛП из экономнолегированных МЛТС в условиях ПАО «ММК».

Предложено два новых способа получения ТЛП из экономнолегированных МЛТС: во-первых, за счёт снижения содержания дорогостоящих легирующих элементов (V, Ni, Cu) с компенсацией замещающими технологическими воздействиями в *ИПМ*₂; во-вторых, путём частичной взаимозамены дорогостоящих легирующих элементов (Mn, Cr, Nb) компенсационными микродобавками бора в *ИПМ*₁ и контролем определённых технологических параметров в *ИПМ*₂.

По первому способу опробовано пять вариантов изменения химического состава МЛТС для производства ТЛП по ТУ 14-101-782-2010 и ТУ 14-101-725-2009 – снижение ванадия в 2 раза с 0,045-0,060% до 0,020-0,035%; снижение никеля в 2 раза с 0,2-0,3 % до 0,1-0,2%; снижение меди в 2 раза с 0,1-0,2% до 0,0-0,1%; снижение ванадия в 4 раза с 0,045-0,060% до 0,0-0,015%; совместное снижение ванадия (с 0,045-0,060% до 0,0-0,015%) и меди (с 0,1-0,2% до 0,0-0,08%).

Для компенсации снижения содержания микролегирующих элементов разработан комплекс замещающих технологических воздействий, реализуемых в *ИПМ*₂: применение сляба максимальной толщины (300-350 мм); ограничение количества черновых проходов (7-10); увеличение скорости охлаждения до 14-22°С/с; снижение температуры конца ускоренного охлаждения до 555±15°С. Промышленные испытания проводились в условиях ПАО «ММК» согласно технологическим письмам.

Второй способ (взаимозамена легирующих элементов) рассмотрен применительно к ТЛП из МЛТС класса прочности К56 толщиной 14-21 мм по ТУ-14-101-775-2010 и ТУ-14-101-882-2012. Предложено два варианта изменения химического состава МЛТС: первый – применение бора (0,0010-0,0025%) в качестве микролегирующего элемента, компенсирующего снижение марганца (с 1,55-1,70% до 1,40-1,55%), хрома (с 0,1-0,2% до 0,0-0,1%) и ниобия (с 0,040-0,050% до 0,030-0,045%); второй – аналогично первому варианту, но с большим снижением содержания ниобия (до 0,020-0,035%).

Для обеспечения требуемых прочностных и пластических свойств ТЛП разработан комплекс компенсационных технологических воздействий в

*ИПМ*₂: температура конца прокатки – 840±15°С; скорость охлаждения – 8,0÷16,0°С/с; температура конца ускоренного охлаждения:

$$T_{к.у.о.} = 4 \cdot 10^4 \cdot B + 560 \pm 15, \quad (7)$$

где *B* – содержание бора в стали, мас. %.

Промышленные эксперименты выполнялись в соответствии с технологическими письмами по следующим ресурсосберегающим направлениям: снижение ванадия, никеля и меди в два раза в МЛТС класса прочности К60; снижение ванадия в четыре раза в МЛТС класса прочности К60; применение бора в качестве микролегирующего элемента, компенсирующего снижение марганца, хрома и ниобия в МЛТС класса прочности К56-К60.

Выполнен анализ фактического влияния технологических воздействий, осуществляемых в *ИПМ*₂, на механические свойства ТЛП. Анализ расчётного и фактического изменения свойств ТЛП при изменении химического состава стали показал достаточно хорошую сходимость результатов моделирования и промышленного эксперимента (80-90%).

В результате, к внедрению были рекомендованы изменения в действующую технологию производства ТЛП из МЛТС класса прочности К60 со сниженным в два раза содержанием ванадия (с 0,045-0,060% до 0,020-0,035%). Согласно рекомендованным изменениям организовано производство ТЛП в диапазонах толщин 15,7-19,0 мм и 20,0-23,9 мм по ТУ 14-101-725-2009. Результаты испытаний подтверждают обеспечение заданного уровня механических свойств. Экономия от снижения себестоимости ТЛП при внедрении данных технологических мероприятий составила 590 руб./т.

Применение бора в качестве микролегирующего элемента при производстве ТЛП класса прочности К56 толщиной 14,0-17,9 мм по ТУ-14-101-775-2010 и ТУ-14-101-882-2012 позволило компенсировать уменьшение содержание марганца, хрома и ниобия с достигнутой экономией от снижения себестоимости ТЛП в размере 500 руб./т.

Таким образом, с применением методологии эффективной технологической компенсации разработаны научно-обоснованные технологические решения по производству ТЛП из экономнолегируемых МЛТС, выполнено их промышленное опробование, коррекция и внедрение. Для дальнейшего совершенствования технологической системы «МЛТС-ТЛП» решена задача переконфигурации её модулей с изменением последовательности обработки.

В частности, предложено использовать промежуточное ускоренное охлаждение раската и его подогрев перед чистовой стадией деформирования в качестве компенсирующих технологических воздействий при исключении энергозатратной операции термической обработки ТЛП. Для исследования возможности повышения свойств ТЛП по предлагаемому решению выполнили моделирование в модулях *ИПМ*₁ и *ИПМ*₂. С этой целью разработаны физические модели производства ТЛП по разным технологическим вариантам,

реализованные в условиях инжинирингового центра «Термодеформ-МГТУ». В общей сложности было осуществлено более двадцати выплавов МЛТС различного химического состава, соответствующими требованиям ТУ 14-101-725-2009 и ТУ 14-101-944-2013.

Результаты испытаний образцов из ТЛП, изготовленного по традиционной и новой схемам, представлены в табл. 1. Полученные данные позволяют утверждать, что применение технологии двойного нагрева с ускоренным промежуточным охлаждением даёт возможность производства проката с повышенной хладостойкостью.

Табл. 1. Результаты испытаний образцов на ударный изгиб по ГОСТ 30456-97 и API RP 5L3 при температуре минус 20°С (ИПГ и DWTT)

Толщина, мм	Плавка	Традиционная технология		Технология двойного нагрева с промежуточным охлаждением	
		Образец	Доля вязкой составляющей, %	Образец	Доля вязкой составляющей, %
25,8	1	111	85	112	100
	2	121	85	122	100
34,6	1	212	70	211	95
	2	222	97	221	100

Полученный комплекс научно-технических результатов продемонстрировал эффективность функционирования предложенной методологии при совершенствовании технологической системы «МЛТС-ТЛП». Применение нового инструментария позволило добиться не только материалосбережения при снижении содержания легирующих элементов в 2-4 раза, энергосбережения (на 10-15%) при эффективной технологической компенсации процесса термообработки, но и повысить свойства ТЛП (до 15%).

В четвертой главе рассмотрено применение разработанного методологического подхода при решении задач металлосбережения на примере создания эффективных системных решений по предотвращению образования и развития прикромочных трещин ТЛП из МЛТС.

Разработана конечно-элементная математическая модель, описывающая напряженно-деформированное состояние металла при наличии поверхностных трещин. Возможность образования и развития трещин в процессе пластической деформации оценивали по критерию вязкого разрушения Кокрофта (6). Данная модель была адаптирована к условиям прокатки на толстолистовом стане 5000 ПАО «ММК». На её основе выполнено математическое моделирование трансформации поверхностных дефектов сляба.

