

На правах рукописи



Пустовойтов Денис Олегович

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
ПРИМЕНЕНИЯ СКОРОСТНОЙ АСИММЕТРИИ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ЛИСТОВОГО ПРОКАТА**

Специальность 2.6.4. Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Магнитогорск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Научный консультант: **Песин Александр Моисеевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Бельский Сергей Михайлович**
доктор технических наук, профессор
кафедры «Обработка металлов давлением»
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный
технический университет» (г. Липецк)

Галкин Сергей Павлович
доктор технических наук, профессор
кафедры «Обработка металлов давлением»
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСИС»
(г. Москва)

Колбасников Николай Георгиевич
доктор технических наук, профессор
Высшей школы физики и технологий материалов
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого»
(г. Санкт-Петербург)

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (г. Челябинск)

Защита состоится 14 апреля 2026 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.324.01 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 <https://magtu.ru>.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.324.01,
д.т.н., профессор



Мезин Игорь Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Листовой прокат из низкоуглеродистых ($C \leq 0,25\%$) сталей с ферритной матрицей (ферритно-перлитные, ферритно-бейнитные, ферритно-мартенситные) является одним из основных видов продукции черной металлургии и выпускается в объеме десятков миллионов тонн ежегодно. Существующие технологии производства листового проката высоких классов прочности, например, S420MC, S460MC, S500MC, S550MC, S600MC, S650MC, S700MC в соответствии с EN 10149-2, или HDT580F, HDT580X, HDT760C в соответствии с EN 10338 основаны на введении в простой (базовый) химический состав C-Mn дополнительных легирующих (Nb, Mo и др.) элементов и применения различных процессов термомеханической и/или термической обработки. Однако высокая стоимость ферросплавов (например, средние цены за 2025 г.: 43096 \$/т – ферроний, 39763 \$/т – ферромolibден и т.д.) существенно увеличивает затраты на производство листового проката высоких классов прочности. При этом ниобий, молибден и др. входят в перечень дефицитных видов твердых полезных ископаемых (распоряжение Правительства РФ от 16.04.2024 №939-р). Кроме того, ниобий, являясь ключевым микролегирующим элементом существующих технологий термомеханической прокатки, относится к критическому минеральному сырью в РФ, потребление которого обеспечивается за счет импорта (на 98%) в условиях значительных рисков поставок. В этой связи, требуется разработка новых ресурсосберегающих технологий производства листового проката высоких классов прочности без использования или при уменьшенном содержании легирующих элементов. При этом, однако, возникает существенное противоречие в науке и практике прокатного производства, связанное с тем, что повышение класса прочности (при сохранении пластичности) листового проката без использования легирования невозможно на основе существующих технических и технологических решений.

В соответствии с известным соотношением Холла-Петча при уменьшении ферритного зерна с 10-5 мкм до 4-1 мкм (13-17 балл) возможно двукратное приращение конструкционной прочности стали без изменения ее химического состава. Однако технологии, применяемые на отечественных металлургических предприятиях, ограничены возможностями получения листового проката с наименьшим диаметром ферритного зерна исключительно в диапазоне от 10 мкм до 5 мкм (10-12 балл зерна по ASTM E1382, E112, ГОСТ 5639). Новые технологические решения могут быть основаны на использовании нестандартного метода обработки металлов давлением – листовой прокатки со скоростной асимметрией. В основу метода положен принцип деформации листов в рабочих валах, вращающихся с различными скоростями. Известно большое количество теоретических и экспериментальных работ, посвященных различным процессам листовой прокатки со скоростной асимметрией. Однако результаты известных исследований не дают целостного представления о взаимосвязи характеристик напряженно-деформированного состояния металла с получаемой структурой и механическими свойствами, что ограничивает возможности практического применения этого метода.

Диссертационная работа направлена на решение актуальной проблемы создания новых принципов применения скоростной асимметрии для повышения (до 2 раз) прочности листового проката при сохранении его пластичности без использования легирующих элементов и отдельных операций термической обработки. Решение указанной проблемы имеет важное научное и прикладное значение и является актуальным направлением исследований.

Степень разработанности темы исследования.

Основополагающий вклад в развитие теории процессов листовой прокатки со скоростной асимметрией с использованием метода равновесия сил в период 1930-1960 гг. внесли первые работы отечественных и зарубежных ученых: Головин А.Ф., Целиков А.И., Разуваев Д.С., Чекмарев А.П., Королев А.А., Siebel E., Sachs G., Klingler L.J., Kennedy G.E. и др. Значительный вклад в дальнейшее развитие теории с использованием нового энергетического метода в период 1960-1988 гг. внес Выдрин В.Н., а также представители его научной школы: Агеев Л.М., Судаков Н.В., Крайнов В.И., Пелленен А.П. и др. В период 1989-2003 гг. с использованием методов конечных разностей и конечных элементов теория процессов получила новый импульс развития в работах Песина А.М. и Салганика В.М. Впервые были определены геометрические граничные условия, учитывающие поворот входного и выходного сечений асимметричного очага деформации. Бельский С.М. (2009 г.) в своих работах расширил представления о возможностях управления плоскостностью листов при описании асимметричного очага деформации с учетом поперечного течения металла. В разные годы значительный вклад в развитие теории процессов листовой прокатки с одним холостым валком, с неподвижным валком (процесс ДНПВ), в валках разного диаметра, в эксцентричных валках, конических валках, с различными условиями трения и др. внесли Holbrook R., Johnson W., Collins I., Duja H., Kawalek A., Philipp M., Потапкин В.Ф., Федоринов В.А., Са-тонин А.В., Морозов И.А., Доброносов Ю.К., Шпак В.И., Сеницын В.Г., Николаев В.А., Скороходов В.Н., Мухин Ю.А., Полухин В.П., Пименов А.Ф., Трайно А.И., Ефремов Н.И., Химич Г.Л., Бровман М.Я., Горелик В.С., Смирнов В.В., Грудев А.П., Выдрин А.В., Черняховский М.Б., Дригун Э.М., Чикишев Д.Н., Федоров Н.Н., Перетьяко В.Н., Максимов Е.А., Азбанбаев Э.М., Мазур И.П., Горбунов К.С., Кожевников А.В. и др.

До 1998 г. теория процессов листовой прокатки со скоростной асимметрией развивалась с позиций улучшения геометрии листов, а также повышения производительности прокатных станов. Начиная с 1998 г. и в настоящее время развивается второе направление – с позиций улучшения структуры и механических свойств различных металлов и сплавов. Значительный вклад в этом направлении внесли зарубежные ученые: Choi C.-H., Cui Q., Otori K., Kim W.J., Park J.-J., Ko Y.G., Loorentz, Yu H., Lee K.M., Namad K. и др. Первенство в области промышленной реализации технологий листовой прокатки со скоростной асимметрией принадлежит японским ученым R. Kurahashi, K. Nakomori, I. Chikushi, T. Morimoto, J. Yanagimoto и др. С 2001 г. японская металлургическая компания «Nakayama Steel Works» осуществляет промышленное производство листового горячекатаного проката под брендом NFG («Nakayama Fine Grain») с применением технологии, основанной на создании скоростной асимметрии за счет использования приводного и не приводного (холостого) рабочих валков разного диаметра.

Тем не менее, результаты известных исследований не дают целостного представления о напряженно-деформированном состоянии металла, а также температурных, скоростных и энергосиловых параметрах процесса листовой прокатки со скоростной асимметрией во взаимосвязи с получаемой структурой и механическими свойствами. При этом исследования отечественных ученых в этом направлении практически полностью отсутствуют. Поэтому теория процессов листовой прокатки со скоростной асимметрией требует дальнейшего развития и систематизированного обобщения. Это позволит преодолеть научные и технические ограничения, сдерживающие более широкое применение этой технологии в мировой и отечественной практике листопркатного производства.

Объект исследования – процесс листовой прокатки со скоростной асимметрией, характеризующейся соотношением скоростей валков v_1/v_2 .

Предмет исследования – напряженно-деформированное состояние металла, а также температурные, скоростные и энергосиловые параметры процесса листовой прокатки со скоростной асимметрией во взаимосвязи с получаемой структурой и механическими свойствами.

Целью является разработка новых технологических решений применения скоростной асимметрии для повышения прочности листового проката при сохранении его пластичности без использования легирующих элементов и отдельных операций термической обработки.

Основные задачи:

1. Исследование влияния скоростной асимметрии на деформированное состояние металла при листовой прокатке.
2. Создание лабораторного оборудования для экспериментальной реализации процесса листовой прокатки со скоростной асимметрией.
3. Исследование влияния скоростной асимметрии на напряженное состояние металла в очаге деформации и энергосиловые параметры (усилие, момент, мощность) процесса листовой прокатки.
4. Исследование влияния скоростной асимметрии на структуру и механические свойства листового проката.
5. Разработка новых технологических решений применения скоростной асимметрии, обеспечивающей повышение прочности листового проката при сохранении его пластичности без использования легирующих элементов (Nb, Mo и др.) и отдельных операций термической обработки.

Методы исследований. Теоретические исследования базируются на уравнениях и законах теории пластичности и теории обработки металлов давлением. Компьютерное моделирование процессов листовой прокатки со скоростной асимметрией выполнено методом конечных элементов с применением специализированной инженерной программы QForm (лицензия №R0-U2497-170719U197). Экспериментальные исследования базируются на методах физического моделирования термомеханических процессов обработки металлов давлением и дилатометрического анализа с применением симулятора Gleeble; методах термического анализа; методах металлографического анализа; методах 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».

Личный вклад автора заключается 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 структурой и механическими свойствами; в разработке технического задания на изготовление оборудования 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.

Научная новизна работы:

1. Разработана модель оценки деформированного состояния металла при листовой прокатке со скоростной асимметрией, отличающаяся учетом влияния средних горизонтальных скоростей течения металла v_{M1}^{cp} и v_{M2}^{cp} на контакте с валками, вращающимися с различными скоростями v_1 и v_2 , а также учетом геометрических характеристик очага деформации.

2. Впервые установлено предельное кинематическое соотношение $\frac{v_{M1}^{cp}}{v_{M2}^{cp}} \leq \frac{3}{2}$ для средних горизонтальных скоростей течения металла v_{M1}^{cp} и v_{M2}^{cp} в очаге деформации на контакте с валками, вращающимися с различными скоростями v_1 и v_2 , а также предельное значение угла сдвига φ_{max} , являющегося функцией параметра формы очага деформации по высоте.

3. Впервые установлено, что при листовой прокатке со скоростной асимметрией увеличение деформации, а также снижение усилия прокатки достигают экстремумов при минимальной (положительной) величине опережения металла относительно вала, вращающегося с большей скоростью.

4. Уточнены закономерности влияния скоростной асимметрии на распределение моментов и мощности между приводными рабочими валками, позволяющие определить два оптимальных кинематических условия: для максимума сдвиговой деформации, когда разница относительных моментов максимальна ($M_{отн1} - M_{отн2} = max$), и для минимума энергии, затрачиваемой на прокатку, когда момент на приводном валке, вращающемся с меньшей скоростью, равен нулю ($M_{отн2} = 0$).

5. Предложена уточненная модель контактного трения Леванова, отличающаяся учетом влияния относительной скорости скольжения металла в очаге деформации на величину удельных сил трения при листовой прокатке со скоростной асимметрией.

6. Определены геометрические и температурно-скоростные условия многопроходной листовой горячей прокатки со скоростной асимметрией, отличающиеся тем, что накопленная деформация ε за три прохода составляет не менее 3 единиц, что обеспечивает полное прохождение динамической рекристаллизации и повышение прочности низкоуглеродистых С-Мн сталей при сохранении пластичности.

7. Определены геометрические и кинематические условия однопроходной листовой горячей прокатки со скоростной асимметрией, отличающиеся тем, что в очаге одновременно с созданием деформации $\varepsilon > 1$ осуществляется понижение температуры металла от точки начала ферритного превращения $Ag3$ (на входе в очаг) до точки конца ферритного превращения $T_{A \rightarrow \Phi}^k$ (на выходе из очага), что обеспечивает динамическое формирование мелкозернистой структуры по всей толщине листа и повышение прочности низкоуглеродистых С-Мн сталей при сохранении пластичности.

Достоверность результатов обеспечивается:

– применением специализированной конечно-элементной инженерной программы QForm, базирующейся на системе уравнений, включающей уравнения равновесия, уравнения связи между полем скоростей материальных точек и скоростей деформаций, уравнения связи между напряженным и деформированным состоянием, условие несжимаемости, кинематические и силовые граничные условия, критерий пластичности, реологические модели материалов, уравнения энергетического баланса;

– применением симулятора Gleeble для физического моделирования термомеханических процессов и дилатометрического анализа;

– соответствием теоретических закономерностей результатам экспериментов, полученных с применением уникальной научной установки «Экспериментальный реверсивный стан дуо листовой прокатки с индивидуальным приводом рабочих валков»;

– согласованностью теоретических и экспериментальных результатов исследований, полученных различными методами, а также отсутствием противоречий результатов работы известным теоретическим и технологическим закономерностям процессов обработки металлов давлением.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Для экспериментальной реализации процесса листовой прокатки со скоростной асимметрией 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.

2. Разработана технологическая схема листовой прокатки со скоростной асимметрией с эффектом снижения на 10-15% расхода электрической энергии главных приводов в сравнении с традиционной (симметричной) листовой прокаткой. Технологическая схема может применяться как для условий холодной листовой прокатки, так и для условий горячей листовой прокатки.

3. Разработаны технологические схемы многопроходной и однопроходной листовой прокатки со скоростной асимметрией, предназначенные для производства горячекатаных полос толщиной от 1 до 10 мм из высокопрочных низкоуглеродистых С-Мн сталей с ферритной матрицей со средним диаметром зерна феррита в диапазоне от 4 мкм до 1 мкм без использования легирующих элементов и отдельных операций термической обработки.

4. Теоретически и экспериментально обоснован новый технологический параметр процесса горячей листовой прокатки, обеспечивающий повышение класса прочности низкоуглеродистых С-Мн сталей без изменения их химического состава и применения отдельных операций термической обработки. Применение скоростной асимметрии при листовой прокатке позволяет из одной марки 0,09С-1,6Мн получить 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 с расчетным экономическим эффектом на 1 тонну г/к 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\$=85Р).

5. Разработаны способы листовой прокатки со скоростной асимметрией, техническая новизна которых подтверждена 8 патентами на изобретения РФ №2848699, №2833651, №2821127, № 2829244, №2795066, №2701322, №2486974, №2622196.

6. Результаты работы используются в научной лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева», что подтверждено технологическим регламентом, а также используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» при подготовке обучающихся по направлению 22.03.02 Металлургия (уровень бакалавриата), при подготовке обучающихся по направлению 22.04.02 Металлургия (уровень магистратуры), при подготовке кадров высшей квалификации по направлению 2.6.4 Обработка металлов давлением, что подтверждено актом.

