

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.324.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г.И. НОСОВА»,
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от «14» апреля 2026 № 3

О присуждении Пустовойтову Денису Олеговичу, Российская Федерация, ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «Теоретическое и технологическое обоснование применения скоростной асимметрии для повышения механических свойств листового проката» по специальности 2.6.4. Обработка металлов давлением принята к защите 11 декабря 2025 г. (протокол заседания №14) диссертационным советом 24.2.324.01, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, приказ № 714/нк от 2 ноября 2012 года.

Соискатель Пустовойтов Денис Олегович, «26» декабря 1984 года рождения, диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «Совершенствование широкополосной прокатки трубных сталей на основе моделирования поведения поверхностных трещин непрерывнолитого сляба» защитил в 2010 году в диссертационном совете Д 212.111.01, созданном на базе государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук подготовил в докторантуре при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

В настоящее время работает старшим научным сотрудником научно-инновационного сектора, по совместительству доцентом кафедры обработки материалов давлением им. М.И. Бояршинова в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре технологий обработки материалов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный консультант – доктор технических наук, Песин Александр Моисеевич, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», кафедра «Обработка материалов давлением им. М.И. Бояршинова», профессор.

Официальные оппоненты:

1. Бельский Сергей Михайлович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет», Metallургический институт, кафедра «Обработка металлов давлением», профессор,

2. Галкин Сергей Павлович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», кафедра «Обработка металлов давлением», профессор,

3. Колбасников Николай Георгиевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого», Институт машиностроения, материалов и транспорта, Высшая школа физики и технологий материалов, профессор

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет), г. Челябинск в своем положительном отзыве, подписанном Чаплыгиным Борисом Александровичем, доктором технических наук, профессором кафедры «Процессы и машины обработки металлов давлением», профессором, и утвержденном первым проректором – проректором по научной работе ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», доктором технических наук, доцентом Коржовым Антоном Вениаминовичем, указала, что «...Диссертационная работа «Теоретическое и технологическое обоснование применения скоростной асимметрии для повышения механических свойств листового проката» является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании

выполненных автором исследований решена научная проблема, заключающаяся в разработке для процессов листовой прокатки специальных схем плоской деформации, сочетающих сжатие и сдвиг с одновременно протекающими в очаге деформации структурно-фазовыми превращениями, обеспечивающими повышение механических свойств низкоуглеродистых сталей с ферритной матрицей без использования дополнительного легирования и отдельных операций термообработки. Диссертационная работа соответствует критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук согласно пунктам 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 № 842 (с дополнениями), а ее автор, Пустовойтов Денис Олегович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.4. Обработка металлов давлением».

Соискатель имеет 350 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 50 работ, из них в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, опубликовано 16 работ, в изданиях, входящих в наукометрические базы Web of Science и Scopus, опубликовано 12 работ, издано 5 монографий, получено 8 патентов на изобретения РФ. Сведения об опубликованных работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, достоверны. Авторский вклад соискателя объемом 20,6 п.л. в опубликованных работах общим объемом 88,7 п.л. состоит в постановке начальных и граничных условий конечно-элементного моделирования и выполнении расчетов; в описании напряженно-деформированного и температурного состояния металла при листовой прокатке со скоростной асимметрией во взаимосвязи с получаемой структурой и механическими свойствами; в разработке технического задания на изготовление оборудования (уникальной научной установки) для экспериментальной реализации процесса листовой прокатки со скоростной асимметрией; в выполнении экспериментов с применением уникальной научной установки; в разработке новых технологических схем листовой прокатки со скоростной асимметрией; в анализе, интерпретации, обобщении и систематизации теоретических и экспериментальных результатов, формулировке выводов, подготовке научных работ к опубликованию в открытой печати.

Наиболее значительные публикации по теме диссертации:

1. Пустовойтов, Д. О. Исследование формирования мелкозернистой структуры при асимметричной горячей прокатке низкоуглеродистых сталей / Д. О. Пустовойтов // Черные металлы. – 2025. – № 1. – С. 49-56. – DOI 10.17580/chm.2025.01.09. – EDN DPASEI.
2. Песин, А. М. Влияние асимметричной холодной прокатки на

технологическую пластичность низкоуглеродистых сталей / А. М. Песин, Д. О. Пустовойтов, О. Д. Бирюкова [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2024. – Т. 22, № 4. – С. 81-88. – DOI 10.18503/1995-2732-2024-22-4-81-88. – EDN JHWUVJ.

3. Pustovoytov, D. Asymmetric (Hot, warm, cold, cryo) rolling of light alloys: A review / D. Pustovoytov, A. Pesin, P. Tandon // Metals. – 2021. – Vol. 11, No. 6. – DOI 10.3390/met11060956. – EDN QPZZYU.

4. Песин, А. М. Математическое моделирование и сравнительный анализ деформированного состояния металла при асимметричной прокатке и равноканальном угловом прессовании / А. М. Песин, Д. О. Пустовойтов, С. А. Губанов, А. Э. Новоселов // Заготовительные производства в машиностроении (кузнечно-прессовое, литейное и другие производства). – 2018. – Т. 16, № 4. – С. 175-181. – EDN YWEPHP.

5. Песин, А. М. Моделирование немонотонности течения металла при асимметричной тонколистовой прокатке с рассогласованием скоростей валков / А. М. Песин, Д. О. Пустовойтов, Т. В. Швеева [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2017. – Т. 15, № 1. – С. 56-63. – DOI 10.18503/1995-2732-2017-15-1-56-63. – EDN YGSANN.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы (все отзывы положительные):

1. АО «Каменск-Уральский металлургический завод» (АО «КУМЗ») (г. Каменск-Уральский), подписанный кандидатом технических наук, ученым секретарем АО «КУМЗ» Овсянниковым Борисом Владимировичем. Замечания: 1. Считаю, что в дальнейшем следует более подробно изучить изменение микроструктуры и свойств при осуществлении предложенных многопроходной и однопроходной технологических схемах асимметричной прокатки. 2. Было бы неплохо исследовать, какие изменения потребуется внести в разработанные технологические схемы при прокатке алюминиевых и магниевых сплавов.

2. Белорусский национальный технический университет (Республика Беларусь, г. Минск), подписанный доктором технических наук, профессором, заведующим кафедрой «Машины и технология обработки металлов давлением» Томило Вячеславом Анатольевичем. Замечания отсутствуют.

3. ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (г. Иркутск), подписанный доктором технических наук, профессором, профессором кафедры «Металлургия цветных металлов» Института высоких технологий Барановым Анатолием Никитичем. Замечания: 1. Как влияет листовая прокатка со скоростной асимметрией на коррозионную стойкость листового проката? 2. Как изменится технологическая схема листовой прокатки со скоростной асимметрией при прокатке цветных металлов

и сплавов, в том числе алюминия?

4. Карагандинский индустриальный университет (Казахстан, г. Темиртау), подписанный PhD по специальности 6D070900 «Металлургия», ассоциированным профессором (доцентом), профессором кафедры «Обработка металлов давлением» Паниным Евгением Александровичем. Замечание: В автореферате не раскрывается возможное появление такого дефекта, как вертикальный изгиб переднего конца полосы (так называемая «лыжа»), который может сделать процесс непрерывной прокатки невозможным из-за застревания полосы в межклетевом промежутке. Рассматривался ли данный дефект в исследованиях и какие пути его предотвращения либо снижения могут быть использованы на ШСГП при применении скоростной асимметрии?

5. ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» (СибГИУ) (г. Новокузнецк), подписанный доктором технических наук, профессором, заведующим кафедрой «Обработка металлов давлением и материаловедения. ЕВРАЗ ЗСМК» Арышенским Евгением Владимировичем. Замечания: 1. В тексте автореферата приведены обширные теоретические выкладки и результаты моделирования, однако объем экспериментальных данных, особенно металлографических исследований, подтверждающих формирование структуры с размером зерна 1-4 мкм, представлен достаточно сжато. Было бы полезно увидеть более детальный статистический анализ распределения зерен по размерам для различных режимов прокатки. 2. Подписи к некоторым рисункам выполнены мелким шрифтом, что несколько затрудняет восприятие графической информации.

6. Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (Республика Беларусь, г. Минск), подписанный академиком Национальной академии наук Беларуси, доктором технических наук, главным научным сотрудником отдела материаловедения и литейно-деформационных технологий Ласковневым Александром Петровичем, кандидатом технических наук, доцентом, заведующим лабораторией высоких давлений и специальных сплавов Покровским Артуром Игоревичем. Замечания отсутствуют.

7. ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» (СибГИУ) (г. Новокузнецк), подписанный доктором технических наук, доцентом, профессором кафедры «Обработка металлов давлением и материаловедения. ЕВРАЗ ЗСМК» Фастыковским Андреем Ростиславовичем. Замечания: 1. Использование скоростной асимметрии при рекомендованных скоростях 20-25 м/с (стр. 29) приводит к загибу переднего конца, повышенному износу валков, более частым перевалкам. Из автореферата не понятно, насколько это усложняет процесс и как с этим бороться. 2. Нигде на экспериментальных графиках не указаны доверительные интервалы. 3. При

теоретическом определении $M_{пр}$ и $N_{пр}$ использована модель В.Ф. Баюкова (формулы 6, 7), не учитывающая влияние зоны прилипания, которая при прокатке со скоростной асимметрией занимает большую протяженность в очаге деформации (см. рис. 7), не ясно, насколько точны полученные значения $M_{пр}$ и $N_{пр}$.

8. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (г. Москва), подписанный доктором технических наук, профессором, главным научным сотрудником лаборатории узлов трения для экстремальных условий Столяровым Владимиром Владимировичем. Замечания: 1. В названии темы, объекте, предмете, цели и задачах нет упоминания о материале исследования. 2. Отсутствует описание химического и фазового состава, а также структурная аттестация и механические свойства исходной стали. Не известно деформационно-термическое состояние. 3. Физическое моделирование процесса измельчения выполнялось при схеме кручения, а полученные критерии использовали для прокатки. Нет ли здесь противоречия? 4. Существуют ли критерии по минимальной толщине листа, температуре, степени и скорости деформации для максимального измельчения структуры методом асимметричной прокатки? 5. В какой степени получаемые структуры однородны по распределению зерен по толщине, ширине и длине листа? 6. Из рис. 40 следует, что повышение класса прочности стали сопровождается снижением относительного удлинения до разрушения. Почему автор утверждает, что пластичность стали сохраняется. 7. Некорректно используется термин «диаметр зерна», поскольку форма зерен отличается от сферической.

9. АО «Выксунский металлургический завод» (г. Выкса), подписанный кандидатом технических наук, директором Инженерно-технологического центра Мунтиным Александром Вадимовичем. Замечания: 1. В автореферате представлены впечатляющие результаты по измельчению зерна и повышению прочности на лабораторных образцах. Однако не в полной мере освещены вопросы масштабирования предложенных технологий на промышленные широкополосные станы горячей прокатки, в частности, влияние скоростной асимметрии на профиль и плоскостность полос при высоких скоростях прокатки и натяжениях. 2. При описании технологической схемы с эффектом полной динамической рекристаллизации указано, что пауза между проходами не должна превышать 1 с, а скорость прокатки в последней клетке должна составлять 20-25 м/с. Требуется пояснения, насколько такие скоростные режимы достижимы на существующих станах и не приведут ли они к вибрациям главного привода или другим динамическим нагрузкам при реализации асимметричного режима.

10. АО «Самарский металлургический завод» (г. Москва), подписанный кандидатом технических наук, директором по развитию бизнеса и новых технологий Дрицем Александром Михайловичем. Замечания: 1. В работе экспериментально показано, что применение скоростной асимметрии позволяет сформировать в низкоуглеродистых С-Mn сталях мелкозернистую структуру со средним диаметром зерна феррита в диапазоне от 4 мкм до 1 мкм. Насколько такая структура термически стабильна? Это может быть критически важным, например, для зоны термического влияния при сварке плавлением. 2. В низкоуглеродистых сталях содержание углерода меняется в довольно широких пределах ($C \leq 0,25\%$). В автореферате представлены результаты только для стали с содержанием углерода 0,09%. Результаты не изменятся, если содержание углерода будет выше или ниже этой величины? 3. Из автореферата не видно, для каких конечных изделий использовался материал, полученный по предлагаемой технологии, и какой эффект (технический или экономический) получен или может быть получен от его применения.

11. ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (г. Самара), подписанный академиком РАН, доктором технических наук, профессором, научным руководителем НИЛ-37 Гречниковым Федором Васильевичем, доктором технических наук, доцентом, заведующим кафедрой обработки металлов давлением Ерисовым Ярославом Александровичем. Замечания: 1. В тексте автореферата не приведены граничные условия, критерий пластичности и реологические модели материалов, которые использовались при конечно-элементном моделировании. 2. В автореферате не раскрыто влияние асимметрии на текстурообразование (в том числе образование текстуры сдвига) и формирование анизотропии свойств деформируемой заготовки, и как следствие на предельные деформационные возможности материала.

12. Институт металлургии им. А.А. Байкова Российской академии наук (г. Москва), подписанный доктором технических наук, заведующим лабораторией пластической деформации металлических материалов Юсуповым Владимиром Сабитовичем. Замечания: 1. В автореферате не указано, как при асимметричной прокатке при наличии значительных зон прилипания (см. рис. 6, б) определяются нейтральные точки, разделяющие зоны отставания и опережения? 2. Поскольку в работе речь идет о листовых материалах, то было бы целесообразно представить результаты испытаний анизотропии механических свойств. 3. В автореферате не приведены данные о способах измерения фактических температур металла при лабораторной асимметричной прокатке.

13. ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет» (г. Москва), подписанный доктором технических наук, профессором, профессором кафедры

«Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» Шаталовым Романом Львовичем. Замечания: 1. Сила прокатки в средней части полосы и на концевых участках может заметно отличаться, что не исследовано. 2. Проводилось ли измерение силы прокатки по всей длине полосы (на стационарных и неустановившихся участках)? И как, при этом, определялась средняя сила прокатки? 3. Не исследовано влияние асимметричной прокатки на износ рабочих валков. 4. Недостаточно исследованы проблемы вертикального изгиба и формирование показателей плоскостности полосы при асимметричной прокатке. 5. Не приведены результаты апробации теоретических и технологических решений на промышленном стане горячей прокатки полос.

14. ООО «Исследовательский центр ТМК» (ООО «ИЦ ТМК») (г. Москва), подписанный доктором технических наук, доцентом, генеральным директором Пышминцевым Игорем Юрьевичем, доктором технических наук, заместителем генерального директора по научной работе Космацким Ярославом Игоревичем. Замечание: 1. К возможным направлениям дальнейшего развития исследования можно отнести: масштабирование разработанных технологических схем для промышленных условий; изучение влияния асимметрии на другие типы сталей и сплавов; оптимизацию параметров процесса для достижения еще более высоких показателей прочности и пластичности.

15. ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург), подписанный доктором технических наук, заведующим кафедрой «Обработка металлов давлением» Шварцем Данилом Леонидовичем. Замечания: 1. При описании результатов исследования напряженно-деформированного состояния металла при листовой прокатке со скоростной асимметрией (глава 2) не рассматривается влияние трения. Оказывает ли влияние изменение коэффициента трения на рассматриваемые параметры процесса, в частности, на деформацию в центре листа и опережение (см. рис. 9 автореферата), а также относительную длину зоны опережения (см. рис. 10 автореферата)? 2. Из текста автореферата не ясно, как были получены кривые относительного усилия прокатки (см. рис. 17 автореферата). Как они соотносятся количественно с опытными данными? 3. При описании результатов главы 5 в автореферате не прослеживается зависимость измельчения зерна от параметров скоростной асимметрии.

16. Институт физики молекул и кристаллов ФГБНУ «Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (ИФМК УФИЦ РАН) (г. Уфа), подписанный доктором физико-математических наук, доцентом, ведущим научным сотрудником, заведующим лабораторией физики металлов Гундеровым Дмитрием Валерьевичем. Замечания: 1. Недостаточно ясна природа, с физической точки зрения, снижения энергозатрат при асимметричной прокатке. 2. Результаты, касающиеся размера зерна,

формирующегося в процессе динамической рекристаллизации аустенита, следовало подтвердить металлографически. 3. В работе представлены изображения зеренной структуры, полученные на сканирующем электронном микроскопе с использованием метода дифракции обратно рассеянных электронов (ДОРЭ). При этом не указаны такие важные параметры ДОРЭ, как размер стороны квадрата области сканирования и размер шага сканирования. Кроме того, из автореферата (см. рис. 35-36) неясно, в какой части толщины полосы (поверхность, $\frac{1}{4}$ толщины, $\frac{1}{2}$ толщины) получена такая структура. Также не представлена структура в поперечном сечении полосы. 4. При деформации стали в двухфазной области может происходить наклеп ферритной структуры. Проводилась ли количественная оценка плотности дислокаций в стальных образцах, полученных методом асимметричной прокатки в двухфазной области?

17. ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (г. Уфа), подписанный доктором физико-математических наук, главным научным сотрудником научно-исследовательской лаборатории «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях», профессором кафедры Материаловедения и физики металлов Еникеевым Нариманом Айратовичем. Замечания: 1. Название работы представляется несколько несфокусированным – как правило, использование специальных терминов в названии работы, присущих данной конкретной научной специальности, должно быть обоснованным и понятным широкому кругу научной общественности. Из названия неясно, а во введении автореферата не хватает явного определения термина «скоростная асимметрия», об асимметрии распределения какой измеряемой величины идёт речь: скоростей деформации, или же просто подразумевается разная скорость вращения валков? 2. На Рис. 9а показано изменение величины деформации в зависимости от соотношения скоростей валков в центре листа. Распределение данной величины по высоте листа и его эффект на неоднородность получаемой мелкозернистой структуры в автореферате подробно не обсуждается.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их значительным научно-практическим опытом, высокой квалификацией, известностью благодаря научным и практическим достижениям в области обработки металлов давлением (в том числе процессов асимметричной прокатки), структурно-фазового управления свойствами металлических материалов, разработки новых технологий пластической обработки, наличием работ, касающихся темы диссертации, опубликованных в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, а также в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus. Это подтверждает их способность квалифицированно определить и оценить научную новизну, теоретическую и практическую значимость исследований.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана и теоретически обоснована научная концепция, согласно которой управление размером зерна феррита в диапазоне от 10 до 5 мкм (10-12 балл) за счет традиционного процесса симметричной листовой прокатки, а также дополнительные технологические возможности управления размером зерна феррита в диапазоне от 4 до 1 мкм (13-17 балл) за счет применения скоростной асимметрии открывают технологические возможности производства листового горячекатаного проката различных классов прочности (от 350 до 700 МПа по пределу текучести) из низкоуглеродистых С-Mn сталей с ферритной матрицей (ферритно-перлитные, ферритно-бейнитные, ферритно-мартенситные) единого химического состава без использования дополнительных легирующих элементов (Nb, Mo и др.) и отдельных операций термической обработки;

предложен нетрадиционный подход к осуществлению деформации листов и полос в рабочих валках, вращающихся с различными скоростями. В основе указанного подхода положен принцип создания специальных схем напряженно-деформированного состояния, совмещающих сжатие и сдвиг с одновременно протекающими в очаге деформации структурно-фазовыми превращениями, что обеспечивает формирование в низкоуглеродистых С-Mn сталях сверхмелкого зерна феррита (до 1 мкм) без использования дополнительных легирующих элементов (Nb, Mo и др.) и отдельных операций термической обработки;

доказана и экспериментально подтверждена перспективность и целесообразность использования динамической рекристаллизации для получения мелкозернистой структуры аустенита при горячей деформации, что возможно в прокатном производстве лишь в условиях больших сдвиговых деформаций при использовании скоростной асимметрии. Высокие значения сдвиговой деформации обеспечивают реализацию эффекта полной динамической рекристаллизации во всем объеме деформируемого металла. Этого эффекта не удастся достичь в технологиях горячей симметричной прокатки на непрерывных или реверсивных станах – при недостаточных сдвиговых деформациях формируется неблагоприятная и трудно устранимая бимодальная (разнозернистая) структура аустенита. Охлаждение горячекатаного листа с заданной скоростью после прокатки со скоростной асимметрией с большими сдвиговыми деформациями позволяет в результате фазовых превращений получить структуру сверхмелкого зерна феррита. **Доказана** и экспериментально подтверждена перспективность и целесообразность использования листовой прокатки со скоростной асимметрией при совмещении температурного диапазона фазового

(полиморфного) аустенитно-ферритного превращения, зависящего от структурного состояния аустенита и скорости охлаждения, с температурным диапазоном прокатки, который зависит от степени, скорости деформации и теплофизических свойств деформируемого металла. Этот метод – динамическое ферритное превращение, позволяет достичь наилучших параметров структуры деформированного металла, а также комплекса прочностных, пластических и (очевидно) вязких свойств проката;

введено новое понятие – «полное динамическое ферритное превращение». Это процесс полного фазового (полиморфного) аустенитно-ферритного превращения непосредственно в очаге деформации в условиях контролируемого понижения температуры металла от точки начала ферритного превращения A_{r3} (на входе в очаг) до точки конца ферритного превращения $T_{A \rightarrow \Phi}^K$ (на выходе из очага) при листовой прокатке со скоростной асимметрией.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказаны положения, расширяющие существующие представления о возможностях преодоления технологических ограничений (по деформации, усилиям, нижнему пределу измельчения зерна феррита) традиционных методов симметричной листовой прокатки за счет применения нового фактора – скоростной асимметрии. Расширены границы применимости полученных результатов, а именно значительно уменьшен нижний предел измельчения зерна феррита с уровня ~ 5 мкм до уровня ~ 1 мкм за счет реализации механизмов полной динамической рекристаллизации и полного динамического ферритного превращения при листовой прокатке со скоростной асимметрией, что позволило обеспечить повышение прочности (до 2 раз) низкоуглеродистых С-Мn сталей при сохранении их пластичности без использования дополнительных легирующих элементов и отдельных операций термической обработки;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использован комплекс существующих базовых методов исследования, в том числе численных методов конечных разностей и конечных элементов, а также экспериментальных методик исследования процессов листовой прокатки со скоростной асимметрией, в том числе с применением уникальной научной установки;