При моделировании толстолистовой прокатки сляба с продольной осевой трещиной установлено, что с увеличением степени деформации происходит пропорциональное удлинение дефекта в направлении прокатки и уменьшение глубины его залегания. Чем меньше начальные размеры трещины и

выше коэффициент продольной вытяжки, тем больше вероятность полного выкатывания такого дефекта. Выполнен детальный анализ трансформации наиболее распространённых видов поверхностных трещин слябов из МЛТС: осевых, кромочных, ребровых и поперечных.

Для исследования и описания механизма перемещения трещины с торцевой грани сляба выполнили численное моделирование процесса разбивки ширины при прокатке заготовки из МЛТС класса прочности К60. Установлено, что при прокатке сляба с неравномерным температурным полем по сечению характер формоизменения металла (по сравнению с симметричным случаем) заметно меняется. Вытяжка со стороны более горячей поверхности выше, поэтому при прокатке происходит наклон или «заваливание» торцевых граней к нижней более холодной поверхности. В результате переход металла на нижнюю поверхность раската усиливается, и трещины смещаются на значительное расстояние от кромок (рис. 4).

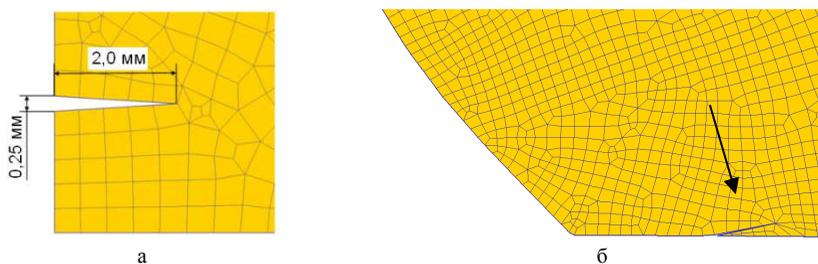


Рис. 4. Смещение трещины с торцевой грани сляба на нижнюю поверхность: (а) начальные размеры; (б) форма дефекта после пятого прохода

Обеспечение симметричного температурного поля по толщине сляба позволит осуществить эффективное компенсационное блокирование и торможение движения трещин от кромок раската с уменьшением величины обреза.

Также установлено, что эффективным способом уменьшения смещения трещин от кромок ТЛП является использование калиброванных вертикальных валков. Кроме того, значительное влияние на смещение трещин от кромок ТЛП оказывает направление прокатки: в поперечных проходах переход металла на поверхности контакта увеличивается в μ_p раз, где μ_p – коэффициент вытяжки при разбивке ширины.

В результате моделирования найдено, что со снижением очага деформации при прокатке (увеличением обжатия) существеннее проявляется смещение трещин от кромок раската. Для сдерживания такого смещения в допустимом диапазоне (не более 50 мм) необходимо вести процесс прокатки так, чтобы параметр формы очага деформации не превышал значения 0,75. Установлена взаимосвязь параметра формы очага деформации, толщины раската и обжатия за проход (табл. 2).

Табл. 2. Взаимосвязь параметра формы очага деформации, толщины раската и обжатия за проход

Толщина H , мм	Параметр формы очага деформации L_d/H_{cp}											
	Обжатие за проход ϵ , %											
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
300	0,41	0,44	0,47	0,49	0,52	0,54	0,56	0,59	0,61	0,63	0,65	
270	0,44	0,47	0,49	0,52	0,55	0,57	0,60	0,62	0,64	0,67	0,69	
...	
190	0,52	0,56	0,59	0,62	0,65	0,68	0,71	0,74	0,77	0,80	0,82	
180	0,54	0,57	0,61	0,64	0,67	0,70	0,73	0,76	0,79	0,82	0,85	
...	
120	0,66	0,70	0,74	0,78	0,82	0,86	0,90	0,93	0,97	1,00	1,04	
110	0,69	0,73	0,78	0,82	0,86	0,90	0,94	0,97	1,01	1,05	1,08	
...	
60	0,93	0,99	1,05	1,11	1,16	1,22	1,27	1,32	1,37	1,42	1,47	
50	1,02	1,09	1,15	1,21	1,27	1,33	1,39	1,45	1,50	1,56	1,61	

Примечание: Серым цветом выделены допустимые значения параметра формы очага деформации, при которых смещение трещин от кромок не превышает 50 мм

Анализ позволил установить, что при производстве ТЛП первая протяжка перед разбивкой ширины целесообразна для улучшения формы раскатов и уменьшения перехода дефектов на широкие поверхности листа. Вытяжка в поперечных проходах, наоборот, увеличивает переходы дефектов, при этом смещение трещин от кромок может достигать 80 мм и более. Таким образом, для компенсирующего блокирования движения дефектов необходимо, во-первых, ограничивать коэффициент вытяжки при разбивке ширины до значений 1,2-1,3, а во-вторых, увеличивать соотношение коэффициентов при протяжке и разбивке сверх 0,8.

Анализ теплового состояния заготовки показал, что с увеличением температурного градиента увеличивается переход металла на нижнюю (более холодную) поверхность раската. Следовательно, для возможности компенсирующего блокирования движения трещин от кромок необходимо ограничивать неравномерность нагрева сляба по толщине градиентом температур, не превышающим 20°C.

Расчётным путём найдено, что уже после выхода сляба из печи его температурное поле становится неравномерным (рис. 5, а): рёбра сляба имеют самую низкую температуру. Сочетание двух факторов – перехода металла с боковой грани и низкой температуры рёбер сляба – приводит к образованию и развитию кромочных трещин. Повышение температуры ребровой зоны сляба позволит снизить вероятность образования и развития прикромочных трещин. Этого можно достичь, например, путем формирования круглых или

скошенных фасок непрерывнолитых заготовок (рис. 5, б). При этом температура в этих зонах увеличивается на 60-80°C.

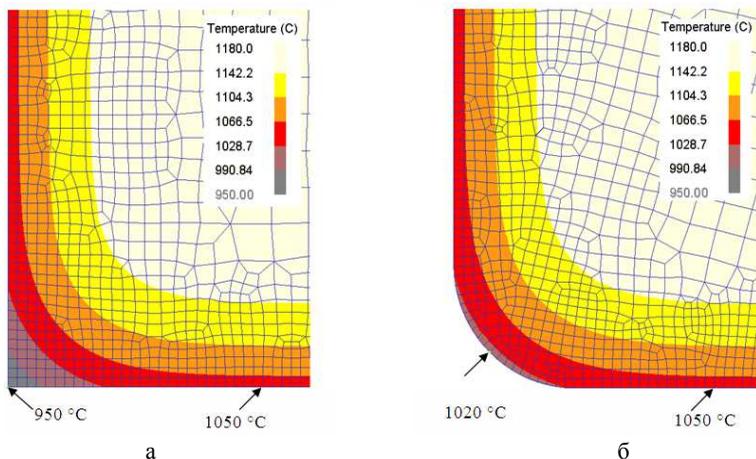


Рис. 5. Температурное поле ребровой зоны непрерывнолитого сляба: (а) прямоугольный сляб; (б) сляб с круглыми фасками радиусом 40 мм

Установлено, что характер формоизменения металла при прокатке существенно зависит от величины рассогласования скоростей рабочих валков. При этом вытяжка металла со стороны ведущего валка увеличивается относительно вытяжки со стороны ведомого валка (при толщине раската более 50 мм). В результате образуется наклон торцевых граней и переход металла на поверхность с меньшей вытяжкой (сторона ведомого валка) увеличивается.