Положения, выносимые на защиту:

1. Качественные и количественные закономерности влияния скоростной асимметрии на деформированное состояние металла и кинематические характеристики очага деформации при листовой прокатке.
2. Качественные и количественные закономерности влияния скоростной асимметрии на напряженное состояние металла, а также усилие и распределение моментов и мощности между рабочими валками при листовой прокатке.
3. Качественные и количественные закономерности влияния деформационных и температурно-скоростных режимов листовой прокатки со скоростной асимметрией на структуру и механические свойства низкоуглеродистых С-Мн сталей с ферритной матрицей.
4. Разработанная технологическая схема листовой прокатки со скоростной асимметрией с эффектом снижения на 10-15% расхода электрической энергии главных приводов.
5. Разработанная технологическая схема многопроходной листовой прокатки со скоростной асимметрией, обеспечивающая повышение прочности низкоуглеродистых С-Мн сталей с ферритной матрицей за счет полного прохождения динамической рекристаллизации и формирования мелкозернистой структуры.
6. Разработанная технологическая схема однопроходной листовой прокатки со скоростной асимметрией, обеспечивающая повышение прочности низкоуглеродистых С-Мн сталей с ферритной матрицей за счет полного прохождения динамического ферритного превращения и формирования мелкозернистой структуры.
7. Концепция, согласно которой применение скоростной асимметрии открывает технологические возможности производства листового горячекатаного проката различных классов прочности из низкоуглеродистых С-Мн сталей с ферритной матрицей единого химического состава без использования легирующих элементов (Nb, Mo и др.) и отдельных операций термической обработки.

Апробация работы: основные результаты и положения диссертации доклады-вались и обсуждались на международных конференциях: Metal Forming 2014 (г. Палермо, Италия), ICTP 2014 (г. Нагоя, Япония), ICSMR 2015 (г. Стамбул, Турция), NUMIFORM 2016 (г. Труа, Франция), Metal Forming 2016, 2020 (г. Краков, Польша), ICTP 2017 (г. Кембридж, Великобритания), ICSAM 2018 (г. Санкт-Петербург, Россия), BAOSTEEL VAC 2018 (г. Шанхай, Китай), ICLMM 2018 (г. Чанша, Китай), ICFMM 2019 (г. Осака, Япония), ESAFORM 2019 (г. Витория-Гастейс, Испания), Near Net Shape Processes – The Smart Manufacturing Approach 2020 (г. Джабалпур, Индия), Моделирование процессов штамповки, прокатки и прессования в QForm 2021 (г. Москва), ICSAM 2023 (г. Барселона, Испания), XIV Международном конгрессе прокатчиков 2024 (г. Череповец) и других конференциях. Материалы диссертационного исследования были представлены 07.10.2025 на кафедре обработки металлов давлением в НИТУ МИСИС (г. Москва).

Исследования проводились автором в качестве руководителя или исполнителя в рамках выполнения работ по грантам: ФЦП Минобрнауки РФ (№14.В37.21.0936, 2012-2013 гг.); РФФИ (№14-08-31143, 2014-2015 гг.); РФФИ (№15-19-10030, 2015-2019 гг.); Президентского гранта (№14.Z56.18.1699-МК, 2018-2019 гг.); Меггранта по Постановлению №220 Правительства РФ (№075-15-2019-869, 2018-2022 гг.); международного гранта РФФИ (№22-49-02041, 2022-2024 гг.), гранта РФФИ (№23-79-30015, 2023-2025 гг.) по мероприятию «Проведение исследований научными лабораториями

мирового уровня в рамках реализации приоритетов научно-технологического развития РФ», гранта РНФ (№25-79-31018, 2025 г.) в рамках приоритетного направления деятельности РНФ «Поддержка проведения научных исследований и развития научных коллективов, занимающих лидирующие позиции в определенных областях науки».

Публикации. Основные положения диссертации отражены в 50 научных публикациях, из них 16 – в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, 12 – в изданиях, входящих в наукометрические базы данных «Scopus» и/или «Web of Science», 9 – в других изданиях, 5 монографий и 8 патентов на изобретения РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, изложена на 294 страницах машинописного текста, включающего 190 рисунков, 46 таблиц, список литературы из 307 наименований, 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность научной проблемы. Сформулированы объект, предмет исследования, цель и основные задачи. Представлены методы исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Приведены основные положения, выносимые на защиту. Изложена информация о степени достоверности работы, личном вкладе автора и апробации результатов исследований.

В первой главе проведен анализ современных и перспективных технологий производства листового проката из сталей различных классов прочности. Сделан вывод, что в настоящее время для изготовления листового проката высоких классов прочности безальтернативной считается технология термомеханической прокатки, основанная на применении микролегирования стали Nb, V, Ti. При этом также используются легирующие добавки Mo, Cr, Ni, Cu. По результатам сравнительного анализа различных механизмов упрочнения (твердорастворное, дисперсионное, дислокационное, зернограничное) сделан вывод, что формирование мелкозернистой структуры является единственным способом упрочнения, позволяющим в соответствии с соотношением Холла-Петча повысить (до 2 раз) предел текучести низкоуглеродистых C-Mn сталей без использования дополнительного легирования или отдельных операций термической обработки. По результатам сравнительного анализа различных механизмов измельчения зерна сделан вывод, что формирование структуры с размером аустенитного и/или ферритного зерна менее 5 мкм при горячей листовой прокатке возможно за счет динамической рекристаллизации или динамического ферритного превращения, т.е. когда зарождение и рост новых зерен происходят во время деформации, а не после ее завершения. Однако для этого требуется особое деформированное состояние металла – большие истинные деформации ($\epsilon > 1$). При этом возможности создания больших деформаций на существующих прокатных станах ограничены силовыми параметрами процесса, превышающими допустимые значения.

Анализ известных способов обработки показал, что требуемое деформированное состояние металла может быть получено на основе использования нестандартного метода – листовой прокатки со скоростной асимметрией. Обзор научно-технической литературы показал, что результаты известных теоретических и экспериментальных исследований не дают целостного представления о напряженно-деформированном состоянии металла, а также температурных, скоростных и энергосиловых параметрах процесса листовой прокатки со скоростной асимметрией во взаимосвязи с получаемой структурой и механическими свойствами. Исходя из этого сформулированы цель и основные задачи исследований.

Во второй главе представлены результаты исследования напряженно-деформированного состояния металла при листовой прокатке со скоростной асимметрией.

Традиционная (симметричная) листовая прокатка основана на реализации схемы плоской деформации сжатия (рис. 1, а), поэтому деформация ε определяется по известной формуле $\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{h_0}{h_1}$ и зависит только от начальной h_0 и конечной h_1 толщины заготовки. Процессу листовой прокатки со скоростной асимметрией соответствует схема плоской деформации, сочетающей сжатие и сдвиг (рис. 1, б). Деформацию ε определяли интегрированием интенсивности приращений пластических деформаций $\overline{d\varepsilon}$ вдоль пути s деформирования в соответствии с подходом Одквиста: $\varepsilon = \int_0^s \overline{d\varepsilon}$, где

$\overline{d\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} d\varepsilon_{ij} d\varepsilon_{ij} + d\varepsilon_{ij}^2}$ – компоненты тензора приращений пластических деформаций.

В результате решения задачи для условий плоской деформации, сочетающей сжатие и сдвиг, получена аналитическая формула для расчета деформации ε при листовой прокатке со скоростной асимметрией, учитывающая влияние коэффициента обжатия h_0/h_1 и угла сдвига φ :

$$\overline{d\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{dh}{h}\right)^2 + \left(\frac{d\varphi}{2 \cos^2 \varphi}\right)^2} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\ln \frac{h_0}{h_1}\right)^2 + \left(\frac{tg\varphi}{2}\right)^2} \quad (2)$$

Аналогичный результат в виде формулы (2) также был получен с использованием подхода А.А. Ильюшина, согласно которому деформация ε вычислялась интегрированием интенсивности скоростей деформации по времени вдоль траектории движения материальной частицы.

Из полученной формулы (2) следует ключевой практический эффект применения скоростной асимметрии, заключающийся в том, что деформация ε может быть существенно увеличена за счет угла сдвига φ без изменения коэффициента обжатия (при $h_0/h_1 = const$). Например, деформация $\varepsilon = 0,8$, соответствующая относительно обжатию по толщине 50% ($h_0/h_1 = 2$) при симметричной листовой прокатке, может быть увеличена в 2 раза за счет сдвиговой компоненты при листовой прокатке со скоростной асимметрией, т.е. до $\varepsilon = 1,6$ (при $\varphi = 67^\circ$) (рис. 2).

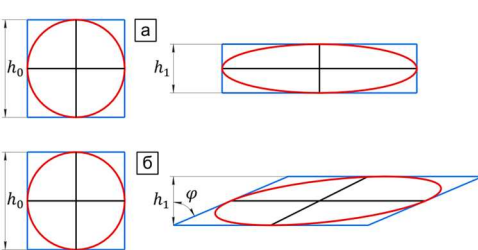


Рис. 1. Схема плоской деформации сжатия при симметричной листовой прокатке (а); схема плоской деформации, сочетающей сжатие и сдвиг, при листовой прокатке со скоростной асимметрией (б)

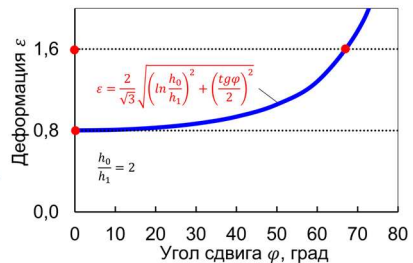


Рис. 2. Влияние угла сдвига φ на деформацию ε при листовой прокатке со скоростной асимметрией с относительным обжатием по толщине 50%

Далее решалась задача по определению угла сдвига φ при листовой прокатке со скоростной асимметрией. Согласно схеме на рис. 3, точка M_1 на контакте с нижним (быстрым) валком движется с большей горизонтальной скоростью v_{M1} , а точка M_2 на контакте с верхним (медленным) валком движется с меньшей горизонтальной скоростью v_{M2} . За одно и то же время t точка M_1 проходит путь $s_0 + s_1$ (причем $s_1 = l_{d1}$), а точка M_2 проходит меньший путь равный s_2 . Величина $\Delta s = s_0 + s_1 - s_2$ представляет собой разницу в пути, пройденном точками M_1 и M_2 за одно и то же время. Угол наклона материального волокна M_1M_2 относительно вертикали определяет угол сдвига φ . С физической точки зрения угол сдвига φ формируется за счет разницы горизонтальных скоростей течения металла v_{M1} и v_{M2} на контакте с валками, вращающимися с различными скоростями v_1 и v_2 . С учетом того, что время $t = \frac{s_0 + s_1}{v_{M1}^{cp}} = \frac{s_2}{v_{M2}^{cp}}$, получена формула для расчета угла сдвига φ :

$$\varphi = \arctg \left(\frac{2}{(h_i + h_1)} \Delta s \right) = \arctg \left[\frac{2}{(h_i + h_1)} (l_{d1} + s_0) \left(1 - \frac{v_{M2}^{cp}}{v_{M1}^{cp}} \right) \right] \quad (3)$$

где l_{d1} – длина очага деформации на контакте с валком, вращающимся с большей скоростью; h_i – высота очага деформации в сечении, соответствующем положению материальной точки M_2 в момент времени выхода точки M_1 из очага деформации; h_1 – толщина листа на выходе из очага деформации; s_0 – внеконтактное перемещение; v_{M1}^{cp} – средняя горизонтальная скорость материальной точки M_1 на контакте с валком, вращающимся с большей скоростью; v_{M2}^{cp} – средняя горизонтальная скорость материальной точки M_2 на контакте с валком, вращающимся с меньшей скоростью.

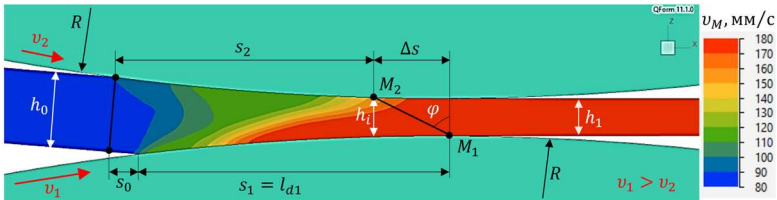


Рис. 3. Поле горизонтальных скоростей течения металла и схема к определению угла сдвига φ

С применением конечно-элементной программы QForm, базирующейся на системе уравнений, включающей уравнения равновесия, уравнения связи между полем скоростей материальных точек и скоростями деформаций, уравнения связи между напряженным и деформированным состоянием, условие несжимаемости, кинематические и силовые граничные условия, критерий пластичности, реологические модели материалов, а также уравнения энергетического баланса, установлено, что, если соотношение скоростей валков v_1 и v_2 является величиной постоянной и может быть любым, т.е. $1 \leq v_1/v_2 < \infty$, то соотношение скоростей течения металла v_{M1} и v_{M2} в очаге деформации является величиной переменной (рис. 4), при этом соотношение средних скоростей течения металла v_{M1}^{cp} и v_{M2}^{cp} в очаге деформации имеет верхний предел:

$$\frac{v_{M1}^{cp}}{v_{M2}^{cp}} \leq \frac{3}{2} \quad (4)$$

В физическом смысле соотношение (4) означает, что при прохождении очага деформации материальная точка M_2 , движущаяся с меньшей скоростью, всегда проходит не менее $2/3$ пути материальной точки M_1 , движущейся с большей скоростью.

Прямое практическое применение формулы (3) для расчета угла сдвига φ при листовой прокатке со скоростной асимметрией вызывает значительные трудности, поскольку содержит неизвестные величины l_d , h_i , v_{M1}^{cp} , v_{M2}^{cp} , s_0 . Однако можно воспользоваться этой формулой для нахождения предельного угла сдвига φ_{max} . Если принять допущения, что $s_0 \cong 0$; $l_d \cong l_d \cong \sqrt{R(h_0 - h_1)}$; $(h_i + h_1)/2 \cong (h_0 + 2h_1)/3 \cong h_{cp}$, а также учитывая, что $v_{M1}^{cp}/v_{M2}^{cp} \leq 3/2$, то формула (3) преобразуется к виду:

$$\varphi_{max} = \arctg\left(\frac{1}{3} \frac{l_d}{h_{cp}}\right) \quad (5)$$

Согласно формуле (5), предельный угол сдвига φ_{max} при листовой прокатке со скоростной асимметрией является функцией параметра формы очага деформации по высоте l_d/h_{cp} (где l_d – длина очага деформации; h_{cp} – средняя толщина) (рис. 5). Отсюда следует важный практический вывод, заключающийся в том, что применение скоростной асимметрии наиболее эффективно для низких очагов деформации. Поэтому листовую прокатку предпочтительно выполнять с большими относительными обжатиями в рабочих валках большого диаметра с большим соотношением скоростей валков.