изложены факторы и условия, обеспечивающие создание за 1-3 прохода при листовой прокатке со скоростной асимметрией экстремально больших сдвиговых деформаций, соизмеримых с процессами интенсивной пластической деформации и недостижимых для традиционных методов симметричной листовой прокатки;

раскрыта проблема технологических ограничений (по деформации,

усилиям, нижнему пределу измельчения зерна феррита) традиционных методов симметричной листовой прокатки, а также проблема формирования неблагоприятной и трудно устранимой бимодальной (разнозернистой) микроструктуры (т.е. сочетающей чрезмерно крупные и мелкие зерна аустенита или феррита) в условиях неполной (частичной) динамической рекристаллизации или неполного (частичного) динамического ферритного превращения при недостаточных сдвиговых деформациях;

изучено влияние скоростной асимметрии на деформированное состояние металла и кинематические характеристики очага деформации, на напряженное состояние металла, усилие, распределение моментов и мощности между рабочими валками при листовой прокатке, на микроструктуру и механические свойства низкоуглеродистых С-Mn сталей с ферритной матрицей;

проведена модернизация существующих математических моделей, описывающих деформированное состояние металла, кинематические характеристики очага деформации, энергосиловые параметры процесса листовой прокатки со скоростной асимметрией, в том числе во взаимосвязи с получаемой микроструктурой и механическими свойствами низкоуглеродистых С-Mn сталей.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработано техническое задание, изготовлен и введен в эксплуатацию в лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» стан дуо листовой прокатки с индивидуальным приводом рабочих валков, имеющий статус уникальной научной установки. Оборудование обеспечивает проведение научных исследований в соответствии с лучшими мировыми практиками и применяется для лабораторно-экспериментальной апробации создаваемых наукоемких технологий листовой прокатки на полноразмерных образцах, с потенциалом внедрения таких технологий в условиях различных металлургических предприятий;

определены области практического использования результатов работы. Для многоклетевых широкополосных станов горячей прокатки или литейно-прокатных агрегатов: для реализации механизма полной динамической рекристаллизации аустенита скоростная асимметрия должна осуществляться не менее, и не более чем в 3 последних клетях чистовой группы, при этом относительные обжатия по проходам должны быть не менее 45% и не более 55%, а соотношение скоростей валков в каждой из 3 клеток должно быть не менее 1,2 и не более 2, при этом скорости нижних валков должны быть больше скоростей верхних валков; при допустимой паузе между проходами не более 1 с, скорость прокатки в последней клетке должна составлять 20-25 м/с; при допустимой паузе между проходами не более 2 с, скорость прокатки в

последней клетки может быть снижена до 10-12,5 м/с; межклетевое охлаждение для последних 3 клеток должно обеспечивать эффективный теплоотвод, достаточный для компенсации деформационного и фрикционного разогрева металла в очаге деформации; последеформационное охлаждение должно обеспечивать эффективный теплоотвод, достаточный для получения требуемого фазового состава стали (ферритно-перлитная, ферритно-бейнитная, ферритно-мартенситная). Для одноклетевых станов горячей прокатки: для реализации механизма полного динамического ферритного превращения скоростная асимметрия должна осуществляться не более чем за 1 проход при величине параметра формы очага деформации по высоте $l_d/h_{cp} > 5$; в очаге деформации должно обеспечиваться контролируемое понижение температуры металла от температуры начала аустенитно-ферритного превращения A_{r3} до температуры конца аустенитно-ферритного превращения $T_{A \rightarrow \Phi}^K$, поэтому скорость прокатки должна составлять 0,1-0,5 м/с; предварительное охлаждение должно обеспечивать понижение температуры A_{r3} и ускорение трансформации аустенита в феррит; последеформационное охлаждение должно обеспечивать эффективный теплоотвод, достаточный для получения требуемого фазового состава стали (ферритно-перлитная, ферритно-бейнитная, ферритно-мартенситная);

создана система практических рекомендаций по производству горячекатаного листового (рулонного) проката 12 разных классов прочности: S355MC, S420MC, S460MC, S500MC, S550MC, S600MC, S650MC, S700MC в соответствии с EN 10149-2:2013 и HDT450F, HDT580F, HDT580X, HDT760C в соответствии с EN 10338:2025 из низкоуглеродистой C-Mn стали одного состава без использования дополнительных легирующих элементов и отдельных операций термической обработки с расчетным экономическим эффектом на 1 тонну горячекатаного проката от 2,2-2,9 тыс. руб/т для классов прочности S420MC или HDT580F за счет экономии 0,03-0,04 мас.% ниобия, до 15,1-15,4 тыс. руб/т для классов прочности S700MC или HDT760C за счет экономии 0,25 мас.% молибдена, 0,1 мас.% титана, 0,25 мас.% хрома (в ценах 2025 г., 1\$=85 RUB);

представлены предложения по дальнейшему совершенствованию технологий листовой прокатки за счет применения скоростной асимметрии, а именно комплекс новых технологических решений, обеспечивающих снижение на 10-15% расхода электрической энергии главных приводов, измельчение микроструктуры и повышение класса прочности низкоуглеродистых C-Mn сталей, повышение ударной вязкости толстолистового проката, повышение технологической пластичности и исключение дополнительных операций промежуточного отжига при листовой прокатке сталей различных систем

легирования, в том числе среднеуглеродистых, высокоуглеродистых и нержавеющей, а также цветных металлов и сплавов. Техническая новизна подтверждена 8 патентами на изобретения РФ №2848699, №2833651, №2821127, №2829244, №2795066, №2701322, №2486974, №2622196.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

эксперименты проведены с использованием современных средств физического моделирования термомеханических процессов обработки металлов давлением, дилатометрического, термического, металлографического анализа, а также испытаний механических свойств. Экспериментальные исследования процесса листовой прокатки со скоростной асимметрией выполнены с применением уникальной научной установки «Экспериментальный реверсивный стан дуо листовой прокатки с индивидуальным приводом рабочих валков» лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева»;

теория диссертационного исследования базируется на уравнениях и законах теории пластичности, теории обработки металлов давлением, реологических моделях материалов, уравнениях энергетического баланса, результатах конечно-элементного моделирования в специализированной программе QForm (лицензия № R0-U2497-170719U197) и согласуется с опубликованными экспериментальными данными;

идея базируется на результатах анализа и обобщения передового отечественного и зарубежного опыта применения метода деформации листов и полос в рабочих валках, вращающихся с различными скоростями, для уменьшения размера зерна и повышения за счет этого механических свойств различных металлов и сплавов;

использованы сравнения полученных автором данных о формировании микроструктуры и механических свойств низкоуглеродистых С-Mn сталей при листовой прокатке со скоростной асимметрией с ранее полученными результатами экспериментальных исследований других авторов;

установлено качественное и количественное совпадение авторских результатов, позволяющих достичь наилучших параметров микроструктуры листового проката, а также комплекса его прочностных и пластических свойств, с известными теоретическими и экспериментальными данными и научными представлениями, базирующимися на взаимосвязи между пределом текучести поликристаллического материала и размером его зёрен согласно зависимости Холла-Петча, а также на сохранении пластичности согласно критерию Консидера;

использованы автоматизированные системы сбора и регистрации данных в реальном времени с силоизмерительных устройств (месдоз), термопар, датчиков линейных перемещений, энкодеров, векторных

преобразователей частоты и других измерительных приборов при экспериментальной реализации процесса листовой прокатки со скоростной асимметрией на уникальной научной установке, а также при проведении экспериментов на симуляторе термомеханических процессов Gleeble 3800.