Результаты опытно-промышленного эксперимента показали, что продольная схема прокатки без разбивки ширины для компенсирующего блокирования движения трещин от кромок раската является наиболее эффективной. Максимальная величина смещения дефектов от кромок составила 30-40 мм. При этом снижается вероятность образования новых прикромочных трещин.

Продольная прокатка с двумя протяжками и разбивкой ширины для блокирования движения трещин от кромок является недостаточно эффективной. Поперечная схема прокатки позволяет уменьшить смещение трещин от кромок раската на 10 мм. Продольная схема прокатки с минимальным коэффициентом вытяжки (не более 1,2) при разбивке ширины позволяет уменьшить величину смещения трещин от кромок на 10-20 мм.

Полученные результаты внедрены в виде изменений в технологические инструкции по толстолистовой прокатке МЛТС на стане 5000 ПАО

«ММК». При этом требуется соблюдать определённое соотношение ширины сляба ($B_{сл.}$) к ширине готового раската перед порезкой ($b_{раск.}$):

$$B_{сл.} = b_{раск.} / A_{разб.}, \quad (8)$$

где $A_{разб.}$ – коэффициент вытяжки металла при разбивке ширины (1,12÷1,20).

При реализации поперечной схемы прокатки следует выполнять определённое соотношение исходной длины сляба ($L_{сл.}$) к ширине готового раската перед порезкой:

$$L_{сл.} = b_{раск.} / A_{прот.}, \quad (9)$$

где $A_{прот.}$ – допустимый коэффициент вытяжки при протяжке (1,15÷1,22).

В производственных условиях стана 5000 были опробованы следующие варианты деформирования слябовой заготовки:

1) минимизация или полное исключение операции разбивки по ширине исходных слябов при соблюдении определённого соотношения между шириной заготовки и раската, а также учётом допустимого коэффициента вытяжки при разбивке ширины;

2) поперечная схема прокатки исходных слябов с определённым соотношением длины заготовки и ширины раската, а также учётом допустимого коэффициента вытяжки в первых деформационных проходах.

По разработанным режимам прокатано более 135 тыс. тонн ТЛП, что составляет около 15% от годового производства стана.

Таким образом, с применением методологии эффективной технологической компенсации разработаны и внедрены в условиях ПАО «ММК» новые технологические решения по производству ТЛП из непрерывнолитых заготовок с поверхностными дефектами (трещинами). При этом в качестве компенсационных воздействий, блокирующих движение трещин от кромок раската, применяли продольную прокатку с коэффициентом вытяжки при разбивке ширины в диапазоне 1,12-1,22 и сниженным параметром формы очага деформации до 0,75, а также схему поперечной прокатки.

В пятой главе разработаны новые технологические решения по минимизации негативного проявления ski-эффекта при контролируемой толстолистовой асимметричной прокатке МЛТС. Анализ показал, что основное влияние на вертикальный изгиб переднего участка раската оказывают факторы асимметрии – температурный, кинематический, фрикционный и т.д. Для описания и исследования ski-эффекта при толстолистовой прокатке разработан и адаптирован специализированный математический аппарат.

Расчёты показали, что в последних 3-4 чистовых проходах на переднем и заднем участках длиной 500-1500 мм формируется температурный градиент по толщине листа величиной до 40°C. В процессе толстолистовой прокатки заготовок из МЛТС класса прочности К60 наличие температурного градиента по толщине раската приводит к вертикальному изгибу концов на

величину до 150 мм (рис. 6). Механизм подгибки переднего и заднего участков листа заключается в возникновении кинематической и температурной асимметрии очага деформации (рис. 7).

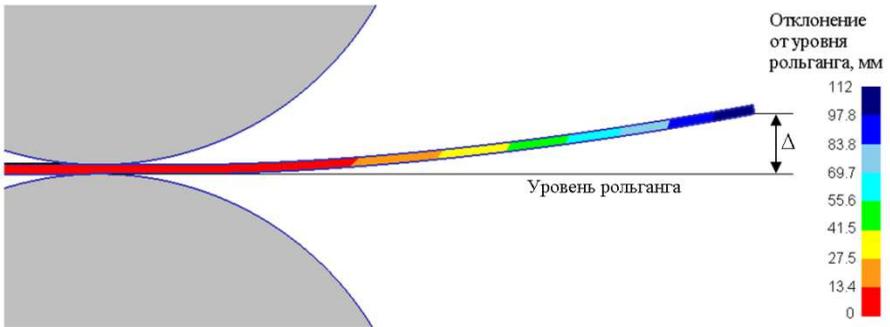


Рис. 6. Изгиб переднего участка ТЛП при прокатке в чистовом проходе

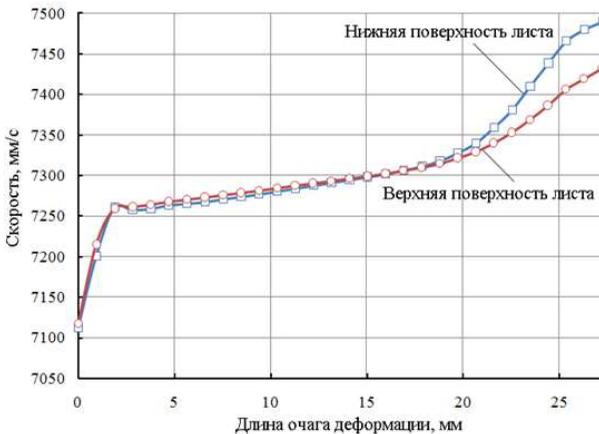


Рис. 7. Скорость верхней и нижней поверхности ТЛП в асимметричном очаге деформации при прокатке

На основании детального анализа факторов асимметрии на черновой стадии процесса толстолистовой прокатки, влияющих на изгиб листа, установлены ключевые регулирующие параметры и способы эффективной технологической компенсации. Разработаны количественные рекомендации, минимизирующие негативное проявление ski-эффекта (табл. 3).

Установлено, что причинами изгиба раската на чистовой стадии прокатки являются следующие факторы: кинематический (рассогласование скоростей рабочих валков), геометрический (несоответствие линии прокатки и уровня рольганга) и температурный. Каждый из этих факторов может приводить к изгибу переднего участка листа как вверх, так и вниз. Предложено

определять направление вертикального изгиба листа относительно нейтральной точки. На основе математического моделирования установлено положение этой точки в зависимости от параметров процесса (табл. 4-5).

Табл. 3. Параметры для управления изгибом раската на черновой стадии процесса толстолистовой прокатки

Толщина раската, мм	Обжатие за проход, %	Длина раската перед проходом, мм	Загиб «лыжи»	Длина «лыжи», мм
300-260	10-12	1500-2800	+2, +3	2800
300-260	10-12	2800-4850	+4, +5	2800
260-220	12-14	1500-2800	+2, +3	2800
260-220	12-14	2800-4850	+4, +5	2800
220-180	12-14	1500-2800	+2, +3	2800
220-180	12-14	2800-4850	+3, +4	2800
180-160	14-16	1500-2800	+2, +3	2800
180-160	14-16	2800-4850	+2, +3	2800