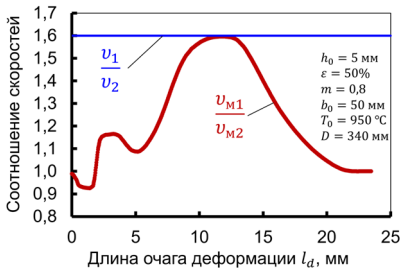


Рис. 4. Соотношение скоростей валков v_1 и v_2 и скоростей течения металла v_{M1} и v_{M2}

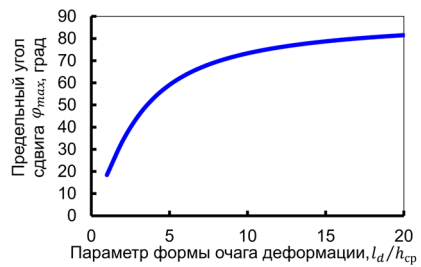


Рис. 5. Предельный угол сдвига φ_{max} при листовой прокатке со скоростной асимметрией

В общем случае, при прокатке скорость частиц деформируемого металла, расположенных на контактной поверхности, может отличаться от скорости валка (скольжение) или может быть равна ей (прилипание). При симметричной прокатке изменение горизонтальной проекции скорости частиц металла v_M по длине очага деформации на контакте как с верхним, так и с нижним валком является идентичным (рис. 6, а). Применение скоростной асимметрии существенно меняет картину (рис. 6, б). Происходит своеобразный «разрыв» скоростей, характеризующийся соотношением $\frac{v_{M1}}{v_{M2}}$.

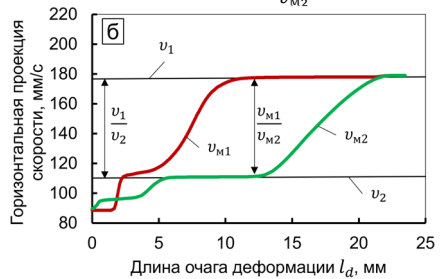
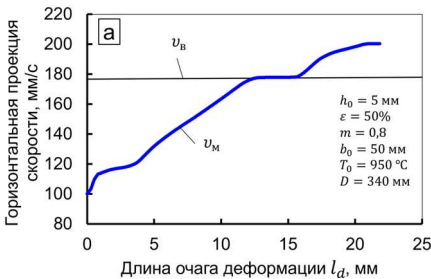


Рис. 6. Соотношение скоростей валков и металла в очаге деформации при симметричной листовой прокатке (а) и листовой прокатке со скоростной асимметрией (б)

Характерной особенностью очага деформации при листовой прокатке со скоростной асимметрией является наличие двух зон прилипания (в виде треугольных областей), существенно более крупных, чем в очаге деформации при симметричной прокатке при прочих равных условиях (рис. 7). Причем верхняя и нижняя зоны прилипания смещены друг относительно друга (рис. 7, б). Границы очага деформации (красная область) на рис. 7 определены по полю скоростей деформации. Наличие двух смещенных зон прилипания в очаге деформации является необходимым условием создания больших сдвиговых деформаций в обрабатываемом материале.

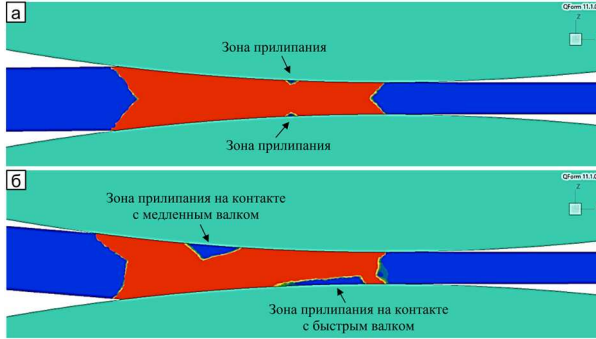


Рис. 7. Очаг деформации при симметричной листовой прокатке (а) и листовой прокатке со скоростной асимметрией (б)

При листовой прокатке со скоростной асимметрией возникает существенный рост скорости деформации при прочих равных условиях (рис. 8).

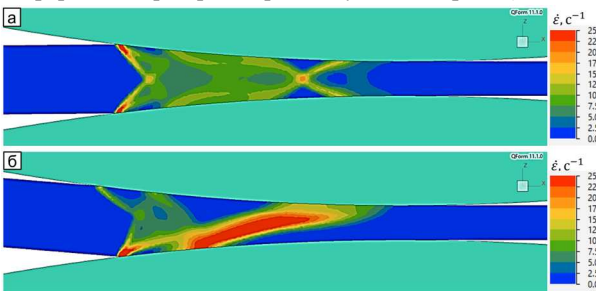


Рис. 8. Поле скоростей деформации при симметричной ($v = 10$ об/мин) (а) и асимметричной ($v_1 = 10$ об/мин, $v_1/v_2 = 1,6$) (б) прокатке с обжатием 50%

На основе конечно-элементного моделирования установлено, что при листовой прокатке с увеличением соотношения скоростей валков v_1/v_2 рост сдвиговой деформации и, соответственно, общей деформации носит нелинейный характер (рис. 9, а), достигая максимального значения при минимальной величине опережения металла относительно валка, вращающегося с большей скоростью (рис. 9, б). Общий характер изменения относительной длины зоны опережения на контакте с рабочими валками представлен на рис. 10. Практическая значимость обнаруженного эффекта заключается в том, что для максимального увеличения деформации при данных условиях листовой прокатки соотношение скоростей валков v_1/v_2 необходимо увеличивать до тех пор, пока опережение не станет минимальным, предпочтительно, около 0,5%.

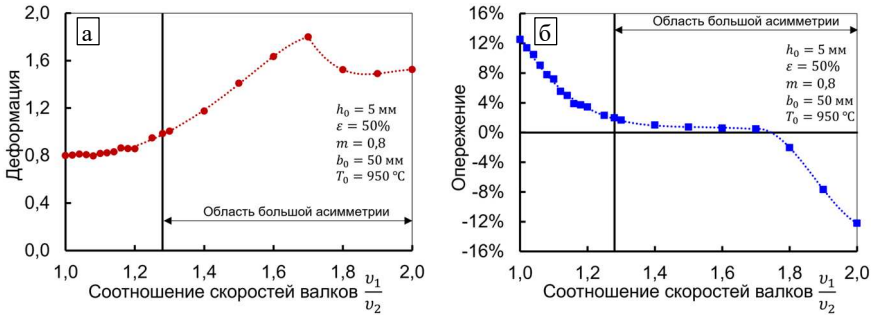


Рис. 9. Влияние соотношения скоростей валков на деформацию в центре листа (а) и величину опережения (относительно быстрого валка) при прокатке со скоростной асимметрией

С увеличением соотношения скоростей валков опережение стремится к нулю и далее принимает отрицательное значение (рис. 9, б). Исчезновение зоны опережения на контакте с валком, вращающимся с большей скоростью, когда критический угол γ_1 становится равным нулю, является условием частичного буксования. Согласно энергетической теории прокатки Выдрина В.Н. физическая сущность этого явления заключается в том, что при $\gamma_1 = 0$ мощность (поступление энергии) на бочке валка, вращающегося с большей скоростью, достигает своего наибольшего возможного значения при данных условиях прокатки. Однако при частичном буксовании первого валка, вращающегося с большей скоростью, процесс листовой прокатки не прекращается, т.к. имеется неиспользованный запас сил трения в зоне опережения на контакте со вторым валком, вращающимся с меньшей скоростью, и критический угол $\gamma_2 > 0$, за счет чего продолжается поступление энергии.

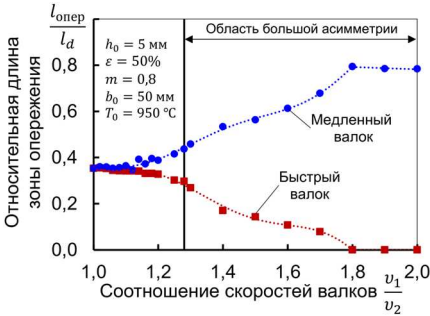


Рис. 10. Относительная длина зоны опережения на контакте с быстрым и медленным валком

Полное буксование и прекращение процесса листовой прокатки со скоростной асимметрией наступят только в том случае, если наряду с буксованием первого валка, вращающегося с большей скоростью, начнется также буксование второго валка, вращающегося с меньшей скоростью. Буксование второго валка наступит при $\gamma_2 = 0$, что и является условием полного буксования. Таким образом, $\gamma_1 = 0$ и $\gamma_2 = 0$ являются предельными условиями листовой прокатки со скоростной асимметрией, определяющими энергетическую возможность осуществления этого процесса прокатки.

Система, состоящая из приводного и неприводного (холостого) рабочих валков, энергетически является слабо устойчивой. В отличие от нее, система, в которой скоростная асимметрия создается за счет разницы частоты вращения двух приводных рабочих валков, обладает не только высокой технологической гибкостью, но и является энергетически более устойчивой. Тем не менее, при листовой прокатке со скоростной асимметрией не следует допускать условия $\gamma_1 = 0$, которое возникает, в частности, когда соотношение скоростей валков v_1/v_2 становится равным или превышает значение коэффициента обжатия h_0/h_1 .

В третьей главе выполнено численное моделирование и экспериментальное исследование энергосиловых параметров процесса листовой прокатки со скоростной асимметрией. Для экспериментальной реализации процесса изготовлен и введен в эксплуатацию в 2021 г. в лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилияева» стан дуо листовой прокатки с индивидуальным приводом рабочих валков, имеющий статус уникальной научной установки (УНУ) (рис. 11). Основные технические характеристики оборудования: максимально допустимое усилие прокатки 2,5 МН (250 тс), максимально допустимые крутящие моменты 2×71000 Н·м. Передача крутящих моментов к рабочим валкам осуществляется от двух независимых асинхронных электродвигателей мощностью 2×75 кВт через редукторы и карданные валы. Номинальная скорость вращения валов электродвигателей 1000 об/мин, номинальное передаточное число трехступенчатого редуктора 100, номинальный диаметр валков 340 мм, длина бочки валков 400 мм. Материал валков – кованая хромистая сталь SKD11 с твердостью бочки 89...96 HSD. Номинальная (максимальная) скорость вращения валков 10 об/мин (0,178 м/с). Регулирование скоростей валков является независимым и осуществляется двумя векторными преобразователями частоты мощностью 2×90 кВт. Стан оснащен гидронажимными устройствами. Измерение усилия прокатки осуществлялось двумя месдозами, расположенными между гидронажимными устройствами и подушками верхнего валка. Измерение скоростей осуществлялось двумя инкрементальными оптическими энкодерами, размещенными на валах асинхронных электродвигателей. Запись параметров осуществляется с шагом 0,01 секунды (10 мс).



Рис. 11. Стан листовой прокатки (УНУ)

где $\tau_{от}$, $\tau_{оп}$ – удельные силы контактного трения в зонах отставания и опережения; γ – нейтральный угол; α_0 – угол захвата; ω – угловая скорость. Нулевое или отрицательное значение $M_{пр}$ и $N_{пр}$, т.е. $\left(\int_{\gamma}^{\alpha_0} \tau_{от} b R d\alpha - \int_0^{\gamma} \tau_{оп} b R d\alpha \right) \leq 0$, соответствовало переходу приводного валка в генераторный режим работы (область большой асимметрии).

Удельные силы контактного трения τ описывали согласно модели Леванова:

$$\tau = mk \left(1 - e^{-1,25 \frac{\sigma_n}{\sigma_s}} \right) \quad (8)$$

где m – показатель трения ($0 < m \leq 1$); $k = \sigma_s / \sqrt{3}$ – предел текучести на сдвиг; σ_n – контактное нормальное напряжение; σ_s – сопротивление металла деформации.

По результатам эксперимента электрическую мощность $N_{дв}$ асинхронного двигателя рассчитывали по формуле (9), а крутящий момент $M_{кр}$, приведенный к бочке рабочего валка, и включающий в себя момент прокатки $M_{пр}$, момент трения $M_{тр}$ и момент холостого хода $M_{хх}$, рассчитывали по формуле (10):

Теоретические момент прокатки $M_{пр}$ и мощность прокатки $N_{пр}$ в условиях плоской деформации без учета упругого сплющивания валка определяли по удельным силам контактного трения τ в соответствии с физической моделью В.Ф. Баюкова:

$$M_{пр} = R \left(\int_{\gamma}^{\alpha_0} \tau_{от} b R d\alpha - \int_0^{\gamma} \tau_{оп} b R d\alpha \right) \quad (6)$$

$$N_{пр} = \omega R \left(\int_{\gamma}^{\alpha_0} \tau_{от} b R d\alpha - \int_0^{\gamma} \tau_{оп} b R d\alpha \right) \quad (7)$$

$$N_{дв} = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi \quad (9)$$

где U_{ϕ} , I_{ϕ} – фазное напряжение и фазный ток асинхронного двигателя; $\cos \varphi$ – косинус угла сдвига фаз напряжения и тока (коэффициент мощности). Нулевое или отрицательное значение коэффициента мощности, т.е. $\cos \varphi \leq 0$, соответствовало переходу приводного вала в генераторный режим работы (область большой асимметрии).

$$M_{кр} = \frac{9,55 N_{дв} \eta_{дв} \eta_{мех} i_{ред}}{n_{дв}} \quad (10)$$

где $n_{дв}$ – скорость вращения вала двигателя, об/мин; $i_{ред}$ – передаточное число редуктора; $\eta_{дв}$ – КПД двигателя; $\eta_{мех}$ – КПД передаточных механизмов.

По результатам теоретических и экспериментальных исследований установлены закономерности влияния соотношения скоростей валков на относительное усилие $P_{отн}$, относительные моменты $M_{отн}$ и относительную суммарную мощность $\Sigma N_{отн}$.

$$P_{отн} = \frac{P_{асим}}{P_{сим}} \quad (11)$$

где $P_{сим}$ и $P_{асим}$ – усилия при симметричной и асимметричной прокатке.

$$M_{отн1} = \frac{M_{быстр}}{M_{сим}}, \quad M_{отн2} = \frac{M_{медл}}{M_{сим}} \quad (12)$$

где $M_{быстр}$ – момент, соответствующий валку, вращающемуся с большей скоростью; $M_{медл}$ – момент, соответствующий валку, вращающемуся с меньшей скоростью; $M_{сим}$ – момент, соответствующий условиям симметричной прокатки.

$$\Sigma N_{отн} = \frac{\left(\int_{\gamma_1}^{\alpha_{01}} \tau_{от1} d\alpha_1 - \int_0^{\gamma_1} \tau_{оп1} d\alpha_1 \right) + \frac{1}{k_v} \left(\int_{\gamma_2}^{\alpha_{02}} \tau_{от2} d\alpha_2 - \int_0^{\gamma_2} \tau_{оп2} d\alpha_2 \right)}{2 \left(\int_{\gamma}^{\alpha_0} \tau_{от} d\alpha - \int_0^{\gamma} \tau_{оп} d\alpha \right)} = \frac{N_{быстр} + N_{медл}}{2N_{сим}} \quad (13)$$

где $k_v = v_1/v_2$; $N_{быстр}$ – мощность, соответствующая валку, вращающемуся с большей скоростью; $N_{медл}$ – мощность, соответствующая валку, вращающемуся с меньшей скоростью; $N_{сим}$ – мощность одного валка при симметричной прокатке.