Личный вклад соискателя состоит в: постановке цели и задач работы; в выполнении конечно-элементных расчетов; в описании напряженно-деформированного и температурного состояния металла при листовой прокатке со скоростной асимметрией во взаимосвязи с получаемой микроструктурой и механическими свойствами; в разработке технического задания на изготовление оборудования (уникальной научной установки) для экспериментальной реализации процесса листовой прокатки со скоростной асимметрией; в непосредственном выполнении экспериментов с применением уникальной научной установки; в разработке новых технологических схем листовой прокатки со скоростной асимметрией; в анализе, интерпретации, обобщении и систематизации теоретических и экспериментальных результатов работы, формулировке выводов и положений, выносимых на защиту.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания.

В отзыве ведущей организации:

1. В тексте автореферата (см. стр. 11, предпоследний абзац снизу) указано, что соотношение скоростей валков v_1 и v_2 является величиной постоянной и может быть любым, т.е. $1 \leq v_1/v_2 < \infty$. Однако, согласно известному подходу, сформулированному представителями челябинской научной школы под руководством В.Н. Выдрина, процессы асимметричной прокатки имеют множество кинематических вариантов, при этом отношения окружных скоростей валков находятся в диапазоне $1 \leq v_1/v_2 \leq \lambda$, где $\lambda = h_0/h_1$ – коэффициент вытяжки. Необходимо пояснить такое различие в подходах.

2. Одним из возможных недостатков процессов асимметричной прокатки может являться нарушение плоскостности листов, которое принято называть желобчатостью. В отличие от дефектов плоскостности листов в виде волнистости и коробоватости, возникающих при симметричной прокатке из-за неравномерности обжатий по ширине листа, желобчатость может возникать в результате неравномерности обжатий по толщине листа. Дефекты плоскостности листов всегда являются браковочными признаками. В диссертационной работе практически не представлены результаты, касающиеся дефектов плоскостности листов.

3. Автором предложены технологические схемы производства горячекатаных полос из высокопрочных (от S355MC до S700MC)

низкоуглеродистых С-Mn сталей единого химического состава с ферритной матрицей со средним диаметром зерна феррита в диапазоне от 4 мкм до 1 мкм. Но какова термическая стабильность такой структуры? Проводилась ли оценка стабильности такой структуры при сварке? Оценивалась ли пригодность полученных сталей к сварке?

4. Технологические схемы, представленные на рис. 38 и 39 в автореферате, а также на рис. 6.4 и 6.5 в шестой главе диссертации, соответствуют процессам рулонной прокатки с натяжениями. Однако в диссертационной работе не представлены результаты влияния прикладываемых переднего и заднего натяжений на напряженно-деформированное состояние металла, скоростные и энергосиловые параметры процесса асимметричной прокатки.

5. Согласно схеме на рис. 39 (см. автореферат) фазовое аустенитно-ферритное превращение должно происходить непосредственно в очаге деформации в процессе асимметричной прокатки. Однако не совсем понятно, какую роль при этом играет изображенная на схеме установка ускоренного (последедеформационного) охлаждения?

6. На рис. 40 в автореферате представлены диаграммы растяжения для низкоуглеродистой стали одного и того же химического состава (0,09С-1,6Mn). При этом сталь соответствует различным классам прочности (согласно EN 10149-2:2013, EN 10338:2025). На некоторых диаграммах можно наблюдать площадку текучести, на других – нет. Каким образом процесс асимметричной прокатки влияет на наличие или отсутствие площадки текучести на диаграммах растяжения? От чего это зависит?

7. Из текста диссертационной работы не ясно, могут ли предлагаемые новые технологические решения, включающие применение скоростной асимметрии, быть внедрены на существующих промышленных прокатных станах или для этого требуется их модернизация/реконструкция? Или, может быть, требуется проектирование и создание новых специализированных промышленных станков асимметричной прокатки?

В отзыве официального оппонента С.М. Бельского:

1. Для понимания постановки задачи в п. 2.3 следовало бы отметить, что v_{M1}^{cp} - это средняя горизонтальная скорость, с которой материальная точка M_1 проходит длину очага деформации, а v_{M2}^{cp} - средняя горизонтальная скорость, с которой материальная точка M_2 проходит участок s_2 .

2. На стр. 94 сказано, что «... для создания максимального угла сдвига скорости течения металла должны стремиться к скоростям валков, т.е. $v_{M1} \rightarrow v_1, v_{M2} \rightarrow v_2 \dots$ ». Если условие $v_{M2} \rightarrow v_2$ можно представить, то условие $v_{M1} \rightarrow v_1$ явно гипотетическое – оно возможно только в случае полного

прилипания верхней поверхности полосы к быстрому валку при входе в межвалковый зазор.

3. Рис. 2.22: дополнительное перемещение точки из положения M_1 в положение M'_1 будет оказывать влияние на деформацию сдвига, т.к. для прямолинейного движения полосы из очага деформации необходимо приложить деформирующую силу – в этом случае будет иметь место внеконтактная деформация; внеконтактная деформация будет отсутствовать при естественном загибе полосы в сторону медленного валка.

4. Как объяснить, что при моделировании в программном комплексе QForm, отклонение полосы на входе в очаг деформации происходит в сторону медленного валка (рис. 2.25 и 2.30)? Относится ли угол подачи полосы к начальным условиям?

5. Имеет место несоответствие числа задач исследования (5) числу основных выводов по диссертационной работе (12): число задач исследования должно быть равно числу выводов.

6. Одной из задач исследования является «Создание лабораторного оборудования для экспериментальной реализации процесса листовой прокатки со скоростной асимметрией». Что было создано при участии соискателя из лабораторного оборудования, если прокатный стан лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» МГТУ им. Г.И. Носова был изготовлен в Корее, исследования на установке Gleeble 3800 и металлографические исследования проводились в ЮУрГУ и лаборатории ООО «Тиксомет» (г. Санкт-Петербург), теплофизические исследования проводились в Курчатовском институте ФГУП «ВИАМ», электронная микроскопия выполнена в Лаборатории прецизионной микроскопии НИИ прогрессивных технологий ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет»?

В отзыве официального оппонента С.П. Галкина:

1. Результаты, представленные в диссертации и автореферате, относятся, в основном к С-Mn сталям с содержанием углерода около 0,1 %. Не вполне понятно распространяются ли предложенные технологические решения на прокат из сталей других химических составов, в частности, средне и высокоуглеродистых, а также при использовании «дополнительных легирующих элементов» (ред. автора). Существуют ли методики пересчета параметров скоростной асимметрии для прокатки других марок.

2. Интересно мнение автора относительно возможности применения скоростной асимметрии для получения листового проката реальной ширины (более 500 мм). В частности, с учетом её влияния на геометрию проката, равномерность структуры и свойств по ширине.

3. Недостаточно освещена термостабильность получаемых

мелкодисперсных структурных состояний, в частности, возможна ли сварка таких листов.

4. На этих рисунках (рис. 6 автореферата и рис. 2.28) диссертации представлены довольно протяженные зоны прилипания, где горизонтальные скорости валков и металла равны между собой. Не совсем понятно, как в этом случае определяется нейтральный угол и, соответственно, длины зон отставания и опережения?

5. Экспериментально показано, что скоростная асимметрия снижает усилие прокатки более чем в 2 раза, но, одновременно, увеличивает момент прокатки более, чем в 3 раза (таблицы 3.2, 3.4 последний режим), а в других случаях и до 5 раз. Желательно привести более развёрнутое физическое объяснение этого результата. И не будет ли данное обстоятельство серьёзным препятствием для внедрения такого способа прокатки на действующих станах.