Табл. 4. К определению положения нейтральной точки по критическому обжатию

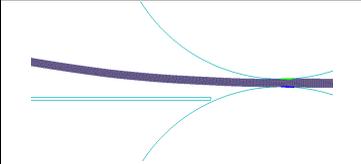
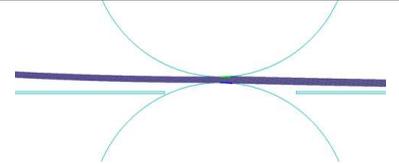
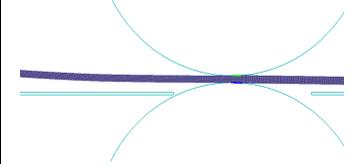
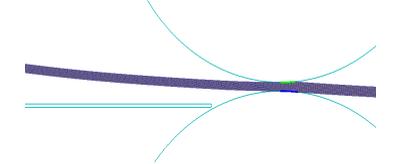
Толщина полосы на входе в очаг деформации h , мм	Рассогласование скоростей ΔV , %	Температура полосы, °C		
		800	900	1000
		$\epsilon_{крит}$, %	$\epsilon_{крит}$, %	$\epsilon_{крит}$, %
16	0,5	10,0	10,5	11,0
18	0,5	10,5	11,0	11,5
...
50	0,5	25,0	-	-
16	2,0	7,0	9,0	8,0
...
48	2,0	19,0	31,0	30,0
50	2,0	20,0	32,0	31,0

С использованием разработанной модели выполнено численное исследование влияния уровня ролганга на подгибку ТЛП. Установлено, что при прокатке полос толщиной 25-50 мм из-за несоответствия уровня ролганга и линии прокатки происходит изгиб переднего участка листа вверх. При низких температурах (800°C) и малых обжатиях (около 10%) изгиб вверх увеличивается. При повышенных температурах (950°C и более) изгиб вверх увеличивается только при высоких обжатиях (15-18%) (табл. 6).

Табл. 5. К определению положения нейтральной точки по фактору формы очага деформации

Толщина полосы на входе в очаг деформации h , мм	Рассогласование скоростей ΔV , %	Температура полосы, °С		
		800	900	1000
		l_d/h_m	l_d/h_m	l_d/h_m
16-32	0,5	1,90	2,00	2,05
32-50	0,5	2,00	-	-
16-32	2,0	1,70	1,90	1,95
32-50	2,0	1,70	2,20	2,30

Табл. 6. Влияние уровня рольганга на изгиб переднего участка ТЛП толщиной 32 мм (прокатка без рассогласования скоростей рабочих валков)

Параметр		Степень деформации	
		$\varepsilon = 10\%$	$\varepsilon = 15\%$
Температура	$T = 800^\circ\text{C}$		
	$T = 950^\circ\text{C}$		

Если обжатия при прокатке меньше критических и нижний валок вращается быстрее верхнего, то изгиб вверх на переднем участке ТЛП значительно возрастает, т.к. действие двух факторов асимметрии складывается. Если же обжатие превышает критическое значение, то изгиб листа, наоборот, снижается. При прокатке листов толщиной менее 25 мм влияние уровня рольганга является незначимым.

Таким образом, для уменьшения вертикального изгиба необходимо, чтобы рассогласование скоростей рабочих валков создавало противоизгиб листа. При этом необходимо учитывать величину критического обжатия или фактор формы очага деформации при прокатке.

На основании результатов теоретико-экспериментальных исследований разработан комплекс технологических мероприятий для уменьшения вертикального изгиба передних участков ТЛП. Взаимосвязь параметра формы очага деформации, толщины листа и обжатия за проход приведена в табл. 7. Получены, запатентованы и внедрены новые технологические решения управления ski-эффектом при производстве ТЛП (рис. 8).

Табл. 7. Взаимосвязь параметра формы очага деформации, толщины листа и обжатия за проход

Толщина Н, мм	Параметр формы очага деформации l_d/h_m										
	Обжатие за проход ϵ , %										
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
250	0,51	0,54	0,57	0,59	0,62	0,64	0,67	0,69	0,72	0,74	0,76
230	0,54	0,56	0,59	0,62	0,65	0,67	0,70	0,72	0,75	0,77	0,79
...
10	2,58	2,72	2,85	2,99	3,12	3,24	3,37	3,49	3,61	3,73	3,85
8	2,88	3,04	3,19	3,34	3,48	3,63	3,76	3,90	4,04	4,17	4,30

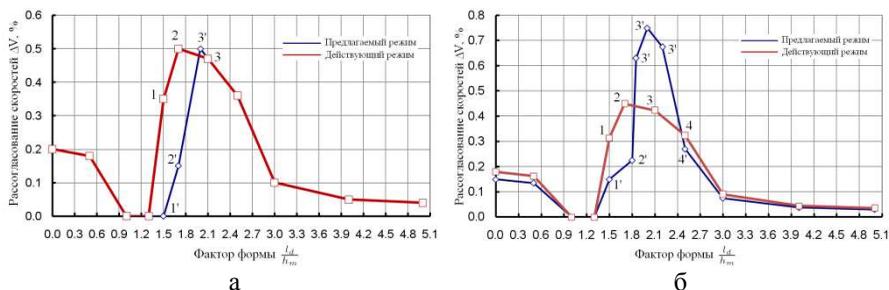
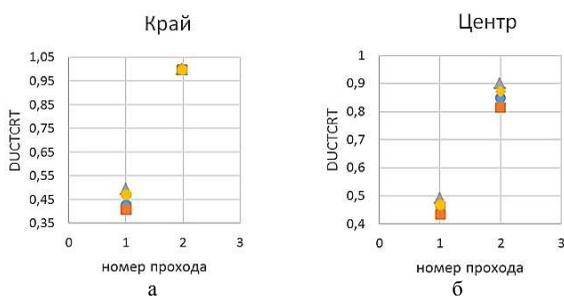


Рис. 8. Разработанные режимы рассогласования скоростей рабочих валков (при температуре деформируемого металла 800°С (а) и 900°С (б))

Таким образом, с применением методологии эффективной технологической компенсации разработаны и внедрены новые технологические решения, позволившие стабилизировать процесс получения ТЛП из непрерывнолитых заготовок с неравномерной температурой металла по сечению за счёт минимизации ski-эффекта на переднем участке раската. При этом в качестве компенсационных технологических воздействий применялись асимметричные режимы деформирования с рассогласованием скоростей рабочих валков в диапазоне 0,1-15,0% в зависимости от соотношения степеней деформации, величины критического обжатия за проход, толщины раската и температуры металла.

В шестой главе создан комплекс новых технологических решений по производству высококачественных МЛТС и ТЛП со сниженной осевой химической неоднородностью (ОХН). Анализ показал, что эффективные компенсационные воздействия в случае повышенной ОХН металла возможно осуществить на основе новых решений по интенсивной деформационной проработке внутренних слоёв металла на завершающей стадии формирования слябовой заготовки из МЛТС, а также при производстве ТЛП – черновой и чистой прокатке.

Для решения поставленной задачи разработана модель, позволяющая описывать и анализировать напряжённо-деформированное состояние металла по всему сечению проката, в том числе в области ОХН. Выполнено приложение модели к случаю анализа НДС металла при толстолистовой прокатке МЛТС классов прочности К56-К65. При моделировании изучали влияние основных технологических параметров на степень изменения ОХН в прокатываемом металле. В частности, исследовали роль направления деформации при толстолистовой прокатке. Результаты моделирования показывают, что при поперечной прокатке энергетический критерий разрушения в области ОХН приблизительно в два раза выше, чем при продольной (рис. 9). Также установлено, что в случае поперечной деформации одинаково эффективно прорабатываются и центральные, и краевые участки раската.