С увеличением соотношения скоростей v_1/v_2 от 1 до 2 усилие прокатки снижается более чем в 2 раза (рис. 12, а), но момент прокатки на быстром валке возрастает более чем в 3 раза (рис. 12, б). При $v_1/v_2 = 1,28$, когда момент $M_{медл} = 0$ и мощность $N_{медл} = 0$, т.е. при переходе медленного валка в генераторный режим, обеспечивается минимум суммарной мощности прокатки (рис. 12, в). Соотношение $\frac{N_{быстр} + N_{медл}}{2N_{сим}} < 1$, при котором суммарный расход энергии в очаге деформации оказывается меньше по сравнению с симметричной прокаткой, имеет практическое значение, поскольку в этом случае появляется возможность экономии (до 10-15%) расхода электрической энергии.

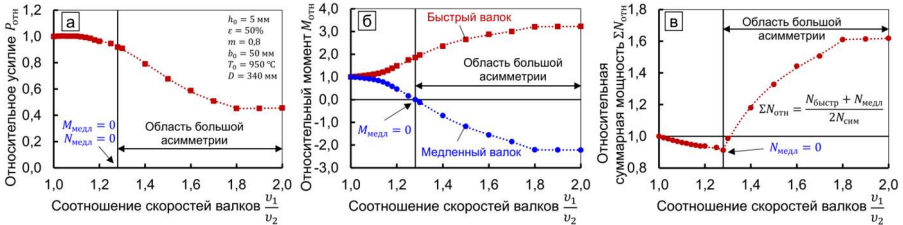


Рис. 12. Теоретические кривые, характеризующие влияние соотношения скоростей валков на относительное усилие (а), относительные моменты (б) и относительную суммарную мощность (в)

Снижение усилия при листовой прокатке со скоростной асимметрией обусловлено «срезом» эпюры контактных нормальных напряжений в зоне сдвига (рис. 13). Увеличение момента на быстром валке обусловлено возрастанием зоны отставания при одновременном уменьшении зоны опережения (рис. 14, а). Снижение момента на медленном валке обусловлено возрастанием зоны опережения при одновременном уменьшении зоны отставания, причем в генераторном режиме работы протяженность зоны опережения превышает протяженность зоны отставания (рис. 14, б). Установлено, что изменение величин $P_{отн}$, $M_{отн1}$, $M_{отн2}$, $\Sigma N_{отн}$ с увеличением соотношения скоростей v_1/v_2 происходит до тех пор, пока на быстром валке сохраняется зона опережения (рис. 9).

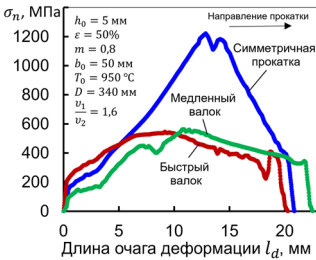


Рис. 13. Контактные нормальные напряжения

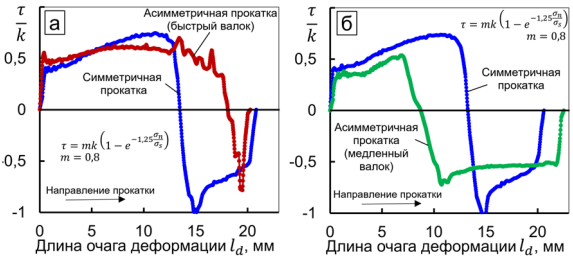


Рис. 14. Удельные силы трения на контакте с быстрым (а) и медленным (б) валком

Эксперименты (рис. 15) подтвердили соответствие общих закономерностей изменения усилия, моментов и мощности при листовой прокатке со скоростной асимметрией результатам моделирования. При моделировании относительное обжатие было постоянным. А в экспериментах не менялся начальный межвалковый зазор, поэтому при уменьшении усилия прокатки наблюдалось одновременное увеличение относительного обжатия из-за снижения упругой деформации клетки (рис. 15, а).

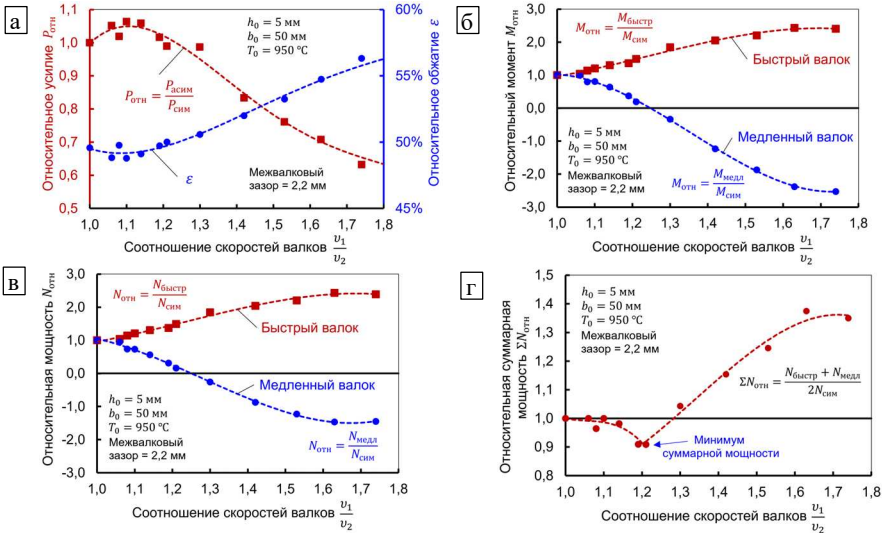


Рис. 15. Экспериментальные кривые, характеризующие влияние соотношения скоростей валков на относительное усилие и обжатие (а), относительные моменты (б) и мощности (в-г)

Отметим, что качественный характер закономерностей, представленных на рис. 15, является общим, как для различных материалов (сталь, алюминий, медь, титан), так и температурных условий листовой прокатки (горячая, холодная).

Экспериментально установлено, что в области большой асимметрии усилие прокатки однозначно снижается. Однако в области малой асимметрии при прокатке без использования смазки усилие может, напротив, возрастать (рис. 16). Причем этот эффект наблюдался при прокатке различных материалов (сталь, алюминий, медь, титан), как в горячем, так и в холодном состоянии (рис. 16).

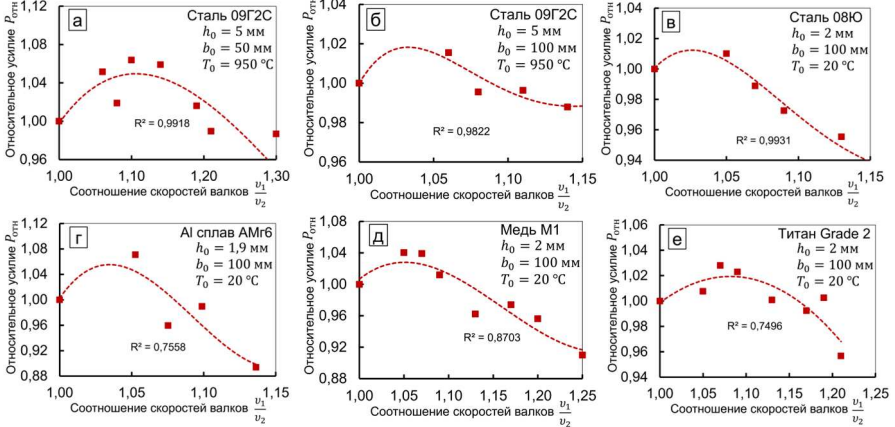


Рис. 16. Влияние малой асимметрии на относительное усилие при прокатке различных материалов без использования смазки: а, б – сталь 09Г2С; в – сталь 08Ю; в – алюминиевый сплав АМГ6; г – чистая медь М1; д – чистый титан Grade 2

Предложена уточненная модель трения Леванова, учитывающая влияние скорости скольжения v_s частиц деформируемого металла относительно контактной поверхности рабочего вала:

$$\tau = m|v_s|^\alpha k \left(1 - e^{-1,25 \frac{\sigma_m}{\sigma_s}}\right) \quad (14)$$

где $\alpha = f\left(\frac{v_1}{v_2}\right)$ – коэффициент, зависящий от соотношения скоростей валков ($v_1 \geq v_2$).

$$\alpha = 0,012 \left(1 - e^{-60\left(\frac{v_1}{v_2} - 1\right)}\right) \quad (15)$$

Уточненная модель трения Леванова (14) позволила объяснить эффект повышения усилия прокатки в области малой асимметрии (рис. 17).

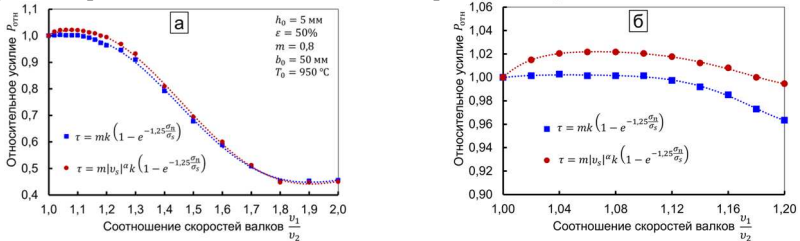


Рис. 17. Относительное усилие прокатки при описании контактного трения по закону Леванова без учета и с учетом влияния скорости прокатки скольжения v_s : а – при $\frac{v_1}{v_2}$ от 1 до 2; б – при $\frac{v_1}{v_2}$ от 1 до 1,2

В четвертой главе выполнено исследование влияния деформационных и температурно-скоростных режимов листовой прокатки со скоростной асимметрией на измельчение зерна по механизму динамической рекристаллизации аустенита.

Для физического моделирования процесса динамической рекристаллизации проводили испытания образцов на кручение с использованием симулятора термомеханических процессов *Gleeble 3800* и модуля *Torsion*. Исследования проводили в лаборатории физического моделирования термомеханических процессов ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)». В отличие от испытаний на сжатие, кручение позволяло создавать в материале большие истинные деформации (до 3 и более единиц). Экспериментальные кривые пластического течения в координатных осях $\sigma - \varepsilon$ на примере низкоуглеродистой С-Мп стали определяли в интервале температур 700-1000 °С и скоростей деформации 0,03-50 с⁻¹. В экспериментах использовали цилиндрические образцы с рабочей зоной длиной $L = 20$ мм и радиусом $R = 5$ мм. В процессе эксперимента измерялся угол скручивания φ и скручивающий момент M , по которым рассчитывались напряжения $\sigma = 3,3 \frac{\sqrt{3}M}{2\pi R^3}$ и деформация $\varepsilon = \frac{R\varphi}{\sqrt{3}L}$.

Для математического описания пластического течения использовалась модель, учитывающая физический механизм деформационного упрочнения, динамического возврата и динамической рекристаллизации. На рис. 18 схематически изображены кривые пластического течения в координатных осях $\sigma - \varepsilon$ для динамического возврата (σ_{drv}) и динамической рекристаллизации (σ_{drx}). Согласно схеме, критическое напряжение σ_c и критическая деформация ε_c соответствовали началу процесса динамической рекристаллизации. Напряжение σ_{ss} и деформация ε_{ss} соответствовали полному завершению процесса динамической рекристаллизации. Напряжения σ_c , σ_p , σ_{ss} , σ_{drvss} определяли методом дифференцирования и построения графиков скоростей разупрочнения в координатных осях $\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} - \sigma$ при динамической рекристаллизации (рис. 19).

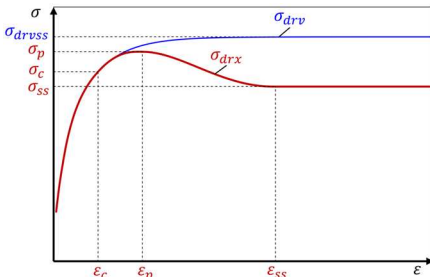


Рис. 18. Схематическое представление кривой пластического течения при динамической рекристаллизации

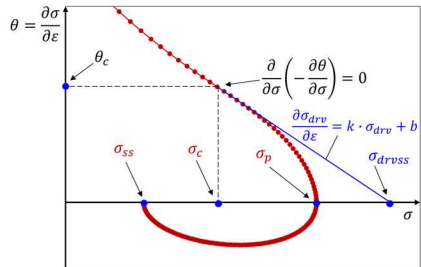


Рис. 19. Схематическое представление скорости разупрочнения при динамической рекристаллизации

Напряжения σ_{drv} , соответствующие процессу динамического возврата, определяли на основе решения дифференциального уравнения:

$$\frac{\partial \sigma_{drv}}{\partial \varepsilon} = k \cdot \sigma_{drv} + b \quad (16)$$

$$\sigma_{drv} = \sigma_{drvss} - (\sigma_{drvss} - \sigma_c) e^{k(\varepsilon - \varepsilon_c)} \quad (17)$$

где $k = -\frac{\theta_c}{\sigma_{drvss} - \sigma_c}$.

По найденным напряжениям σ_c и σ_{ss} на кривых пластического течения определили соответствующие им значения деформаций ε_c и ε_{ss} , характеризующих начало и полное завершение процесса динамической рекристаллизации. В отличие от стандартного подхода, основанного на металлографии, в данной работе для определения доли динамически рекристаллизованных аустенитных зерен X_{DRX} в интервале деформаций от ε_c до ε_{ss} использовали механическую модель *Zahiri–Davies–Hodgson*, в основе которой положен принцип определения доли разупрочнения по напряжениям σ_{drv} , σ_{drx} , σ_{drvss} , σ_{ss} , полученным по экспериментальным данным из кривой пластического течения для соответствующей стали и температурно-скоростных условий деформирования:

$$X_{DRX} = \frac{(\sigma_{drv})^2 - (\sigma_{drx})^2}{(\sigma_{drvss})^2 - (\sigma_{ss})^2} \quad (18)$$

где σ_{drv} – напряжение, соответствующее процессу динамического возврата; σ_{drvss} – напряжение, соответствующее установившейся стадии течения при динамическом возврате; σ_{drx} – напряжение, соответствующее процессу динамической рекристаллизации; σ_{ss} – напряжение, соответствующее установившейся стадии течения в условиях динамической рекристаллизации; при этом: $\sigma_c \leq \sigma_{drx} \leq \sigma_{ss}$ и $\sigma_c \leq \sigma_{drv} \leq \sigma_{drvss}$.

Для компьютерного конечно-элементного моделирования процесса динамической рекристаллизации использовали модель *Колмогорова–Джонсона–Мела–Аврами*:

$$X_{DRX} = 1 - \exp\left(-\beta_d \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\dot{\varepsilon}}\right)^{n_d}\right) \quad (19)$$

где n_d и β_d – коэффициенты, описывающие кинетику динамической рекристаллизации, и зависящие от температуры и скорости деформации.

Модель (18) позволила перейти к модели (19) без использования металлографии. На рис. 20 и рис. 21 в качестве примера показано сравнение двух моделей расчета доли рекристаллизованного зерна аустенита, а также сравнение экспериментальной кривой текучести с аппроксимацией (для С-Мн стали при 1000 °С и 10 с⁻¹).