6. Автором предложен способ листовой горячей прокатки со скоростной асимметрией, отличительным признаком которого является контролируемое охлаждение металла в очаге деформации за счет понижения скорости прокатки. Однако не указаны параметры этого охлаждения.

7. Имеются некоторые терминологические неточности и излишне подробное изложение. Например: не раскрыт смысл термина «сохранение пластичности»; вместо «листовая» прокатка (ширина не менее 500 мм по ГОСТ) во многих контекстах лучше использовать «полосовая»; вместо «практическая ценность» - промышленная применимость (12-й вывод).

В отзыве официального оппонента Н.Г. Колбасникова:

1. В данной работе речь идет об очень больших сдвиговых деформациях, достигаемых в очаге деформации при асимметричной прокатке. Математическое моделирование при помощи конечно-элементных программ является эффективным методом исследования, который показывает хорошие результаты при правильном экспериментальном определении реологических свойств металла. Однако, методы физического моделирования *больших деформаций*, в том числе на лучшем термомеханическом симуляторе *Gleeble*, использованные в диссертации, могут иметь большие погрешности. Это касается, в том числе, методик, применяемых на модулях *Torsion* – при больших углах закручивания, несмотря на небольшие вспомогательные деформации растяжения, может нарушаться устойчивость пластической деформации. При этом на образцах формируются «узелки», в которых сосредоточивается деформация, не развиваясь по всему образцу. Некоторые фотографии деформированных образцов на рис. 2.8 свидетельствуют об этом. При этом зависимости истинных напряжений $\sigma(\epsilon)$ выглядят не столь идеально, как представлено в диссертации. Дополнительно, при кручении распределение

деформаций по толщине рабочей части образца неоднородно при изменении радиуса R , см. формулу (2.34). В связи с этим непонятно, а в тексте диссертации не указано, как определяли величину деформации при построении реологических зависимостей – принимали максимальную или среднюю по образцу.

2. Методы математического и физического моделирования процессов ОМД базируются на гипотезе единой кривой, которая предполагает, что зависимость интенсивности напряжений от интенсивности деформаций не зависит от схем напряженного состояния. На протяжении многих десятилетий эта гипотеза поддерживалась и поддерживается в настоящее время большинством специалистов в области механики сплошной среды и теории обработки металлов давлением, но некоторый скепсис в ее справедливости у многих специалистов присутствовал всегда. Несмотря на то, что исследования были выполнены Людвигом и Шоем (1925 г.) для относительно небольших деформаций, результаты обобщались и для развитых пластических деформаций, характерных для промышленных технологических процессов. Однако, в последнее десятилетие, благодаря развитию экспериментальных методов исследования больших деформаций, в том числе истинных деформаций после потери устойчивости и образования шейки при растяжении, гипотеза единой кривой опровергается именно для высоких степеней деформации. При этом в области малых деформаций эта гипотеза остается приблизительно справедливой. Различия интенсивности напряжений в зависимости от температуры, скорости деформации и коэффициента жесткости напряженного состояния могут достигать больших значений. При этом гипотеза единой кривой выполняется приблизительно до 15% параметра Одквиста, что на диаграмме условных напряжений близко к деформации, соответствующей потере устойчивости пластической деформации (образованию шейки при одноосном растяжении или пределу прочности в условных напряжениях). Отмечается, что чем более отрицательным становится значение коэффициента жесткости k_2 , тем выше уровень деформационного упрочнения, что должно приводить к формированию более мелкого зерна. Таким образом, при формировании структуры сказывается дополнительное влияние гидростатических напряжений. Экспериментально это было подтверждено при моделировании формирования структуры на комплексе *Gleeble* режимов прокатки в калибрах на рельсобалочном стане. В связи с этим результаты КЭ-моделирования формирования структуры, а точнее – размера зерна аустенита, с использованием асимметричной прокатки было бы крайне целесообразно подтвердить металлографически. Методы исследования исходного зерна аустенита непросты, но вполне осуществимы.

3. Не совсем понятны утверждения автора о том, что при симметричной

прокатке наблюдаются только деформации сжатия, а сдвиговая деформация, в отличие от асимметричной прокатки, отсутствует, а также о том, что при симметричной прокатке не происходит проработки структуры средней части проката (по толщине). Не ясны причины, по которым в диссертации не приведены графики распределения интенсивности деформаций по очагу деформации при симметричной и асимметричной прокатке, полученные при помощи КЭ-модели. Они могли бы дать дополнительную качественную и количественную информацию о преимуществах АП. А проработка структуры по толщине проката зависит, как известно, от показателя формы очага деформации, а при прокатке средне- и тонколистового горячекатаного листа средняя часть прорабатывается хорошо. Об этом свидетельствует однородная равномерная структура после горячей прокатки листа средних и малых толщин.

4. При рассмотрении и описании различных типов динамической рекристаллизации автор ограничивается эмпирическим описанием при помощи уравнения Колмогорова (КДМА), полагая что этот процесс происходит за счет диффузионных процессов образования зародышей и их роста по аналогии со статической рекристаллизацией, причем независимо от температурно-скоростных условий деформации. Однако, большинство исследователей считают, что диффузионный механизм динамической рекристаллизации возможен только при высоких температурах и малых скоростях деформации, поскольку и образование зародышей, и их рост, контролируются диффузионными процессами. Как известно, диффузионные процессы развиваются во времени и зависят экспоненциально от температуры и химического состава сплава. Кстати, низкое содержание углерода, а также высокая концентрация марганца (и немного кремния) повышают энергию активации и тормозят диффузию в стали. Понижение гомологической температуры деформации до $(0,55-0,6)T_{пл}$, то есть 700-800 °С, экспоненциально снижает скорость диффузии и приводит к невозможности *диффузионного механизма* динамической рекристаллизации, происходящей непосредственно в очаге деформации при времени прохождения очага деформации, составляющей сотые доли секунды. Между тем известно, что образование границ, то есть зародыша рекристаллизации, возможно как диффузионным, так и сдвиговым путем, тем более что при АП сдвиговые деформации значительно больше, чем при симметричной прокатке. Сдвиговым путем образуются границы при мартенситном или бейнитном превращениях, а также при ротационной пластичности, что установлено экспериментально, а энергетическое условие образования новых границ известно. Сдвиговым путем границы могут быть образованы при низких температурах, причем скорость их образования идет со скоростью пластической деформации. Суть замечания состоит в том, что более

глубокий анализ процессов структурообразования с позиций представлений физического металловедения мог бы украсить диссертацию, придав более физически обоснованный характер.

5. Автор в диссертации исследует энергосиловые характеристики симметричной и асимметричной прокатки, рассуждает о выполнении закона сохранения энергии. Понятно, что он выполняется, а из сети потребляется столько энергии, сколько расходуется на процесс пластической деформации со всеми сопровождающими потерями. Однако, при исследовании асимметричной прокатки, активирующей динамическое фазовое превращение, в главе 5 представлена лишь информация о распределении крутящих моментов на прокатных валках (табл. 5.8). Явно не хватает сравнений энергозатрат с окрестными температурными режимами АП, не совпадающих с температурным интервалом фазового превращения. Эти дополнительные исследования с применением уникальной научной установки могли бы быть крайне интересными для изучения механизма формирования ультрамелкозернистой структуры.