Проход № 1 – продольный; Проход № 2 – поперечный

Рис. 9. Значение энергетического критерия разрушения в области ОХН:
а – на краю раската; б – в центре раската

Выполнен анализ влияния степени деформации на изменение ОХН. Для этого варьировали величину обжатия при прокатке. Результаты моделирования показывают, что с увеличением степени деформации с 5 до 15% значение энергетического критерия разрушения области ОХН возрастает в три раза в центре раската и в пять раз на кромке (рис. 10, а). Кроме того, наблюдается интенсивный рост значения критерия вблизи кромки при больших степенях деформации.

Проанализировано влияние температуры металла при деформации на изменение ОХН. Результаты моделирования показывают, что увеличение температуры с 1000 до 1100°C приводит к снижению критерия разрушения в 1,2 раза (рис. 10, б).

Математическое моделирование основных стадий производства ТЛП позволило выявить ключевые параметры технологии, компенсирующие влияние исходной ОХН в заготовке и позволяющие эффективно её трансформировать в готовом прокате. Установлено, что большое влияние на дробимость ОХН оказывает степень деформации. Рекомендуется осуществлять процесс прокатки с обжатиями не менее 10-15%, поскольку при таком уровне воздей-

ствия наблюдается повышенное значение соотношения интенсивностей напряжения и деформации в области ОХН.

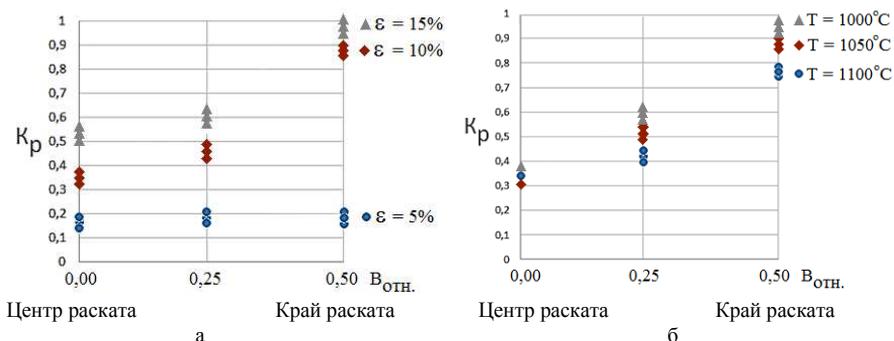


Рис. 10. Влияние степени (а) и температуры (б) деформации металла на значение критерия разрушения

Увеличение степени деформации приводит к росту энергетического критерия разрушения области ОХН по всему сечению прокатываемого металла – как в краевых участках, так и в центре раската. Поэтому степень деформации за проход может считаться наиболее эффективным компенсирующим параметром, влияющим на изменение ОХН в ТЛП.

Эффективность деформационного воздействия повышается при понижении температуры металла. Установлено, что при большом обжатии и пониженной температуре металла деформационное воздействие проникает глубже по сечению раската. Кроме того, при пониженной температуре металла ($900\text{--}1000^\circ\text{C}$) резерв прочности области ОХН быстрее исчерпывается и создаются благоприятные условия для её интенсивного дробления.

Большое значение на уровень остаточной ОХН в ТЛП оказывает её исходный вид в непрерывнолитом слябе. Исследование показало, что при производстве слябов из МЛТС эффективность мягкого обжатия снижается, поскольку существенная доля суммарного усилия тратится на обжатие краевых участков, в том числе заоложенных ребровых зон. Решение обозначенной проблемы заключается в компенсирующем перераспределении обжатия по ширине кристаллизующейся заготовки с максимизацией нагрузки в центральной части сляба и её минимизации по краям. Это позволило интенсивнее прорабатывать центральную часть металла, в которой наблюдается высокая концентрация ликвидирующих химических элементов.

На основе теоретических исследований разработана усовершенствованная технология получения непрерывнолитой заготовки в цилиндрических роликах сегментов вторичного охлаждения МНЛЗ. Отличием данной технологии является обеспечение предварительной выпуклости кристаллизующегося сляба в поперечном сечении (перед мягким обжатием). Мягкое обжатие

такого сляба обеспечивает дополнительную деформацию в центральных областях. При этом наибольшее обжатие наблюдается в средней части сляба, а в ребровых заоложенных участках – оно минимально (рис. 11). Кроме того, предложено использовать профилированные ролики сегментов мягкого обжатия МНЛЗ для ещё более интенсивной проработки центральных областей ОХН.

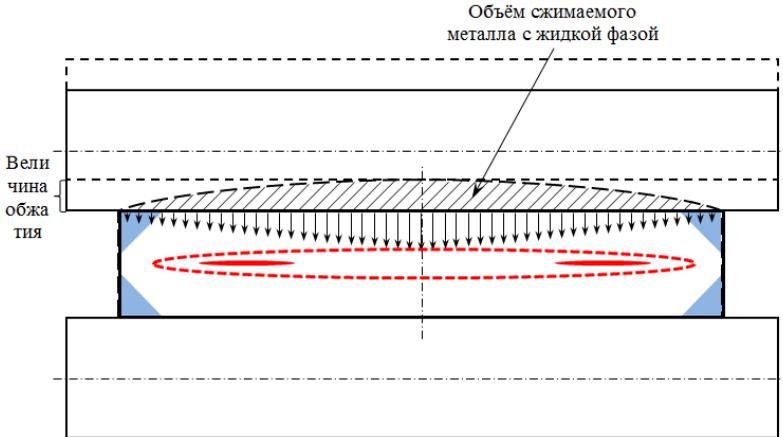


Рис. 11. Мягкое обжатие предварительно выпуклой кристаллизующейся слябовой заготовки

На стадии производства ТЛП предложено интенсифицировать процесс поперечной прокатки за счёт дополнительной деформации центральных областей, что может быть осуществлено на основе принципа неравномерного обжатия за проход. Это может быть реализовано двумя способами: обжатием заготовки в поперечном направлении с изменяющимся зазором между валками в процессе деформации (рис. 12, а) и прокаткой непрерывнолитых слябов с выпуклой формой поперечного сечения (рис. 12, б).

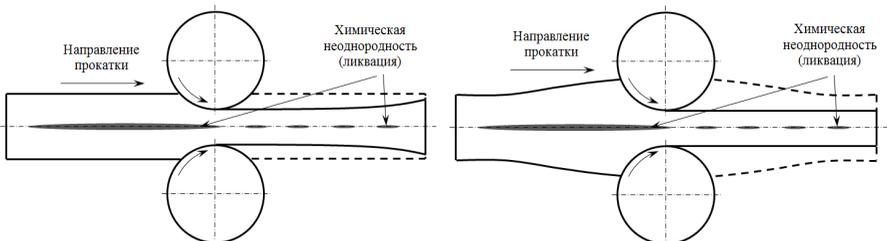


Рис. 12. Интенсификация деформационной проработки внутренних слоёв металла: прокатка с изменяющимся зазором между валками (а) и прокатка непрерывнолитой заготовки с выпуклой формой поперечного сечения (б)

Данные решения успешно реализованы в условиях технологической системы ККЦ –МНЛЗ-6 – ТЛС 5000 ПАО «ММК». Произведены опытно-промышленные партии непрерывнолитых заготовок из МЛТС по усовершенствованным режимам в условиях ККЦ ПАО «ММК». Анализ качества макроструктуры слябов показал, что интенсификация мягкого обжатия позволяет уменьшить осевую рыхлость, осевую химическую неоднородность и трещинообразование внутри металла соответственно на 1,5, 6,4 и 13,5% при отсутствии поверхностных дефектов.