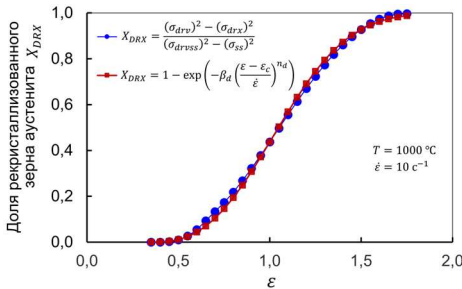


Рис. 20. Сравнение двух моделей расчета доли рекристаллизованного зерна аустенита

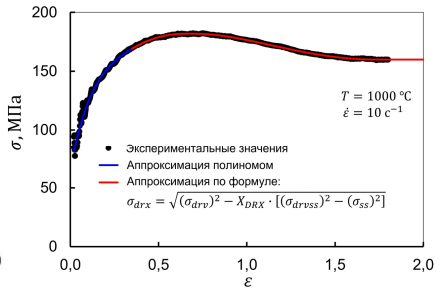


Рис. 21. Сравнение экспериментальной кривой текучести с аппроксимацией

Параметр *Зинера–Холломона* Z выражали через гиперболический синус напряжений σ :

$$Z = A[\sinh(\alpha\sigma)]^m = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (20)$$

где R – универсальная газовая постоянная, 8,314 Дж/(моль·К); T – температура, К; Q – энергия активации, Дж/моль; $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации, с⁻¹; α , m , A – коэффициенты.

Энергию активации определяли согласно формуле:

$$Q = Rm \left[\frac{\partial \{ \ln(\sinh(\alpha\sigma)) \}}{\partial \left(\frac{1}{T} \right)} \right]_{\dot{\varepsilon}} \quad (21)$$

где коэффициенты $m = \left[\frac{\partial \ln \dot{\varepsilon}}{\partial \ln(\sinh(\alpha\sigma))} \right]_T$; $\alpha = \frac{b}{m'}$; $b = \left[\frac{\partial \ln \dot{\varepsilon}}{\partial \sigma} \right]_T$; $m' = \left[\frac{\partial \ln \dot{\varepsilon}}{\partial \ln \sigma} \right]_T$.

По результатам экспериментальных исследований определены коэффициенты $m = 6,0801$; $m' = 9,9090$; $b = 0,0545$; $\alpha = 0,0055$ и энергия активации $Q = 299617$ Дж/моль.

Критическую деформацию ε_c описывали степенной функцией параметра Z :

$$\varepsilon_c = A_c Z^{L_c} \quad (22)$$

где A_c и L_c – коэффициенты степенной функции.

Получена формула для определения критической деформации для С-Мп стали:

$$\varepsilon_c = 0,008464 \cdot Z^{0,119038} \quad (23)$$

При традиционной (симметричной) прокатке в силу технологических ограничений динамическая рекристаллизация может быть лишь частичной, и приводит, соответственно, к формированию нежелательной структурной неоднородности. Поэтому деформация ε при традиционной (симметричной) прокатке должна быть меньше критической ε_c :

$$\frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{h_0}{h_1} \leq \varepsilon_c \quad (24)$$

Из формулы (19) выразим деформацию $\varepsilon = \varepsilon_c + \dot{\varepsilon} \left[-\frac{1}{\beta_d} \ln(1 - X_{DRX}) \right]^{\frac{1}{n_d}}$. Тогда условие полного прохождения динамической рекристаллизации ($X_{DRX} \geq 0,95$) и формирования однородной структуры при листовой прокатке со скоростной асимметрией можно представить в следующем виде:

$$\frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\ln \frac{h_0}{h_1} \right)^2 + \left(\frac{tg\varphi}{2} \right)^2} \geq \varepsilon_c + \dot{\varepsilon} \left[-\frac{1}{\beta_d} \ln(1 - X_{DRX}) \right]^{\frac{1}{n_d}} \quad (25)$$

По результатам экспериментальных исследований определены коэффициенты n_d и β_d в виде функций от параметра Z , температуры и скорости деформации:

$$n_d = 5,117284 \cdot Z^{-0,021892} \quad (26)$$

$$\beta_d = \exp(-13,96834 + 0,01619 \cdot T + 1,98233 \cdot \ln \dot{\varepsilon}) \quad (27)$$

где T – температура, °С; $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации, c^{-1} .

Средний диаметр динамически рекристаллизованного зерна аустенита $d_{\gamma DRX}$ в зависимости от параметра Z определяли по формуле Hodgson для С-Мп сталей:

$$d_{\gamma DRX} = 1,6 \cdot 10^4 \cdot Z^{-0,23} \quad (28)$$

На основе разработанной модели динамической рекристаллизации выполнена оценка влияния параметра Z , температуры и скорости деформации на средний диаметр динамически рекристаллизованного зерна аустенита $d_{\gamma DRX}$ в низкоуглеродистой С-Мп стали (рис. 22). Установлено, что для формирования зерна аустенита со средним диаметром менее 5 мкм требуется большая деформация $\varepsilon > 3$, при этом температура деформации должна составлять, предпочтительно, 900 °С, а скорость деформации превышать 100 c^{-1} , что соответствует параметру Зинера–Холломона $Z > 2 \cdot 10^{15} c^{-1}$. При более низкой температуре прокатки 800 °С для полного завершения динамической рекристаллизации требуется более высокая деформация: $\varepsilon = 4 \dots 5$. В свою очередь, при

более высокой температуре прокатки 1000 °С для полного завершения динамической рекристаллизации требуется меньшая деформация $\varepsilon > 2,5$, однако скорость деформации при этом должна быть очень высокой $\dot{\varepsilon} > 1000 \text{ с}^{-1}$. Отметим, что высокие скорости деформации $\dot{\varepsilon} > 100 \text{ с}^{-1}$ соответствуют условиям широкополосных станов горячей прокатки (ШСПП), а также условиям литейно-прокатных агрегатов (ЛПА).

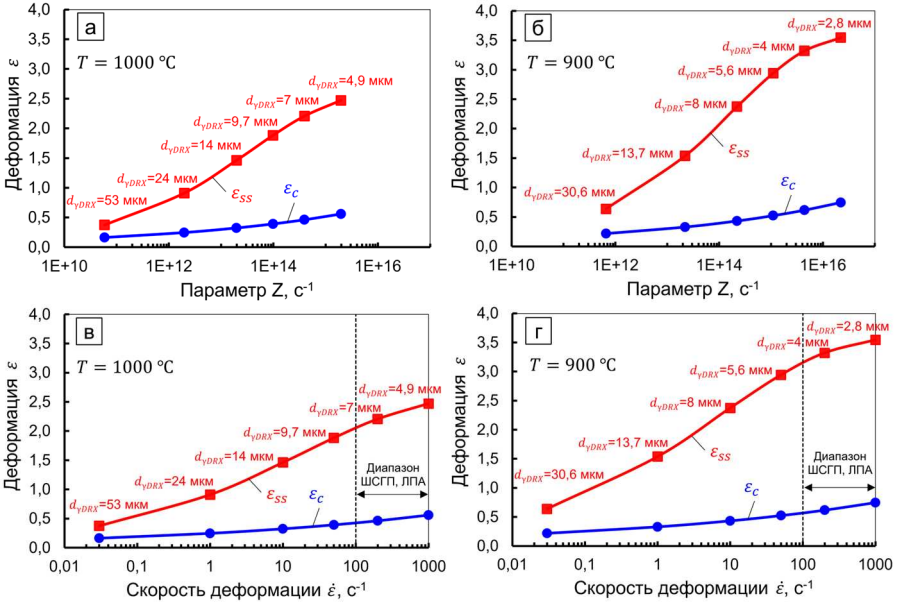


Рис. 22. Влияние параметра Z (а, б) и скорости деформации (в, г) на средний диаметр динамически рекристаллизованного зерна аустенита d_{vDRX}

Создание требуемого деформированного состояния металла $\varepsilon > 3$ за 1 проход при соответствующих температурно-скоростных условиях является трудновыполнимой задачей. Поэтому требуется, чтобы листовая прокатка со скоростной асимметрией выполнялась более чем за 1 проход. Однако при этом необходимо создать условия, чтобы в паузе между проходами отсутствовала статическая рекристаллизация, которая в общем виде описывается моделью:

$$X_{\text{SRX}} = 1 - \exp(-\beta_s t^{n_s}) \quad (29)$$

где t – время; n_s и β_s – коэффициенты, описывающие кинетику статической рекристаллизации.

Из формулы (29) выразим время $t = \left[-\frac{1}{\beta_s} \ln(1 - X_{\text{SRX}}) \right]^{\frac{1}{n_s}}$, тогда условие отсутствия статической рекристаллизации ($X_{\text{SRX}} \leq 0,05$) за время паузы $t_{\text{п}}$ между проходами можно представить в следующем виде:

$$t_{\text{п}} \leq t = \left[-\frac{1}{\beta_s} \ln(1 - X_{\text{SRX}}) \right]^{\frac{1}{n_s}} \quad (30)$$

На основе анализа известных моделей, описывающих кинетику статической рекристаллизации низкоуглеродистых С-Мн сталей, установлено, что время паузы между проходами должно составлять $t_{\text{п}} \leq 1 \text{ с}$.

На основе расчета по формуле (2) деформации ε при листовой прокатке со скоростной асимметрией с учетом влияния коэффициента обжатия h_0/h_1 и угла сдвига φ , а также на основе расчета по формуле (5) предельного угла сдвига φ_{max} с учетом влияния параметра формы очага деформации по высоте l_d/h_{cp} установлено, что для создания требуемого деформированного состояния металла $\varepsilon > 3$ необходимо не менее 3 проходов. При этом относительные обжатия $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ по проходам должны составлять, предпочтительно, по 50%, причем не менее 45% и не более 55%, а суммарное относительное обжатие ε_{Σ} за 3 прохода должно составлять, предпочтительно, 87,5%, причем не менее 87,5% и не более 90%. Минимальное суммарное относительное обжатие $\varepsilon_{\Sigma} \geq 87,5\%$ соответствует минимальному суммарному коэффициенту вытяжки за 3 прохода $\frac{h_0}{h_3} \geq 8$, где h_3 – конечная толщина листа, причем, предпочтительно, $h_3 \leq 10 \text{ мм}$. Соотношение скоростей валков в каждой из 3 клеток должно быть не менее 1,2 и не более 2, при этом скорости нижних валков v_{11}, v_{21}, v_{31} должны быть больше скоростей верхних валков v_{12}, v_{22}, v_{32} , т.е. должны выполняться следующие условия:

$$\begin{cases} 45\% \leq \varepsilon_1 \leq 55\% \\ 45\% \leq \varepsilon_2 \leq 55\% \\ 45\% \leq \varepsilon_3 \leq 55\% \\ 87,5\% \leq \varepsilon_{\Sigma} \leq 90\% \end{cases} \quad \begin{cases} 1,2 \leq \frac{v_{11}}{v_{12}} \leq 2 \\ 1,2 \leq \frac{v_{21}}{v_{22}} \leq 2 \\ 1,2 \leq \frac{v_{31}}{v_{32}} \leq 2 \end{cases} \quad (31)$$

$$v_{11} > v_{12}, \quad v_{21} > v_{22}, \quad v_{31} > v_{32} \quad (32)$$

При непрерывной листовой прокатке со скоростной асимметрией условие постоянства секундных объемов определяется по скоростям рабочих валков, вращающихся с большей скоростью:

$$h_0 \cdot v_{11} = h_1 \cdot v_{21} = h_2 \cdot v_{31} \quad (33)$$

где h_0, h_1, h_2 – толщина полосы на входе в 1, 2 и 3 клеть, соответственно.

С учетом того, что время паузы между проходами должно составлять $t_{\text{п}} \leq 1 \text{ с}$, скорость прокатки $v_{\text{пр}}$ (скорость полосы на выходе из последней клетки) должна быть 20-25 м/с, при этом, предпочтительно, чтобы расстояние между клетями составляло 5 м. Схема представлена на рис. 23.

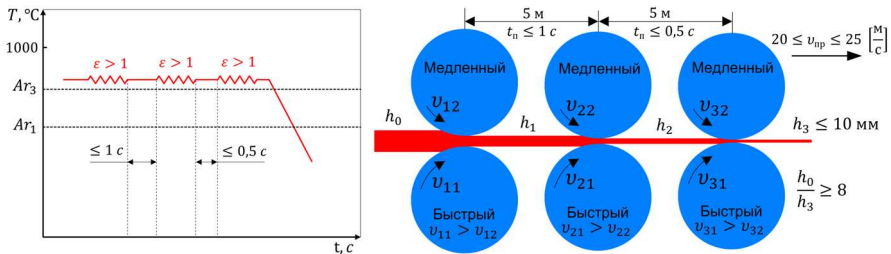


Рис. 23. Схема листовой прокатки со скоростной асимметрией в последних трех клетях чистой группы ШСГП или ЛПА с эффектом полной динамической рекристаллизации

Результаты конечно-элементного моделирования подтвердили преимущества предложенной схемы (рис. 23) в сравнении с традиционным (симметричным) процессом листовой прокатки. В диссертационной работе были выполнены экспериментальные исследования эффекта динамической рекристаллизации при 1-проходной листовой прокатке со скоростью асимметрией. Установлено, что даже за 1 проход в условиях частичной динамической рекристаллизации ($X_{DRX} \cong 60\%$) (рис. 24) обеспечивается эффективное измельчение структуры ($d_\alpha = 2,39 \mu\text{м}$) (рис. 25, г-е), при этом, однако, наблюдалась разнотерность $G_{13}(33,8\%)$, $G_{14}(28,1\%)$, $G_{15}(13,8\%)$, $G_{12}(13,0\%)$.

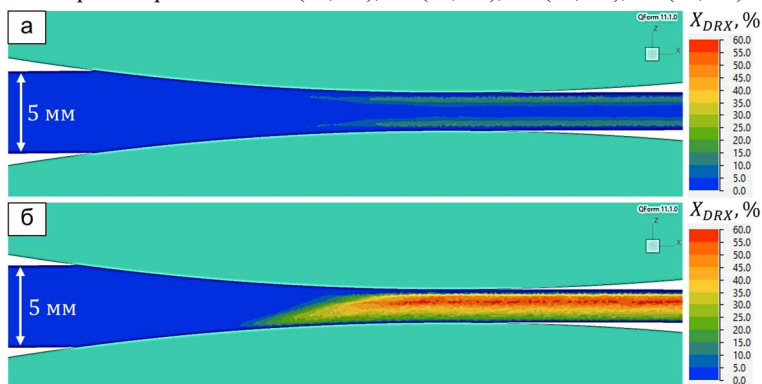


Рис. 24. Процентная доля динамически рекристаллизованных аустенитных зерен X_{DRX} (%) при симметричной листовой прокатке (а) и листовой прокатке со скоростью асимметрией (б)

Кроме того, по результатам выполненных экспериментов установлено, что применение скоростной асимметрии при листовой прокатке с эффектом большой сдвиговой деформации обеспечивает полное дробление центральной ликвационной полосы (рис. 25).