6. Бросается в глаза и режет слух легковесность некоторых суждений автора, которую он допускает в ряде случаев, очевидно цитируя «более ранних авторов». Это касается, во-первых, уже упомянутых высказываний о фазовых превращениях, происходящих в деформируемом или деформированном металле, как замене зерна аустенита (γ -фаза) новыми зернами феррита (α -фаза) по аналогии с динамической рекристаллизацией. Во-вторых, проводя аналогию асимметричной прокатки с радиально-сдвиговой прокаткой (РСП), автор утверждает, что «металл глубоко уплотняется». Это означает, что и при РСП, и при АП, можно получить металл, *значительно более плотный*, чем его табличная плотность? В главе 6 рассматривается технологическая схема совмещенного процесса непрерывного литья сверхтонкой полосы в двухвалковый кристаллизатор и однопроходной листовой прокатки со скоростной асимметрией, рис.6.6. Необходимо заметить, что процесс разлива жидкой стали в валки-кристаллизаторы по технологии, разработанной для завода в г. *Crawfordsville* (Индиана, США) на агрегате *Castrip LLC*, очень сложен, а на разработку узла разлива фирмой *Nucor Steel* были инвестированы огромные средства.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

1. Ваши разработки сделаны для сталей системы углерод-марганец. В чем особенность этой системы с точки зрения структуры, текстуры и так далее, что отличает ее от других низколегированных марок сталей, и можно ли ваши положения применять и к другим маркам?

2. На 16-м слайде и на некоторых других: эти точки – это

экспериментальные данные?

3. Прочность и пластичность – это одно. А есть ещё специальные свойства, для обеспечения которых вводятся легирующие элементы: коррозионная стойкость, хладостойкость, жаростойкость, жаропрочность и многие другие. Можно или нельзя этим методом прокатывать легированные марки сталей? Можно ли взять листовую сталь, например, хромоникелевую или хром-никель-молибденовую, которая обрабатывается обычным методом прокатки, и прокатать её асимметрично; получим ли мы те же 12 классов прочности или нет?

4. Одной из традиционных задач методов ИПД является одновременное получение высоких прочностных и пластических свойств. Вы наблюдаете такой эффект? Можете показать диаграмму, на которой видно, что одновременно повышаются прочностные и пластические свойства? Вы достигли механизма ротационной пластичности?

5. Вы говорите, что имеются режимы, при которых вертикального изгиба полосы происходить не будет. Эти режимы соответствуют режимам измельчения зерна?

6. Касательно ваших режимов: вы всегда находитесь в области динамической рекристаллизации или можно найти режимы до начала рекристаллизации?

7. У вас достаточно много результатов EBSD. Поясните методику и эти результаты. Например, на 33-м слайде. Не проще ли было использовать Thixomet и на РЭМе определить структуру?

8. По 30-ому слайду. Вы получаете в очаге деформации понижение температуры до 100 градусов. За счет чего это происходит? Какие устройства вы используете для достижения заданных температур? Насколько такое понижение возможно в промышленных условиях?

9. По 31-ому слайду. Если сочетаются два вида деформации – сжатие и сдвиг, возможно ли кручение?

10. Существует несколько различных механизмов упрочнения. Какой механизм здесь применяется? Какой механизм упрочнения преобладает в вашем металле при ваших режимах?

11. Почему при обычной прокатке получается поверхностная сдвиговая деформация, а при асимметричной – объемная?

12. По 32-ому слайду. Последеформационное охлаждение водой и охлаждение на воздухе. Какой вариант вы рекомендуете?

13. По 34-ому слайду. Зависимость Холла-Петча – это экспериментальные точки или расчетные? Как вы находили средний размер зерна?

14. Как это скажется на стойкости валков?

15. В диссертации указано, что после прокатки асимметричным способом получается различная твердость по сторонам, например, в таблицах 5.5 и 5.6. Как вы это прокомментируете? Как это скажется на дальнейшей обработке у потребителей при лазерной резке, при сварке, при вырубке?

16. По 35-ому слайду. У вас здесь указан потенциал экономии легирующих элементов. От какого верхнего значения этот потенциал?

17. Отношение предела текучести к пределу прочности по многим стандартам не должно превышать 0,85, максимум – 0,90. У вас есть превышение. Как вы это прокомментируете?

18. Можно ли решать обратную задачу, если ставится условие получить заданное соотношение пластичности и прочности?

19. Проводились ли испытания на холодный изгиб согласно нормативному документу? Это очень важно для потребителей при таком напряженном состоянии в материале.

20. По 28-ому слайду. У вас здесь указано суммарное обжатие в виде отношения h_0 к h_3 , которое должно быть больше или равно 8. Какая толщина должна задаваться в первую клетку в таком случае? Ваша рекомендация – шесть клеточек, как указано на 36-ом слайде?

21. Вопрос по уширению. При такой толщине каким будет уширение? Сейчас значительно возросли требования к величине уширения в рулонном прокате – с 30 до 10 мм. Как будет обеспечиваться допуск по ширине без вертикальных валков?

22. Если максимально перенести обжатия на чистовую стадию, то черновая будет сильно разгружена. Где расчеты того, каким будет зерно при разгруженной черновой группе и малых обжатиях?

23. Как рубить передний конец перед чистовой группой при такой толщине около 100 мм? Есть ли такое оборудование? Как привязать при такой скорости прокатки голову рулона к барабану моталки? В экономическом эффекте не учтено, что необходимо поменять состав оборудования?

24. В 2007 году в Японии компанией JFE уже была разработана технология производства высокопрочного проката NANOHITEN, которая при минимальном легировании титаном и молибденом обеспечивает указанный вами уровень свойств. Как вы это прокомментируете?

25. В металлопрокате необходимо получать различные характеристики, а именно: предел выносливости при симметричном цикле, предел выносливости на образцах с центральным круглым отверстием, отношение предела текучести к пределу прочности, твердость, коэффициент раздачи отверстия. А будут ли после прокатки по вашему способу получены такие характеристики?

26. Вопрос по странице 240, таблица 6.1. Зачем вы опубликовали эти результаты?

27. Как осуществлять процесс захвата при первоначальном контакте валка и полосы при ваших способах асимметричной прокатки в промышленных условиях?

28. Вопрос по 36-му слайду. Вы рассматриваете процесс прокатки в чистовой группе широкополосного стана и указываете, что эффект будет получен, если вести прокатку со скоростью от 20 до 25 м/с. По условиям оборудования отводящего рольганга широкополосного стана горячей прокатки, какова максимальная скорость движения переднего конца полосы?

29. Вы показываете гигантскую экономию за счет того, что исключаете применение микролегирующих элементов в сталях типа SMC. Определялись ли расходы на изменение состава и параметров оборудования для того, чтобы реализовать предложенные вами способы в промышленных условиях? Экономический эффект учитывает затраты только на исключение элементов или он рассчитан с учетом затрат на осуществление этого способа?

Соискатель Пустовойтов Д.О. ответил на задаваемые в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию.