Опытные заготовки были прокатаны в условиях толстолистого стана 5000 ПАО «ММК». В результате удалось достигнуть повышения предела прочности ТЛП на 8,1%, предела текучести – на 12,5%, относительного удлинения – на 16,6 отн.%, ударной вязкости – на 13,5%.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате выполнения диссертационной работы создан комплекс ресурсосберегающих технологических решений по получению высококачественного толстолистого проката из микролегированных трубных сталей на основе разработки и применения методологии эффективной технологической компенсации как инструмента совершенствования технологической системы «МЛТС-ТЛП»:

1. Разработан новый научный подход совершенствования технологии производства толстолистого проката из микролегированной трубной стали. Данный подход заключается в определении наиболее эффективного компенсационного воздействия на систему через комплекс технологических параметров температурно-деформационной обработки металла на этапах формирования непрерывнолитой заготовки и листа с целью обеспечения требуемых механических свойств продукции. В основе методологического подхода стоит контроль химического состава и характеристик микролегированной трубной стали на ранних стадиях производства для корректировки последующих режимов обработки металла (нагрева под прокатку, режимов деформации по проходам, режимов термомеханической обработки и ускоренного охлаждения толстолистого проката) с применением комплексного критерия ресурсосбережения.

2. Установлены зависимости механических свойств толстолистого проката, таких как прочность, пластичность, вязкость (ИПГ) от химического состава, в том числе микролегирующих элементов трубных сталей категорий прочности К56-К65 в диапазоне изменения технологических параметров контролируемой горячей прокатки. На основе этих зависимостей сформулированы принципы эффективной технологической компенсации, состоящие в интенсификации температурно-деформационных воздействий в случае снижения (в 2-4 раза) содержания микролегирующих элементов в трубных сталях, повышенного (на 5-10%) уровня осевой химической неоднородности, нали-

чия поверхностных дефектов (трещин) и температурного градиента (15-20°C и более) по толщине непрерывнолитого сляба.

3. Разработан и реализован комплекс математических и физических моделей на основе конечно-элементного, нейросетевого и фрагментарного методов. Данный комплекс отличается возможностью определения эффективных компенсационных технологических воздействий в системе производства толстолистового проката из микролегированных трубных сталей для случаев:

- толстолистовой термомеханической прокатки непрерывнолитых слябов из экономнолегированных трубных сталей классов прочности К56-К65 со сниженным содержанием легирующих элементов (ванадия, ниобия, никеля и др.) с учётом допустимого изменения деформационных и температурных воздействий на металл для достижения высокого комплекса прочностных, пластических и вязких свойств проката;

- толстолистовой прокатки непрерывнолитых слябов с поверхностными трещинами (продольными, поперечными и угловыми), трансформирующимися в дефекты листа с учётом фактора формы очага деформации и особенностей перемещения металла на лицевые поверхности раската вследствие температурной асимметрии;

- асимметричной толстолистовой прокатки непрерывнолитых слябов с неравномерным распределением температуры по толщине заготовки, приводящей к повышенной подгибке раската с учётом влияния фактора формы очага деформации, уровня критического обжата и рассогласования скоростей рабочих валков на напряжённо-деформированное состояние металла;

- толстолистовой прокатки непрерывнолитых слябов с повышенным уровнем осевой химической неоднородности, трансформирующейся в дефекты листа с учётом интенсивности предварительного мягкого обжата кристаллизующейся заготовки и температурно-деформационных воздействий на металл при контролируемой прокатке.

4. Предложен новый подход, состоящий в определении рациональных технологических параметров толстолистовой контролируемой прокатки для компенсации целенаправленного снижения содержания легирующих элементов в стали. Данный подход применяется для разработки компенсационных температурно-деформационных воздействий (интенсификации режимов черновой прокатки и ускоренного охлаждения в 1,2-1,5 раза) при производстве листов толщиной до 34,6 мм из экономнолегированных трубных сталей классов прочности К56-К65 со сниженным (до 75%) содержанием марганца, хрома, ниобия, ванадия, меди и никеля.

5. Разработаны и внедрены новые способы получения толстолистового проката из экономнолегированных трубных сталей на основе применения методологии эффективной технологической компенсации:

– разработан рациональный химический состав трубной стали класса прочности K56, микролегированной бором, со снижением содержания марганца на 17 (отн.)%, хрома – на 50 (отн.)% и ниобия – на 40 (отн.)% при сохранении требуемого уровня механических свойств толстолистового проката (патент РФ № 2593803);

– разработана и внедрена технология производства толстолистового проката из экономнолегированных трубных сталей со сниженным в два раза содержанием ванадия, обеспечивающая получение ТЛП класса прочности K60 толщиной 15,7-23,9 мм по ТУ 14-101-725-2009 и ТУ 14-101-5574-2009 с требуемым уровнем механических свойств (патент РФ № 2583973);

– разработана ресурсосберегающая технология производства ТЛП толщиной 25,8-34,6 мм по ТУ 14-101-725-2009 и ТУ 14-101-944-2013 из экономнолегированных трубных сталей класса прочности K52 (X56), K60 (X70) и DNV SAWL 485 с повышенной на 15% хладостойкостью в усовершенствованной технологической системе «МЛТС-ТЛП» (патент РФ № 2477323).

6. Разработана методика поиска ресурсосберегающих режимов толстолистовой прокатки непрерывнолитых слябов с поверхностными дефектами (трещинами) из микролегированной трубной стали, обеспечивающая сокращение величины обреза боковых кромок толстолистового проката. Сокращение обреза достигается блокирующими воздействиями на движение поверхностных трещин за счёт уменьшения коэффициента вытяжки (до 1,12-1,22) при разбивке ширины, снижения параметра формы очага деформации (до 0,75) на черновой и чистовой стадиях контролируемой прокатки, а также применения компенсирующей схемы поперечной прокатки. На основе теоретических исследований разработана и внедрена в условиях ПАО «ММК» технология, реализующая принцип металлосбережения путём уменьшения на 20-30 мм норм обреза боковых кромок толстолистового проката (патент РФ № 2490080).

7. Получено теоретическое обоснование определения необходимых компенсирующих режимов асимметричного деформирования непрерывнолитых слябов с температурным градиентом (15-20°C и более) по толщине. Такие режимы позволяют минимизировать ski-эффект на переднем участке толстолистового раската за счёт рассогласования скоростей рабочих валков (до 15%). Причём величина рассогласования рассчитывается в зависимости от соотношения степени деформации, величины критического обжатия за проход, положения нейтральной точки, толщины раската и температуры по сечению металла. Данные исследования послужили основой для разработки и внедрения в ПАО «ММК» технологии, позволяющей стабилизировать процесс получения толстолистового проката из непрерывнолитых заготовок с неравномерной температурой металла по сечению (патент РФ № 2486974).

8. Развита технология об интенсифицировании деформационного воздействия на центральные слои металла при производстве толстолистового

проката из непрерывнолитых слябов с повышенным (на 5-10%) уровнем осевой химической неоднородности. Интенсифицирование связано с разработкой компенсирующих режимов дифференцированного мягкого обжатия по ширине кристаллизующейся заготовки и переменной деформации по длине прокатываемого металла с максимизацией прикладываемой нагрузки в средней части раската. В результате удалось опробовать и внедрить в условиях ПАО «ММК» сквозную технологию производства толстолистового проката, которая привела к снижению уровня осевой химической неоднородности слябов из микролегированных трубных сталей на 6,4% и повышению механических свойств ТЛП в среднем на 12,6% (НИОКР по договору № 229991).