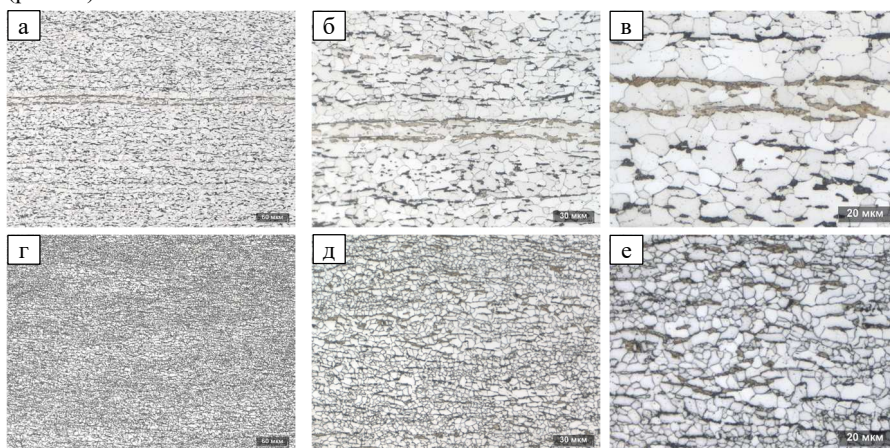


Рис. 25. Ликвационная полоса в центре опытных образцов (сталь С-Мн) после симметричной листовой прокатки (а, б, в) и ее «раздробленность» после листовой прокатки со скоростью асимметрией (г, д, е)

В пятой главе выполнено исследование влияния деформационных и температурно-скоростных режимов листовой прокатки со скоростной асимметрией на измельчение зерна по механизму динамического ферритного превращения. Термин «динамическое превращение» означает, что трансформация аустенита в феррит должна происходить в очаге деформации, а не за его пределами. Для решения этой задачи требовалось определить критические точки фазовых превращений.

Температуры фазовых превращений Ar_3 и Ar_1 оценивались методом касательных с использованием экспериментальных дилатограмм, полученных из испытаний на *Gleeble*. Долю трансформированного (превращенного) аустенита в α -фазу (X_α) для любого значения температуры в интервале ($Ar_3 - Ar_1$) определяли по формуле:

$$X_\alpha = \frac{\Delta L - \Delta L_\gamma}{\Delta L_\alpha - \Delta L_\gamma} \quad (34)$$

где ΔL – абсолютное удлинение образца, состоящего из γ - и α -фазы, мкм; ΔL_γ – абсолютное удлинение образца, состоящего на 100% из γ -фазы, мкм; ΔL_α – абсолютное удлинение образца, состоящего на 100% из α -фазы, мкм; X_α – доля α -фазы.

На основе экспериментальной дилатограммы (рис. 26) с использованием формулы (34) описывали кинетику $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения в виде функции $X_\alpha = f(T)$ (рис. 27).

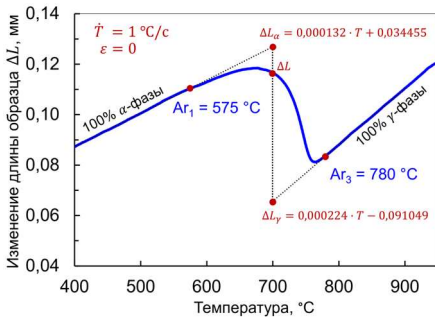


Рис. 26. Экспериментальная дилатограмма

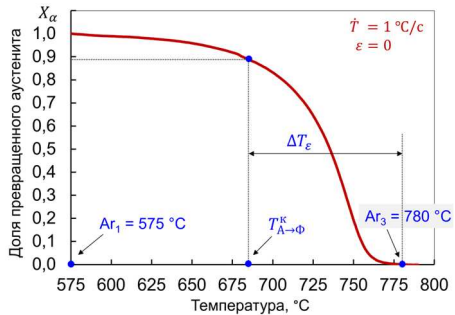


Рис. 27. Кинетика $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения

Если конечный фазовый состав стали представляет собой ферритно-перлитную структуру, то при $\gamma \rightarrow \alpha$ превращении происходит 2 трансформации: $A \rightarrow \Phi$ и $A \rightarrow \Pi$ (где A – аустенит, Φ – феррит, Π – перлит). Ar_1 – температура, при которой заканчивается превращение $A \rightarrow \Pi$ при охлаждении стали. Однако требовалось определить температуру $T_{A \rightarrow \Phi}^K$, при которой заканчивалось превращение $A \rightarrow \Phi$. Для решения этой задачи находили скорость ϑ (1-ая производная функции $X_\alpha = f(T)$ по температуре T) (рис. 28, а) и ускорение Ω (2-я производная функции $X_\alpha = f(T)$ по температуре T) (рис. 28, б) $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения. Поскольку функция $X_\alpha = f(T)$ являлась дискретной, то находили приближенное значение ее производной с помощью конечных разностей:

$$\vartheta = -\frac{dX_\alpha}{dT} \approx -\frac{(X_\alpha)_{i+1} - (X_\alpha)_{i-1}}{T_{i+1} - T_{i-1}} \quad (35)$$

$$\Omega = -\frac{d\vartheta}{dT} \approx -\frac{\vartheta_{i+1} - \vartheta_{i-1}}{T_{i+1} - T_{i-1}} \quad (36)$$

Согласно графику (рис. 28, б) температуру конца превращения аустенита в феррит $T_{A \rightarrow \Phi}^K$ можно определить по характерным пикам и температуре, при которой ускорение $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения становится максимально близким к нулю.

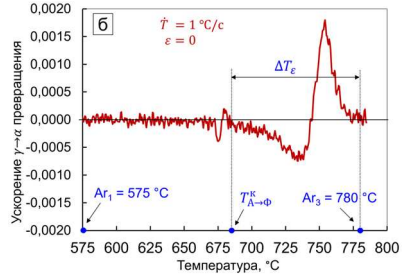
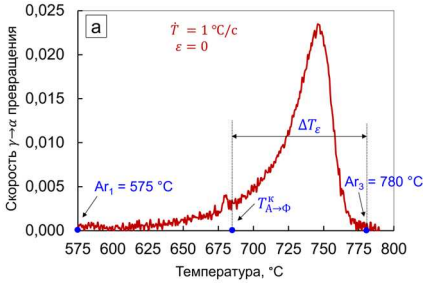


Рис. 28. Скорость (а) и ускорение (б) $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения

Сформулировано температурное условие полного динамического ферритного превращения и разработана технологическая схема процесса (рис. 29):

$$\Delta T_\varepsilon = Ar_3 - T_{A \rightarrow \Phi}^K \quad (37)$$

где ΔT_ε – величина понижения температуры металла в очаге деформации, необходимая для реализации механизма полного динамического ферритного превращения.

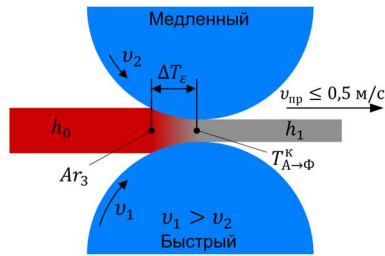
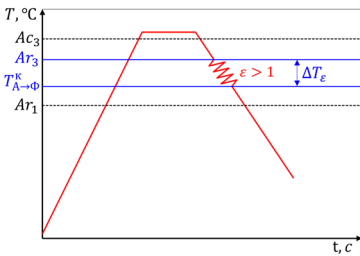


Рис. 29. Схема листовой прокатки со скоростной асимметрией с эффектом полного динамического ферритного превращения

Для понижения температуры металла в очаге деформации листовую прокатку со скоростной асимметрией необходимо проводить на низкой скорости при величине параметра формы очага деформации по высоте $l_d/h_{ср} > 5$.

На основе дилатометрических исследований показано (рис. 30), что увеличение скорости предварительного охлаждения с $\dot{T} = 1 \text{ °C/c}$ до $\dot{T} = 20 \text{ °C/c}$ позволяет существенно уменьшить величину ΔT_ε (со 100 °C до 50 °C). Наличие предварительной деформации при этом увеличивает ΔT_ε (рис. 31).

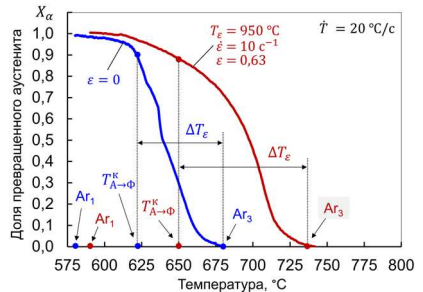
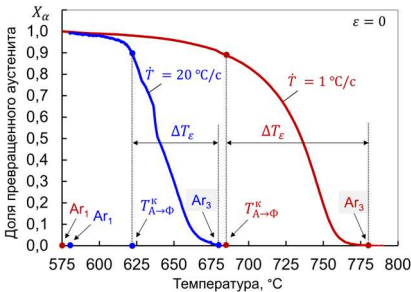


Рис. 30. Влияние скорости предварительного охлаждения \dot{T} на кинетику $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения

Рис. 31. Влияние предварительной деформации ε на кинетику $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения

Теплоотвод в очаге деформации через контактную поверхность рабочих валков должен также компенсировать повышение температуры металла вследствие деформационного разогрева:

$$\Delta T = \frac{\beta}{\rho c_p} \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon \quad (38)$$

где β – коэффициент преобразования работы деформации в тепло; ρ – плотность; ε – деформация; c_p – удельная теплоемкость.

Исследования по определению теплопроводности λ и удельной теплоемкости c_p (рис. 32, а) выполнялись в лаборатории «Исследование теплофизических свойств» ИЦ НИЦ «Курчатовский институт» ФГУП «ВИАМ». Измерения проводились в диапазоне температур от 20 до 1200 °С со скоростью нагрева 20 °С/мин.

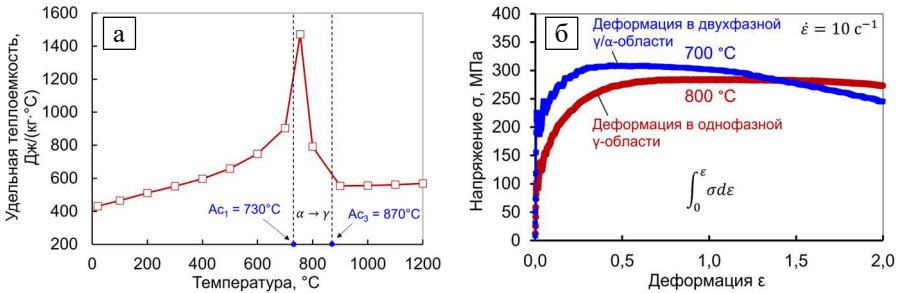


Рис. 32. Удельная теплоемкость c_p (а) и кривые текучести (б) низкоуглеродистой С-Мн стали в однофазной γ -области и двухфазной γ/α -области

Скачкообразный рост удельной теплоемкости c_p при $\gamma \rightarrow \alpha$ ($\alpha \rightarrow \gamma$) приводит к тому, что деформационный разогрев в двухфазной γ/α -области существенно ниже, чем деформационный разогрев в однофазной γ -области (формула 38 и рис. 32, б), что является дополнительным фактором, обеспечивающим заданное ΔT_ε . Результаты моделирования и эксперимента представлены на рис. 33-34.

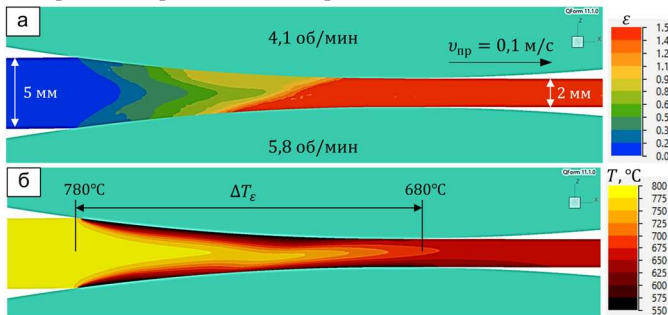


Рис. 33. Поле деформаций (а) и температурное поле (б)



Рис. 34. Экспериментальная листовая прокатка со скоростной асимметрией

Металлографические исследования выполнялись в НИИ Наносталей (г. Магнитогорск), лаборатории ООО «Тиксомет» (г. Санкт-Петербург), лаборатории прецизионной микроскопии (г. Тольятти). Экспериментально установлено, что применение скоростной асимметрии позволяет сформировать мелкозернистую структуру (рис. 35-36).

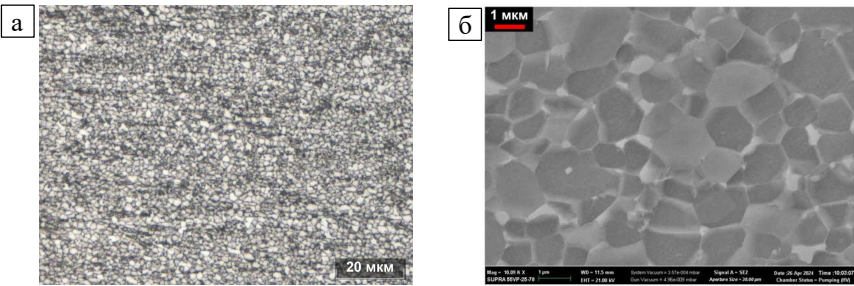


Рис. 35. Оптическое (а) и РЭМ (SEM) (б) изображения структуры стали (0,09С-1,6Мп)

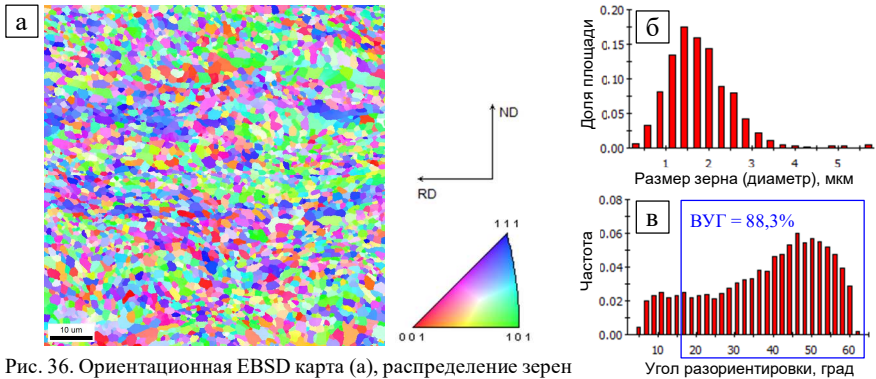


Рис. 36. Ориентационная EBSD карта (а), распределение зерен по размерам (б), распределение углов разориентировки (в)

Испытания на растяжение (ГОСТ 11701-84, ГОСТ 1497-23), выполненные на пропорциональных плоских образцах с головками (тип I), показали, что применение скоростной асимметрии (рис. 37) позволяет повысить предел текучести (до 2 раз согласно соотношению Холла-Петча) без изменения химического состава 0,09С-1,6Мп стали и применения отдельных операций термической обработки.