Система углерод-марганец – это один из вариантов недорогой стали класса прочности S355MC, из которой можно получать более дорогие, более высокие классы прочности от S420MC до S700MC без изменения химического состава. Если стоит задача получения более прочной стали (с пределом текучести более 700 МПа) или стали со специфическими свойствами, например, с повышенной коррозионной стойкостью, то для этого требуется более сложный химический состав. Для решения такой задачи также может применяться метод листовой прокатки со скоростной асимметрией. Есть две величины удлинения: равномерное удлинение и полное удлинение. Равномерное удлинение характеризует начало потери устойчивости материала. Поэтому с физической точки зрения пластичность необходимо оценивать по величине именно равномерного удлинения. При листовой прокатке со скоростной асимметрией достигается механизм ротационной пластичности. Для измельчения зерна угол сдвига в приведенной модели зависит от параметра l_d/h_{cp} – параметра формы очага деформации по высоте. Наилучшие результаты, касающиеся микроструктуры, были получены для соотношения $l_d/h_{cp} \geq 5$. Также установлено, что при соотношении $l_d/h_{cp} = 5...6$ возможны условия, которые обеспечивают прямолинейное движение полосы на выходе из очага. То есть данные режимы соответствуют режимам измельчения зерна. Возможны два варианта: частичная и полная динамическая рекристаллизация. При частичной динамической рекристаллизации формируется разнотернистая структура, состоящая из крупных и мелких зерен. Поэтому с точки зрения режимов деформации предпочтительно либо вообще не входить в область

динамической рекристаллизации (то есть деформировать при значениях ниже критических, чтобы структура была однородной, при условии, что она была однородной на входе), либо же за счет скоростной асимметрии уйти в область динамической рекристаллизации, то есть деформировать так сильно, чтобы обеспечить условия полной динамической рекристаллизации. Исследование микроструктуры проводили в трёх точках по толщине по направлению прокатки: верх, центр и низ. Размер зерна характеризовался гистограммами распределения зёрен, в данном случае – по площадям. Также представлены гистограммы распределения разориентировок границ зёрен. Доля высокоугловых границ в центре образца составила 88%. Малоугловые границы зёрен характеризуют субзёрна; в какой-то степени они являются индикатором дислокационного упрочнения. EBSD-анализ проводили с целью отличить зёрна от субзёрен. Заданное понижение температуры металла в очаге деформации достигалось за счёт геометрии очага деформации, характеризующей площадь контакта деформируемой полосы с поверхностью рабочих валков, и замедления скорости прокатки до 0,1 м/с. Специализированные устройства для понижения температуры металла в очаге деформации не применялись. Полученная в данной работе зависимость предела текучести от среднего диаметра ферритного зерна, согласно соотношению Холла-Петча с коэффициентом детерминации 0,98, подтверждает, что преобладающим является механизм упрочнения за счёт измельчения зерна, а не дислокационный, дисперсионный или твердорастворный. При симметричной листовой прокатке независимо от условий контактного трения сдвиговая деформация создаётся только в приповерхностных слоях и не проникает в центр. В условиях применения скоростной асимметрии при листовой прокатке меняются кинематические характеристики очага деформации, а именно – скорости течения металла по верхней и нижней поверхностям, в результате чего создаётся сдвиг, позволяющий воздействовать именно на центральные слои и прорабатывать всё сечение. При фазовом превращении происходят две трансформации. Аустенит превращается в феррит (матрицу), а остаточный аустенит – в одну из следующих фаз: перлит, бейнит или мартенсит. Режимом асимметрии при динамическом ферритном превращении мы воздействуем именно на ферритную фазу, то есть на матрицу. Таким образом, мы измельчаем зёрна феррита. А последеформационное охлаждение на воздухе или водой определяет тип второй фазы (перлит, бейнит или мартенсит). Оценка микроструктуры проводилась с помощью автоматического анализатора изображений Thixomet методом подсчета количества зерен n на единицу площади (1 мм^2) с определением среднего диаметра зерна как единицы, делённой на корень из n . На величину износа рабочих валков влияют три ключевых фактора: контактные нормальные напряжения, удельные силы контактного трения и относительное

скольжение на контакте. При листовой прокатке со скоростной асимметрией и контактные нормальные напряжения, и удельные силы контактного трения в зонах опережения, и относительное скольжение снижаются. То есть применение скоростной асимметрии не способствует увеличению износа. Основные нормативные документы, на которые мы ориентировались, – это EN 10149-2 и EN 10338. Требований к твёрдости в этих стандартах нет. Дополнительные требования должны оговариваться в стандартах при согласовании с потребителем. Базовый химический состав стали содержал 0,09% углерода и 1,6% марганца. При использовании листовой прокатки со скоростной асимметрией для повышения класса прочности от S355MC до S700MC базовый химический состав стали не менялся, т.е. легирующие элементы, такие как Nb, Mo и другие, не добавлялись. Испытания на холодный изгиб не проводились в рамках данной работы. Представленная работа касается рекомендаций только для тех клетей чистовой группы, где необходимо применение скоростной асимметрии. Рекомендация заключается в применении асимметрии исключительно в трёх последних клетях чистовой группы, при этом общее количество клетей обычно находится в диапазоне от 5 до 7. Вопрос изменения уширения в работе не рассматривался. Три последние клетки со скоростной асимметрией в чистовой группе могут быть реализованы на многих прокатных станах в мире. Это могут быть как существующие, так и новые, разрабатываемые станы. Существуют литейно-прокатные агрегаты, а также полностью непрерывные станы бесконечной прокатки. Если используется технология бесконечной прокатки, то проблемы рубки переднего конца полосы и захвата полосы моталками решаются. В экономическом эффекте изменение состава оборудования не учитывалось. Японская сталь NANOHITEN содержит дорогостоящие молибден и титан. В нашей стали для достижения того же уровня свойств мы не используем молибден и титан, а, наоборот, исключаем эти элементы. Испытания на расширение (раздачу) отверстия в рамках данной работы пока не проводились. Последовательность работ была следующей: сначала была создана уникальная научная установка – стан асимметричной прокатки. Далее на этом оборудовании были проведены эксперименты, разработаны технологические режимы асимметрии, сформулированы условия, при которых достигается необходимый эффект. Таким образом, была создана представленная технология. Результаты опубликованы в открытой печати. Захват можно обеспечивать и в режиме симметрии, и в режиме асимметрии. Ключевое, чего нельзя допускать, – это соприкосновения рабочих валков, если они вращаются с разными скоростями за счет индивидуального привода. Скорость прокатки 20-25 м/с не является первичной. Она определяет время паузы между клетями, а именно допустимую долю статически рекристаллизованных зёрен аустенита, которая предпочтительно должна

составлять не более 5%. Решить проблему высокой скорости движения переднего конца полосы можно, если изменить критерий, например, увеличив допустимую долю статически рекристаллизованных зёрен аустенита с 5% до 10%. В этом случае максимальная скорость может быть существенно снижена: с 20-25 м/с для паузы в 1 секунду до 10-12,5 м/с для паузы в 2 секунды. Близкая к этой схема реализована в Японии на заводе Nakayama Steel, где применяется аналогичный подход. Поэтому всё зависит от конкретных условий. Представленный в работе расчетный экономический эффект учитывает только экономию легирующих добавок.

На заседании 14.04.2026 г. диссертационный совет принял решение за решение научной проблемы, заключающейся в теоретическом и технологическом обосновании разработанных с использованием специально созданной уникальной научной установки новых принципов применения листовой прокатки со скоростной асимметрией вращения рабочих валков для повышения прочности (до 2 раз) низкоуглеродистых С-Mn сталей при сохранении их пластичности без использования дополнительных легирующих элементов и отдельных операций термической обработки за счет формирования сверхмелкого зерна феррита (до 1 мкм) в условиях реализации специально созданных схем напряженно-деформированного состояния, обеспечивающих совмещение в очаге деформации процессов сжатия, сдвига и структурно-фазовых превращений, что имеет важное хозяйственное значение для металлургических предприятий, специализирующихся на производстве листового проката, и вносит существенный вклад в развитие экономики Российской Федерации, присудить Пустовойтову Д.О. учёную степень доктора технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 7 докторов наук по научной специальности 2.6.4. Обработка металлов давлением, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, проголосовали: за 17, против 1, недействительных бюллетеней 0.

Председатель
диссертационного совета

Колокольцев Валерий Михайлович

Ученый секретарь
диссертационного совета

Мезин Игорь Юрьевич

14.04.2026 г.