9. Суммарный экономический эффект от внедрения новых технологических решений, полученных по результатам диссертационной работы, в условиях действующего промышленного производства составил более 175 млн рублей.

10. Результаты диссертации внедрены в учебный процесс подготовки бакалавров и магистров по направлениям 22.03.02, 22.04.02 – Металлургия, а также кадров высшей квалификации по направлению 22.06.01 – Технологии материалов в ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Публикации в журналах из Перечня ВАК РФ:

1. Салганик, В.М. Разработка эффективной схемы черновой прокатки низколегированных сталей / В.М. Салганик, А.М. Песин, Д.Н. Чикишев и др. // Сталь. 2008. – № 9. – С. 50-52 (Scopus).

2. Салганик, В.М. Нейросетевое моделирование процесса получения широкополосной горячекатаной стали с заданными механическими свойствами / В.М. Салганик, А.М. Песин, С.В. Денисов, Д.Н. Чикишев и др. // Производство проката. – 2008. – № 8. – С. 26-27.

3. Салганик, В.М. Моделирование поведения поперечных угловых трещин сляба при прокатке в горизонтальных валках / В.М. Салганик, А.М. Песин, Д.Н. Чикишев и др. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2010. – № 3. – С. 22-24 (Scopus).

4. Песин, А.М. Моделирование формоизменения поперечной трещины на боковой грани сляба при черновой прокатке на стане 2000 / А.М. Песин, В.М. Салганик, Д.О. Пустовойтов, Д.Н. Чикишев и др. // Чёрные металлы. – 2011. – № 6 - Спец. выпуск. – С. 39-42.

5. Салганик, В.М. Совершенствование процесса толстолистовой прокатки микролегированных сталей различных классов прочности на основе дилатометрических исследований / В.М. Салганик, С.В. Денисов, Д.Г. Набатчиков, Д.Н. Чикишев и др. // Производство проката. – 2011. – № 5. – С. 5-8.

6. Салганик, В.М. Моделирование напряженно-деформированного состояния стальных листов при прокатке непрерывнолитых слябов с поверхностными трещинами / В.М. Салганик, А.М. Песин, Д.Н. Чикишев и др. // Чёрные металлы. – 2012. – № 5. – С. 15-18.

7. Салганик, В.М. Повышение качества проката из трубных сталей путем минимизации подгибки концов толстых листов / В.М. Салганик, Д.Н. Чикишев, С.В. Денисов и др. // Металлы. – 2013. – № 6. – С. 46-53 (Web of Science).

8. Салганик, В.М. Разработка режимов асимметричной толстолистовой прокатки низколегированных сталей с целью минимизации дефекта подгибки концов листа / В.М. Салганик, Д.Н. Чикишев, Д.О. Пустовойтов и др. // Металлург. – 2013. – № 11. – С. 75-77 (Web of Science).

9. Салганик, В.М. Развитие теории и технологии инновационных процессов прокатного производства / В.М. Салганик, Д.Н. Чикишев, С.В. Денисов и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2014. – № 1. – С. 48-51.

10. Чикишев, Д.Н. Математическое моделирование изменения прочностных характеристик микрولةгированных сталей в процессе термомодеформационной обработки / Д.Н. Чикишев, Е.Б. Пожидаева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16. – № 4(3). – С. 664-668.

11. Салганик, В.М. Научно-производственный комплекс «Термомодеформ» для создания новых технологий / В.М. Салганик, П.П. Полецков, М.О. Артамонова, Д.Н. Чикишев и др. // Сталь. – 2014. – № 4. – С. 104-107.

12. Салганик, В.М. Лабораторный комплекс для моделирования технологических процессов толстолистовой прокатки / В.М. Салганик, П.П. Полецков, Д.Н. Чикишев и др. // Metallurg. – 2014. – № 10. – С. 81-84 (Web of Science).

13. Салганик, В.М. Анализ структурно-фазовых превращений в низколегированных сталях на основе дилатометрических исследований / В.М. Салганик, Д.Н. Чикишев, Е.Б. Пожидаева и др. // Metallurg. – 2015. – № 9. – С. 32-37 (Web of Science).

14. Чикишев, Д.Н. Анализ причин вертикального изгиба переднего конца полосы при горячей прокатке на основе математического моделирования / Д.Н. Чикишев, Е.Б. Пожидаева // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. – 2016. – Т. 59. – № 3. – С. 204-208.

15. Салганик, В.М. Развитие листопрокатных технологических систем - от интенсификации к инновациям / В.М. Салганик, Д.Н. Чикишев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 3. – С. 293-301.

16. Завалищин, А.Н. Влияние «мягкого» обжата на структуру непрерывнолитого слитка и свойства проката микрولةгированной стали / А.Н. За-

валицин, М.И. Румянцев, Д.Н. Чикишев и др. // *Металлург.* – 2019. – № 3. – С. 23-30 (Web of Science).

17. Завалицин, А.Н. Методика оценки макроструктуры непрерывнолитых слябов трубных сталей категории прочности K60 и K65 / А.Н. Завалицин, Д.Н. Чикишев, Е.В. Кожевникова // *Сталь.* – 2020. – № 1. – С. 8-11.

Публикации в изданиях, входящих в наукометрические базы Web of Science и Scopus:

1. Salganik, V.M. Influence of Steel Chemical Composition and Modes of the Thermomechanical Treatment on Mechanical Properties of a Hot Rolled Plate // V.M. Salganik, D.N. Chikishev, E.B. Pozhidaeva // *Solid State Phenomena (Materials Science Forum).* – 2016. – Vol. 870. – Pp. 584-592.

2. Chikishev, D.N. Mathematical modeling of steel chemical composition and modes of thermomechanical treatment influence on hot-rolled plate mechanical properties / D.N. Chikishev, E.B. Pozhidaeva // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2017. – Vol. 92. – Issue 9-12. – Pp. 3725-3738.

3. Pesin, A. Mathematical modeling of the vertical bending phenomena on the sheet's front section at various stages of plate asymmetrical rolling / A. Pesin, D. Chikishev, D. Pustovoytov, etc. // *METAL 2019 - 28th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings.* – 2019. – Pp. 254-258.

Монографии:

1. Чикишев, Д.Н. Разработка экономнолегированных марок сталей со специальными свойствами / Д.Н. Чикишев, Д.О. Пустовойтов, Е.Б. Пожидаева (монография; электронное издание) // М.: ФГУП НТЦ «Информрегистр». – 2015. – № гос. рег. 01201460204.

2. Салганик, В.М. Анализ и синтез экономнолегированных сталей для топливно-энергетического комплекса / В.М. Салганик, С.В. Денисов, П.А. Стеканов, Д.Н. Чикишев и др. // *Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова.* – 2015. – 207 с.

3. Салганик, В.М. Разработка режимов контролируемой прокатки трубной заготовки повышенных классов прочности / В.М. Салганик, Д.Н. Чикишев, С.В. Денисов и др. // *Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова.* – 2016. – 87 с.

Публикации в иных изданиях:

1. Салганик, В.М. Моделирование микроструктуры низколегированной конструкционной стали при черновой прокатке на стане 5000 ОАО «ММК» / В.М. Салганик, А.М. Песин, С.В. Денисов, Д.Н. Чикишев и др. // *Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: межрегион. сб. науч. тр. / под ред. В.М. Салганика. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова.* – 2011. – №1. – С. 4-11.