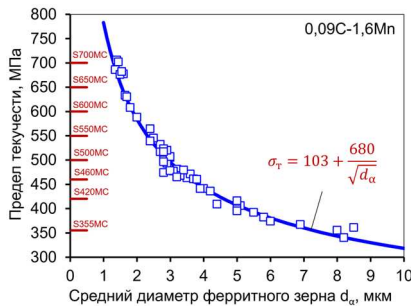


Рис. 37. Взаимосвязь предела текучести со средним диаметром ферритного зерна

В шестой главе предложены новые технологические решения применения скоростной асимметрии при листовой прокатке. На рис. 38 представлена технологическая схема листовой прокатки со скоростной асимметрией в клетях чистовой группы ШСГП или ЛПА с эффектом полной динамической рекристаллизации аустенита. Ключевые особенности технологической схемы: 1) скоростная асимметрия должна осуществляться не менее, и не более чем в 3 последних клетях чистовой группы с большой суммарной деформацией ($\epsilon > 3$); 2) пауза между проходами должна составлять не более 1 с, поэтому скорость прокатки в последней клетке должна составлять 20-25 м/с; 3) межклетьеовое охлаждение для последних 3 клеток должно обеспечивать эффективный теплоотвод, достаточный для компенсации деформационного и фрикционного разогрева металла в очаге деформации; 4) последеформационное охлаждение должно обеспечивать эффективный теплоотвод, достаточный для получения требуемого фазового состава стали (феррито-перлитная, феррито-бейнитная, феррито-мартенситная). В отличие от известной схемы Nakayama Steel Works (Япония), согласно которой скоростная асимметрия создается за счет использования приводного и не приводного (холостого) рабочих валков разного диаметра, в предлагаемой технологической схеме (рис. 38) скоростная асимметрия при прокатке в каждой из последних 3 клеток создается за счет разницы частоты вращения двух рабочих валков, имеющих индивидуальный привод. Такое решение обладает высокой технологической гибкостью, позволяя регулировать соотношение скоростей валков в широких пределах от $v_1/v_2 = 1$ до $v_1/v_2 = 2$, и реализовывать как симметричные, так и асимметричные режимы прокатки. Представленная схема (рис. 38) может быть реализована на высокоскоростных ШСГП или ЛПА, предпочтительно в сочетании с технологией бесконечной прокатки.

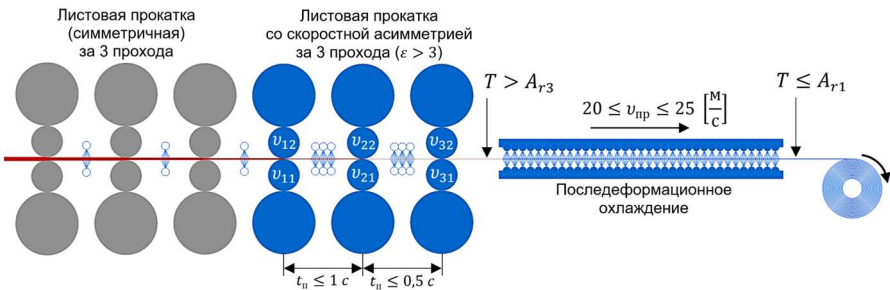


Рис. 38. Технологическая схема листовой прокатки со скоростной асимметрией в клетях чистовой группы ШСГП или ЛПА с эффектом полной динамической рекристаллизации аустенита

На рис. 39 представлена технологическая схема листовой прокатки со скоростной асимметрией с эффектом полного динамического ферритного превращения. Ключевые особенности технологической схемы: 1) скоростная асимметрия должна осуществляться не более чем за 1 проход с большой деформацией ($\epsilon > 1$); 2) в очаге деформации должно обеспечиваться снижение 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; 3) предварительное охлаждение должно обеспечивать понижение температуры A_{r3} и ускорение трансформации аустенита в феррит; 4) последеформационное охлаждение должно обеспечивать эффективный теплоотвод, достаточный для получения требуемого фазового состава стали (феррито-перлитная, феррито-бейнитная,

ферритно-мартенситная). Представленная схема (рис. 39) может быть реализована при малотоннажном (от 1 тонны до нескольких десятков тысяч тонн) производстве.

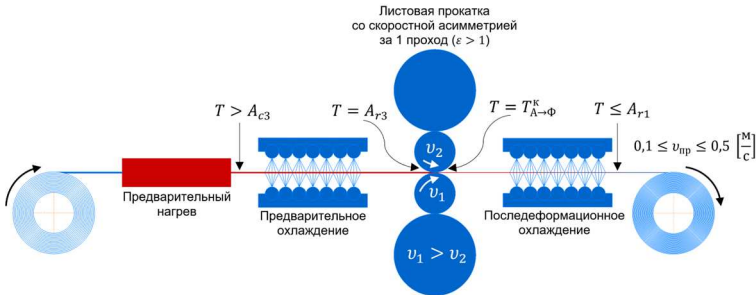


Рис. 39. Технологическая схема листовой прокатки со скоростной асимметрией с эффектом полного динамического ферритного превращения

Теоретически и экспериментально показано, что 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 измельчения размера зерна феррита в диапазоне от 4 до 1 мкм (13-17 балл зерна) за счет применения скоростной асимметрии открывает перспективы производства проката различных классов прочности из низкоуглеродистых С-Мн сталей с ферритной матрицей (ферритно-перлитных, ферритно-бейнитных, ферритно-мартенситных) единого химического состава без использования дорогостоящих легирующих элементов и применения отдельных операций термической обработки. Экспериментально показано, что применение скоростной асимметрии при листовой прокатке позволяет из одной марки 0,09С-1,6Мн получить 12 разных классов прочности: S355MC, S420MC, S460MC, S500MC, S550MC, S600MC, S650MC, S700MC в соответствии с EN 10149-2:2013 (рис. 40, а) и HDT450F, HDT580F, HDT580X, HDT760C в соответствии с EN 10338:2025 (рис. 40, б) без использования Nb, V, Ti, Cr, Ni, Cu, Mo, B.

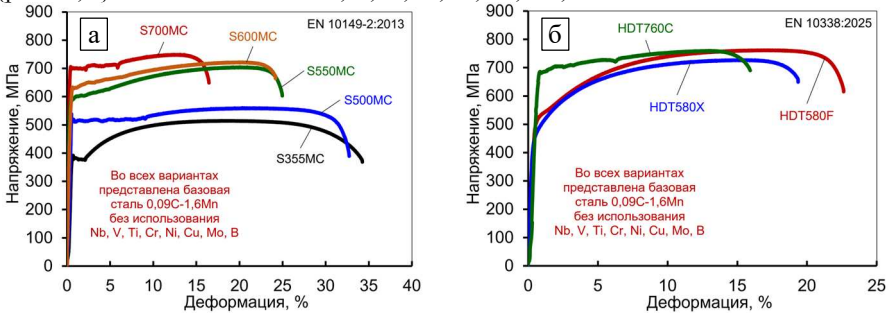


Рис. 40. Диаграммы растяжения низкоуглеродистой стали 0,09С-1,6Мн классов прочности S355MC, S500MC, S550MC, S600MC, S700MC в соответствии с EN 10149-2:2013 (а) и классов прочности HDT580F, HDT580X, HDT760C в соответствии с EN 10338:2025 (б)

Расчетный экономический эффект от применения скоростной асимметрии при листовой прокатке за счет экономии легирующих элементов определяли по формуле:

$$Ц_{Ме} = \frac{Ц_{FeMe} \cdot Me}{[Me] \cdot K_{ув}} \quad (39)$$

где C_{Me} – цена легирующего элемента заданного процентного содержания в составе стали, \$/т; Me – заданное процентное содержание легирующего элемента в составе стали, %; C_{FeMe} – цена ферросплава, \$/т; $[Me]$ – процентное содержание легирующего элемента в ферросплаве, %; $K_{уцв}$ – коэффициент усвоения легирующего элемента.

Потенциал экономии легирующих элементов и расчетный экономический эффект от применения скоростной асимметрии представлены в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1 – Механические свойства (EN 10149-2) опытных образцов из стали 0,09C-1,6Mn (без использования Nb, V, Ti, Cr, Ni, Cu, Mo, B) после листовой прокатки со скоростной асимметрией

Класс прочности (марка)		$\sigma_{ТВ}$, МПа	σ_B , МПа	δ_{80}^* , %	δ_p , %	Потенциал экономии легирующих элементов, %	Расчетный экономический эффект**, руб/т
Базовый	S355MC (0,09C-1,6Mn)	392	515	$\frac{34,2}{19}$	17,9	-	-
Достижимый после применения скоростной асимметрии	S420MC	440	498	$\frac{30,1}{16}$	20,4	0,03Nb	2155
	S460MC	463	518	$\frac{31,0}{14}$	20,8	0,04Nb	2873
	S500MC	539	560	$\frac{32,1}{12}$	20,3	0,05Nb	3591
	S550MC	588	705	$\frac{24,5}{12}$	20,9	0,06Nb	4310
	S600MC	633	722	$\frac{23,8}{11}$	20,0	0,04Nb-0,25Ni-0,25Cu	8300
	S650MC	677	740	$\frac{19,1}{10}$	15,3	0,06Nb-0,25Ni-0,25Cu	9737
	S700MC	706	750	$\frac{16,1}{10}$	12,8	0,25Mo-0,1Ti	15126

*В знаменателе – минимальные требования. **В ценах 2025 г. (1\$=85₽)

Таблица 2 – Механические свойства (EN 10338) опытных образцов из стали 0,09C-1,6Mn (без использования Nb, V, Ti, Cr, Ni, Cu, Mo, B) после листовой прокатки со скоростной асимметрией

Класс прочности (марка)		$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_{80}^* , %	δ_p , %	Потенциал экономии легирующих элементов, %	Расчетный экономический эффект**, руб/т
Достижимый после применения скоростной асимметрии	HDT580F	517	762	$\frac{22,6}{15}$	17,5	0,04Nb	2873
	HDT580X	441	727	$\frac{19,4}{19}$	15,7	0,03Nb-0,5Cr	4018
	HDT760C	686	760	$\frac{15,9}{10}$	12,9	0,25Mo-0,25Cr	15450

*В знаменателе – минимальные требования. **В ценах 2025 г. (1\$=85₽)

Потенциал применения технологий листовой прокатки со скоростной асимметрией не ограничивается низкоуглеродистыми сталями системы С-Мп, но также может быть использован для сталей различных систем легирования, в том числе, для среднеуглеродистых, высокоуглеродистых и нержавеющей сталей, а также для цветных металлов и сплавов (Al, Cu, Ti и др.).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. При листовой прокатке со скоростной асимметрией реализуется схема деформации, включающая не только сжатие, но и сдвиг. Практическая значимость этого эффекта заключается в технологической возможности увеличения (до 2 раз) истинной деформации ε без изменения коэффициента обжатия h_0/h_1 .

2. Применение скоростной асимметрии позволяет снизить усилие до 2 раз в сравнении с традиционной (симметричной) листовой прокаткой при прочих равных условиях. Практическая значимость этого эффекта заключается в возможности повышения технологической пластичности прокатываемых металлов и сплавов, а также в возможности повышения обжимной способности и производительности прокатных клетей.

3. Предложена уточненная модель контактного трения Леванова, отличающаяся учетом влияния относительной скорости скольжения металла v_s в очаге деформации на величину удельных сил трения τ при листовой прокатке со скоростной асимметрией. Уточненная модель позволила объяснить эффект повышения усилия прокатки в области малой скоростной асимметрии.

4. Минимум активной мощности в очаге деформации обеспечивается при оптимальном соотношении скоростей валков v_1/v_2 , при котором момент прокатки M_2 и мощность прокатки N_2 на приводном валке, вращающемся с меньшей скоростью v_2 , становятся равными нулю, т.е. один из двух приводных валков переходит в генераторный режим работы. Практическая значимость этого эффекта заключается в технологической возможности снижения на 10-15% расхода электрической энергии главных приводов в сравнении с традиционной (симметричной) листовой прокаткой при прочих равных условиях.

5. Применение скоростной асимметрии при листовой прокатке с эффектом большой сдвиговой деформации обеспечивает полное дробление центральной ликвационной полосы.

6. Для экспериментальной реализации процесса листовой прокатки со скоростной асимметрией 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.

7. Разработана технологическая схема многопроходной листовой прокатки со скоростной асимметрией в клетях чистовой группы ШСГП или ЛПА с эффектом полной динамической рекристаллизации, предназначенная для крупнотоннажного производства горячекатаных полос толщиной от 1 до 10 мм из высокопрочных низкоуглеродистых С-Mn сталей с ферритной матрицей со средним диаметром зерна феррита в диапазоне от 4 мкм до 1 мкм без использования легирующих элементов и отдельных операций термической обработки.

8. Разработана технологическая схема однопроходной листовой прокатки со скоростной асимметрией с эффектом полного динамического ферритного превращения, предназначенная для малотоннажного производства горячекатаных полос толщиной от 1 до 10 мм из высокопрочных низкоуглеродистых С-Mn сталей с ферритной матрицей со средним диаметром зерна феррита в диапазоне от 4 мкм до 1 мкм без использования легирующих элементов и отдельных операций термической обработки.

9. Скоростная асимметрия, характеризующаяся соотношением скоростей валков v_1/v_2 , является новым технологическим параметром процесса листовой прокатки, обеспечивающим дополнительное измельчение структуры и повышение прочности

низкоуглеродистых сталей без изменения их химического состава и применения отдельных операций термической обработки. Экспериментально показано, что применение скоростной асимметрии при листовой прокатке позволяет из одной (базовой) марки 0,09С-1,6Мп получить 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.

10. Расчетный экономический эффект от применения скоростной асимметрии при листовой прокатке составляет 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\$=85Р).

11. Потенциал применения технологий листовой прокатки со скоростной асимметрией не ограничивается низкоуглеродистыми сталями системы С-Мн, но также может быть использован для сталей различных систем легирования, в том числе, для среднеуглеродистых, высокоуглеродистых и нержавеющей сталей, а также для цветных металлов и сплавов (Al, Cu, Ti и др.).

12. Практическая ценность диссертационной работы подтверждена 8 патентами на изобретения РФ. Результаты работы используются в научной лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева», что подтверждено технологическим регламентом, а также используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» при подготовке обучающихся по направлению 22.03.02 Metallurgy (уровень бакалавриата), при подготовке обучающихся по направлению 22.04.02 Metallurgy (уровень магистратуры), при подготовке кадров высшей квалификации по направлению 2.6.4 Обработка металлов давлением, что подтверждено актом.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В НАУЧНЫХ ЖУРНАЛАХ И ИЗДАНИЯХ

Публикации в журналах из Перечня ВАК РФ:

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. Обеспечение технологической пластичности производства нержавеющей стали 20X13 при асимметричной прокатке / Песин А.М., **Пустовойтов Д.О.**, Бревнов К.Ю. [и др.] // Сталь. 2025. – № 4. – С. 21-24.
3. 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.
4. Песин, А. М. Экспериментальное опробование технологии асимметричной холодной прокатки ленты из высокоуглеродистых марок сталей для исключения операций промежуточного отжига / А. М. Песин, **Д. О. Пустовойтов**, А. И. Сверчков, Г. П. Корнилов // Черные металлы. – 2022. – № 11. – С. 28-35. – DOI 10.17580/chm.2022.11.03. – EDN FWNDLG.