2. Песин, А.М. Моделирование образования прикромочных дефектов при толстолистовой прокатке на этапе разбивки ширины / А.М. Песин,

Д.О. Пустовойтов, Д.Н. Чикишев и др. // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: сб. науч. тр. / под ред. В.М. Салганика. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. – 2013. – Вып. 19. – С. 8-16.

3. Салганик, В.М. Разработка технологии толстолистовой горячей прокатки с достижением комплекса заданных свойств готовой продукции / В.М. Салганик, Д.Н. Чикишев, Д.О. Пустовойтов и др. // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: сб. науч. тр. / под ред. В.М. Салганика. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. – 2013. – Вып. 19. – С. 76-82.

4. Салганик, В.М. Современное состояние производства заготовок для труб большого диаметра / В.М. Салганик, Д.Н. Чикишев, Е.Б. Блондинская и др. // Наука и производство Урала: Межрегион. сборник научных трудов. Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС». – 2014. – Вып.10. – С 89-91.

5. Чикишев, Д.Н. Современные концепции разработки низколегированных сталей для топливно-энергетического комплекса России / Д.Н. Чикишев, Е.Б. Блондинская, П.С. Тарасов и др. // Наука и производство Урала: Межрегиональный сборник научных трудов. Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС». – 2014. – Вып.10. – С. 92-94.

6. Чикишев, Д.Н. Актуальные направления развития производства заготовок для труб большого диаметра / Д.Н. Чикишев, Е.Б. Пожидаева // Международный союз ученых «Наука. Технологии. Производство». – 2014. – № 3. – С. 125-128.

7. Чикишев, Д.Н. Оценивание осевой химической неоднородности цифровым и аналитическим методами / Д.Н. Чикишев, И.А. Разгулин // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: междунар. сб. науч. тр. / под ред. А.Б. Моллера. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. – 2018. – Вып. 25. – С. 11-15.

Публикации в сборниках трудов конференций:

1. Салганик, В.М. Подгибка концов толстолистового раската и ее компенсация в условиях асимметричной прокатки / В.М. Салганик, А.М. Песин, Д.Н. Чикишев и др. // Инновационные технологии обработки металлов давлением: сб. докл. междунар. науч.-техн. конф. М.: Изд. Дом МИСиС. – 2011. – С. 297-305.

2. Чикишев, Д.Н. Развитие теории процессов толстолистовой прокатки для создания комплексной методологии разработки и совершенствования технологических систем производства высококачественного листового проката / Д.Н. Чикишев // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 70-й межрегион. науч.-техн. конф. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. – 2012. – Т. 1. – С. 219-223.

3. Салганик, В.М. Разработка режимов асимметричной толстолистовой прокатки низколегированных сталей с целью минимизации дефекта подгибки концов листа / В.М. Салганик, Д.Н. Чикишев, Д.О. Пустовойтов и др. // Тр. IX конгресса прокатчиков. Череповец: МОО «Объединение прокатчиков». – 2013. – Т. 1. – С. 20-23.

4. Чикишев, Д.Н. Развитие теории и совершенствование технологии производства толстолистового проката в условиях ТЛС 5000 ОАО «ММК» / Д.Н. Чикишев // Перспективы развития металлургических технологий: сб. тезисов V конф. молодых специалистов. ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина». – 2014. – С. 53-54.

5. Салганик, В.М. Инновационные технологические процессы получения новой продукции на основе использования лабораторного комплекса физического моделирования «Термодеформ» / В.М. Салганик, П.П. Полецков, Д.Н. Чикишев и др. // Сб. докл. междунар. науч.-техн. конгресса «ОМД 2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии». Ч. 2. М.: ООО «Белый ветер». – 2014. – С. 432-433.

6. Салганик, В.М. Разработка экономнолегированных композиций химического состава трубных сталей класса прочности K56-K60 / В.М. Салганик, С.В. Денисов, Д.О. Пустовойтов, Д.Н. Чикишев и др. // Неделя металлов в Москве, 12-15 ноября 2013 г. Сб. тр. конф. М.: ВНИИМЕТМАШ. – 2014. – С. 61-67.

7. Чикишев, Д.Н. Анализ причин вертикального изгиба переднего конца полосы при горячей прокатке на основе математического моделирования / Д.Н. Чикишев, Е.Б. Пожидаева // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: материалы 11 Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Старый Оскол. – 2014. – С. 111-118.

8. Чикишев, Д.Н. Совершенствование композиции химического состава трубной стали на основе нейросетевого моделирования / Д.Н. Чикишев, М.С. Гущина // Трубы-2014: Тр. междунар. науч.-практ. конф. ОАО «РосНИТИ», НО «ФРТП». – 2014. – С. 85-90.

9. Чикишев, Д.Н. Разработка и применение методологии комплексного совершенствования технологической системы «Стальной толстый лист – трубы большого диаметра» / Д.Н. Чикишев // Тр. X конгресса прокатчиков. Сб. статей. М.: «Ваш формат». – 2015. – Т. II. – С. 259-265.

10. Чикишев, Д.Н. Металлургическая концепция получения микрولةгированных трубных сталей, стальных толстых листов и труб большого диаметра для нефтегазового комплекса / Д.Н. Чикишев // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2016. – Т. 1. – № 1. – С. 124-126.

Охранные документы:

1. Пат. 2477323 (РФ), МПК⁸ C21D 8/02. Способ производства толстолистового низколегированного проката / В.М. Салганик, С.В. Денисов,

Д.Г. Набатчиков, Д.Н. Чикишев и др. № 2011139797/02, заявл. 29.09.2011, опубл. 10.03.2013. Бюл. № 7.

2. Пат. 2490080 (РФ), МПК⁸ В21В 1/22. Способ прокатки толстых листов на реверсивном стане / В.М. Салганик, С.В. Денисов, А.М. Песин, Д.Н. Чикишев и др. № 2012115832/02, заявл. 19.04.2012, опубл. 20.08.2013. Бюл. № 23.

3. Пат. 2486974 (РФ), МПК⁸ В21В 1/22. Способ асимметричной прокатки передних концов толстых листов на реверсивных станах / В.М. Салганик, С.В. Денисов, А.М. Песин, Д.Н. Чикишев и др. № 2012105873/02, заявл. 17.02.2012, опубл. 10.07.2013. Бюл. № 19.

4. Пат. 2583973 (РФ), МПК⁸ С21D 8/02, В21В 1/32, С22С 38/38. Способ производства толстолистовой трубной стали / В.М. Салганик, Д.Н. Чикишев, Д.О. Пустовойтов, П.А. Стеканов. № 2015104422/02, заявл. 10.02.2015, опубл. 10.05.2016. Бюл. № 13.

5. Пат. 2593803 (РФ), МПК С21D 8/02, С22С 38/54, В21В 1/26. Способ производства толстолистовой трубной стали, микролегированной бором / В.М. Салганик, Д.Н. Чикишев, Д.О. Пустовойтов, П.А. Стеканов. № 2015104453/02, заявл. 10.02.2015, опубл. 10.08.2016. Бюл. № 22.

6. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ № 2017617104. Учебно-исследовательская программа автоматизированного проектирования режима прокатки на ТЛС 5000 / М.И. Румянцев, Д.Н. Чикишев, И.А. Разгулин. Дата гос. регистрации 23.06.2017.