5. Песин, А. М. Асимметричная прокатка листов и лент: история и перспективы развития / А. М. Песин, **Д. О. Пустовойтов**, О. Д. Бирюкова, А. Е. Кожемякина // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallургия. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 81-96. – DOI 10.14529/met200309. – EDN VRLGVM.
6. Песин, А. М. Особенности применения литой и деформированной стали для деталей машин / А. М. Песин, Т. В. Швеева, **Д. О. Пустовойтов** // Черные металлы. – 2020. – № 1. – С. 43-49. – EDN INCXJM.
7. 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.
8. 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.
9. Песин, А. М. Моделирование кинематики течения металла при асимметричной тонколистовой прокатке алюминиевого сплава 5083 / А. М. Песин, **Д. О. Пустовойтов** // Заготовительные производства в машиностроении (кузнечно-прессовое, литейное и другие производства). – 2016. – № 4. – С. 26-31. – EDN VTIMSV.
10. Песин, А.М. Исследование влияния скоростной асимметрии на параметры различных процессов листовой прокатки / А. М. Песин, Х. Дья, А. Кавалек [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2014. – № 1(45). – С. 86-91. – EDN RZPTQR.
11. 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.] // Metallург. – 2013. – № 11. – С. 75-77. – EDN RTVWZP.
12. **Пустовойтов, Д. О.** Моделирование сдвиговых деформаций в предельном случае асимметричной тонколистовой прокатки / Д. О. Пустовойтов, А. М. Песин, А. А. Перехожих, М. К. Свердлик // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2013. – № 1(41). – С. 65-68. – EDN PXFLJL.
13. Шмаков, А. В. Комплексное моделирование технологии контролируемой прокатки микролегированных трубных сталей повышенных классов прочности на толстолистовом стане 5000 / А. В. Шмаков, В. М. Салганик, С. В. Денисов [и др.] // Сталь. – 2012. – № 2. – С. 42-46.
14. Салганик, В. М. Обеспечение высокого качества проката толщиной более 16 мм на широкополосном стане 2000 ОАО ММК / В. М. Салганик, **Д. О. Пустовойтов**, С. В. Денисов [и др.] // Сталь. – 2012. – № 10. – С. 57-59. – EDN RZVBHD.
15. Салганик, В. М. Особенности формирования напряженно-деформированного состояния раската в черновых проходах применительно к стану 5000 ОАО ММК / В. М. Салганик, А. В. Шмаков, **Д. О. Пустовойтов**, С. А. Муриков // Производство проката. – 2009. – № 11. – С. 10-13. – EDN KZUZZJ.
16. Молостов, М. А. Разработка эффективной схемы деформации проката в черновой группе клетей стана 2000 / М. А. Молостов, П. А. Стеканов, С. В. Дубовский [и др.] // Сталь. – 2009. – № 10. – С. 51-52. – EDN QZQPYX.

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

17. Pesin, A. M. Limitations of Electric Drive and Local Control Systems in Asymmetric Rolling of Fine-Grained Steels / A. M. Pesin, G. P. Kornilov, A. A. Bochkarev [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2024. – Vol. 2892, No. 1. – Pp. 012005. – DOI 10.1088/1742-6596/2892/1/012005. – EDN BWDPYY.
18. Pesin, A. M. Enhancing technological plasticity in the production of AISI 420 stainless steel through the use of asymmetric rolling / A. M. Pesin, **D. O. Pustovoytov**, K. Yu. Brevnov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2024. – Vol. 2892, No. 1. – Pp. 012009. – DOI 10.1088/1742-6596/2892/1/012009. – EDN EBWCSM.
19. Pesin, A. Development of asymmetric cold rolling technology of high-strength steel grades in order to exclude intermediate annealing operations / A. Pesin, G. Raab, A. Sverchikov [et al.]. Materials Research Proceedings. – 2023. – 32. – Pp. 355-361. DOI 10.21741/9781644902615-40.
20. Pesin, A. FEM simulation of dynamic recrystallization during asymmetric hot rolling of high-speed steel M2 / A. Pesin, **D. Pustovoytov**, I. Pesin [et al.]. Materials Research Proceedings. – 2023. – 32. – Pp. 294-302. DOI 10.21741/9781644902615-34.
21. **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.
22. Konstantinov, D. Influence of microstructure on inhomogeneity of stress and strain in the deformation zone during asymmetric cold rolling of ferritic-pearlitic steels / D. Konstantinov, **D. Pustovoytov**, A. Pesin // Procedia Manufacturing : 18, Krakow, 13–16 сентября 2020 года. – Krakow, 2020. – P. 514-519. – DOI 10.1016/j.promfg.2020.08.093. – EDN QSZPSW.
23. Konstantinov, D. Multiscale simulation of the stress-strain state of low carbon steel strip processed by asymmetric rolling / D. Konstantinov, A. Pesin, D. Pustovoytov // Solid State Phenomena. – 2020. – Vol. 304. – Pp. 107-112. – EDN WKIXOB.
24. **Pustovoytov, D.** Influence of small microscopic grooves of work rolls on strain gradient induced in metal sheets during symmetric and asymmetric rolling / D. Pustovoytov, A. Pesin, N. Lokotunina, A. Kozhemiakina // METAL 2019 - 28th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings : 28, Brno, 22–24 мая 2019 года. – Brno, 2019. – P. 265-270. – EDN MILQRA.
25. **Pustovoytov, D.** FEM simulation of strain gradients induced in metal sheets by special rolling techniques / D. Pustovoytov, A. Pesin // AIP Conference Proceedings : 22, Vitoria-Gasteiz, 08–10 мая 2019 года. – Vitoria-Gasteiz, 2019. – P. 040012. – DOI 10.1063/1.5112546. – EDN USAEAB.
26. Pesin, A. Finite element simulation and comparison of a shear strain and equivalent strain during ECAP and asymmetric rolling / A. Pesin, **D. Pustovoytov**, T. Shveyova, R. Vafin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 3, Melbourne, VIC, 15–17 ноября 2017 года. – Melbourne, VIC, 2018. – P. 012007. – DOI 10.1088/1757-899X/293/1/012007. – EDN XXPTAD.
27. **Pustovoytov, D.** FEM simulation of influence of asymmetric cold rolling on through-thickness strain gradient in low-carbon steel sheets / D. Pustovoytov, A. Pesin, A. Zhilyaev, G. Raab // Diffusion and Defect Data. Pt A Defect and Diffusion Forum. – 2018. – Vol. 385 DDF. – Pp. 455-460. – DOI 10.4028/www.scientific.net/DDF.385.455. – EDN YCOAPR.

28. Pesin, A. Influence of process parameters on distribution of shear strain through sheet thickness in asymmetric rolling / A. Pesin, **D. Pustovoytov** // Key Engineering Materials. – 2014. – Vol. 622-623. – Pp. 929-935. – DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.622-623.929. – EDN UEBNLZ.

Монографии:

29. Песин, А. М. Наноструктурирование металлов и сплавов методами интенсивной пластической деформации / А. М. Песин, А. П. Жилыев, Г. И. Рааб [и др.]. – Магнитогорск : Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2021. – 259 с. – ISBN 978-5-9967-2372-0. – EDN ANXFYB.
30. Песин, А. М. Компьютерное моделирование новых методов интенсивной пластической деформации металлов и сплавов / А. М. Песин, **Д. О. Пустовойтов**, Р. К. Вафин, Т. В. Швеева. – Магнитогорск : Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2019. – 146 с. – ISBN 978-5-9967-1800-9. – EDN WLBCVI.
31. Песин, А. М. Развитие теории и технологии процесса асимметричной тонколистовой прокатки как метода интенсивной пластической деформации / А. М. Песин, **Д. О. Пустовойтов**, М. К. Свердлик. – Магнитогорск : Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2017. – 150 с. – ISBN 978-5-9967-0962-5. – EDN NUKJVB.
32. Чикишев, Д. Н. Разработка экономнолегированных марок сталей со специальными свойствами : Монография. Электронный ресурс / Д. Н. Чикишев, **Д. О. Пустовойтов**, Е. Б. Пожидаева. – Магнитогорск : Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2015. – ISBN 978-5-9967-0748-5. – EDN XQSYCD.
33. Салганик, В. М. Анализ и синтез экономнолегированных сталей для топливно-энергетического комплекса / В. М. Салганик, С. В. Денисов, П. А. Стеканов [и др.]. – Магнитогорск : Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2015. – 207 с. – ISBN 978-5-9967-0595-5. – EDN TWECUR.

Охраняемые документы:

34. Патент № 2848699 С1 Российская Федерация, МПК В21В 1/22, В21В 37/46. Способ горячей асимметричной прокатки листов : № 2025106436 : заявл. 19.03.2025 : опубл. 21.10.2025 / А. М. Песин, **Д. О. Пустовойтов**, Л. В. Носов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова".
35. Патент № 2833651 С1 Российская Федерация, МПК В21В 1/22, В21В 37/46. Способ производства листового проката из низколегированной стали : № 2024117943 : заявл. 28.06.2024 : опубл. 28.01.2025 / А. М. Песин, **Д. О. Пустовойтов**, Л. В. Носов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова". – EDN OFRVGP.
36. Патент № 2821127 С1 Российская Федерация, МПК В21В 1/22, С21D 7/02, С21D 8/02. Способ производства ленты из низкоуглеродистых сталей : № 2023122822 : заявл. 04.09.2023 : опубл. 17.06.2024 / А. М. Песин, **Д. О. Пустовойтов**, Н. М. Локотунина [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное

- образовательное учреждение высшего образования "Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова". – EDN LAMLLT.
37. Патент № 2829244 С1 Российская Федерация, МПК В21В 1/22, В21В 37/46. Способ производства холоднокатаной ленты из жаропрочной нержавеющей стали : № 2024110935 : заявл. 22.04.2024 : опубл. 30.10.2024 / А. М. Песин, **Д. О. Пустовойтов**, К. Ю. Бревнов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова". – EDN ILLGRF.
 38. Патент № 2795066 С1 Российская Федерация, МПК В21В 1/22, В21В 3/00, В21В 37/46. Способ производства ленты из высокоуглеродистых и легированных сталей : № 2023100202 : заявл. 09.01.2023 : опубл. 28.04.2023 / А. М. Песин, **Д. О. Пустовойтов**, Г. П. Корнилов [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "ЧерметИнформСистемы". – EDN ТТООААТ.
 39. Патент № 2701322 С1 Российская Федерация, МПК В21В 1/22. Способ производства тонкой полосы : № 2019101094 : заявл. 16.01.2019 : опубл. 26.09.2019 / А. М. Песин, **Д. О. Пустовойтов**, Н. М. Локотунина, А. Е. Кожемякина ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова". – EDN SXHSYB.
 40. Патент № 2622196 С1 Российская Федерация, МПК В21В 1/28. Способ прокатки металлических листов : № 2016100662 : заявл. 11.01.2016 : опубл. 13.06.2017 / А. М. Песин, **Д. О. Пустовойтов** ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова" (ФГБОУ ВПО "МГТУ"). – EDN LIREQF.
 41. Патент № 2486974 С1 Российская Федерация, МПК В21В 1/22. Способ асимметричной прокатки передних концов толстых листов на реверсивных станах : № 2012105873/02 : заявл. 17.02.2012 : опубл. 10.07.2013 / В. М. Салганик, С. В. Денисов, А. М. Песин [и др.] ; заявитель Открытое Акционерное Общество "Магнитогорский металлургический комбинат". – EDN ZGSRON.

Другие публикации автора по теме диссертации:

42. Песин, А. М. Исследование возможности улучшения микроструктуры металла при горячей прокатке листов из стали 20 / А.М. Песин, **Д.О. Пустовойтов**, Л.В. Носов [и др.] // Прокатное производство. Приложение к журналу «Технология металлов». – 2025. – № 21. – С. 14-20. – DOI 10.31044/1684-2499-2025-0-21-14-20.
43. Песин, А. М. Влияние асимметричной прокатки на структуру низкоуглеродистых сталей / А. М. Песин, **Д. О. Пустовойтов**, Н. М. Локотунина [и др.] // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. – 2024. – № 23. – С. 88-92. – EDN ANBGDI.
44. Корнилов, Г. П. Моделирование электроприводов прокатных станов при асимметричной прокатке / Г. П. Корнилов, А. М. Песин, А. А. Бочкарев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2023. – Т. 66, № 2. – С. 35-44. – DOI 10.17213/0136-3360-2023-2-35-44. – EDN ХВМКВВ.
45. Песин, А. М. Исследование возможности производства холоднокатаной ленты в ЛПЦ-8 ПАО «ММК» из подката повышенной толщины с использованием асимметричного деформирования / А. М. Песин, **Д. О. Пустовойтов**, Н. М. Локотунина [и др.]

- др.] // Кайбышевские чтения : Сборник материалов Третьей Международной школы-конференции молодых ученых, Уфа, 16–20 октября 2023 года. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2023. – С. 107-108. – EDN LWYIVH.
46. Копцева, Н. В. Формирование ультрамелкозернистой структуры стали 08Ю при асимметричной прокатке с рассогласованием скоростей рабочих валков / Н. В. Копцева, Ю. Ю. Ефимова, А. М. Песин [и др.] // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. – 2022. – № 21. – С. 83-92. – EDN EPHAZX.
47. Константинов, Д. В. Мультимасштабное моделирование напряженно-деформированного состояния при асимметричной прокатке стальной полосы / Д. В. Константинов, А. М. Песин, **Д. О. Пустовойтов** // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. – 2019. – № 18. – С. 27-32. – EDN KEVWJW.
48. Песин, А. М. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния рабочих валков стана асимметричной прокатки дуо-400 / А. М. Песин, **Д. О. Пустовойтов**, Т. В. Швеева, А. Э. Новоселов // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2018. – № 2(11). – С. 3-9. – EDN ABOHDM.
49. Pesin, A. Novel technique for physical simulation of asymmetric rolling / A. Pesin, **D. Pustovoytov** // Procedia Manufacturing : 17, Toyohashi, 16–19 сентября 2018 года. – Toyohashi, 2018. – P. 137-143. – DOI 10.1016/j.promfg.2018.07.187. – EDN YMPKXO.
50. Pesin, A. Finite element simulation of shear strain in various asymmetric cold rolling processes / A. Pesin, **D. Pustovoytov**, A. Korchunov [et al.] // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. – 2014. – No. 4(48). – P. 32-40. – EDN RBZHYM.