

ОТЗЫВ

на автореферат диссертационной работы Пустовойтова Дениса Олеговича «Теоретическое и технологическое обоснование применения скоростной асимметрии для повышения механических свойств листового проката», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.4. – Обработка металлов давлением.

В последнее время в металлургическом производстве наблюдается устойчивая тенденция к повышению требований к качеству и уровню механических свойств листового проката при одновременном снижении затрат на его производство. Традиционные технологии получения высокопрочных сталей базируются на микролегировании дефицитными и дорогостоящими элементами, а также на применении сложных термических обработок. В этой связи разработка новых ресурсосберегающих технологий, позволяющих достичь высоких механических свойств без изменения химического состава, является одной из приоритетных задач обработки металлов давлением.

Актуальность темы исследования. Листовой прокат из низкоуглеродистых сталей с ферритной матрицей является одним из основных видов продукции черной металлургии, выпускаемой в объемах десятков миллионов тонн ежегодно. Существующие технологии производства проката высоких классов прочности (S420MC...S700MC, HDT580F...HDT760C) основаны на введении в базовый химический состав C-Mn дополнительных легирующих элементов, таких как Nb, Mo, V, Ti. Однако высокая стоимость ферросплавов (в 2025 г. средние цены на феррониобий составляют 43096 \$/т, на ферромолибден — 39763 \$/т) значительно увеличивает затраты на производство. Кроме того, ниобий, молибден и другие элементы входят в перечень дефицитных видов твердых полезных ископаемых (распоряжение Правительства РФ от 16.04.2024 №939-р), при этом потребление ниобия в РФ на 98% обеспечивается импортом в условиях значительных рисков поставок. Согласно известному соотношению Холла-Петча, уменьшение ферритного зерна с 10-5 мкм до 4-1 мкм позволяет двукратно повысить прочность стали без изменения ее химического состава. Однако традиционные технологии ограничены возможностями получения проката с минимальным диаметром зерна лишь 10-5 мкм. Новые технологические решения могут быть основаны на использовании нестандартного метода обработки металлов давлением — листовой прокатки со скоростной асимметрией. 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. Таким образом, диссертационная

ЗАРЕГИСТРИРОВАНО В ОТДЕЛЕ ДЕЛОПРОИЗВОДСТВА ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова»	
за № _____	
Дата регистрации	30.03.2026
Фамилия регистратора	_____

работа, направленная на решение данной проблемы, является актуальной и своевременной.

Научная новизна работы заключается в разработке комплекса теоретических положений, описывающих процесс листовой прокатки со скоростной асимметрией. К наиболее значимым результатам можно отнести:

1. Разработку модели оценки деформированного состояния металла, учитывающей соотношение средних горизонтальных скоростей течения металла v_{M1}^{cp} и v_{M2}^{cp} на контакте с валками, вращающимися с разной скоростью v_1 и v_2 , а также учитывающей геометрические характеристики очага деформации.

2. Установление предельного кинематического соотношения $v_{M1}^{cp}/v_{M2}^{cp} \leq 3/2$ для средних горизонтальных скоростей течения металла и предельного угла сдвига ϕ_{max} , являющегося функцией параметра формы очага деформации по высоте l_d/h_{cp} .

3. Установление, что при листовой прокатке со скоростной асимметрией увеличение деформации и снижение усилия прокатки достигают экстремумов при минимальной положительной величине опережения металла относительно вала, вращающегося с большей скоростью.

4. Уточнение закономерностей влияния скоростной асимметрии на распределение моментов и мощности между приводными рабочими валками, позволяющее определить два оптимальных кинематических условия: для максимума сдвиговой деформации (максимальная разница относительных моментов) и для минимума энергозатрат на прокатку (момент на тихоходном валке равен нулю).

5. Предложение уточненной модели контактного трения Леванова, отличающейся учетом влияния относительной скорости скольжения металла на величину удельных сил трения.

6. Определение геометрических и температурно-скоростных условий многопроходной ($\epsilon \geq 3$ за три прохода) и однопроходной (деформация в интервале от Ar_3 до $T_{A \rightarrow \Phi}^k$) листовой горячей прокатки со скоростной асимметрией, обеспечивающих формирование мелкозернистой структуры.

Практическая значимость работы подтверждена масштабом выполненных разработок:

1. Для экспериментальной реализации процесса изготовлен и введен в эксплуатацию 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 по сравнению с традиционной симметричной прокаткой.

3. Разработаны технологические схемы многопроходной и однопроходной листовой прокатки для производства горячекатаных полос толщиной 1-10 мм из высокопрочных низкоуглеродистых C-Mn сталей со средним диаметром зерна феррита от 4 до 1 мкм без использования легирующих элементов и отдельных операций термической обработки.

4. Экспериментально доказано, что применение скоростной асимметрии позволяет из одной базовой марки 0,09C-1,6Mn получать 12 различных 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.

5. Рассчитан экономический эффект, составляющий 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 S700MC или HDT760C (за счет экономии 0,25 мас.% молибдена, 0,1 мас.% титана, 0,25 мас.% хрома) в ценах 2025 года (1\$=85Р).

6. Техническая новизна защищена 8 патентами РФ на изобретения (№2848699, №2833651, №2821127, №2829244, №2795066, №2701322, №2486974, №2622196). Результаты внедрены в научную практику лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» и в учебный процесс ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» при подготовке бакалавров, магистров и кадров высшей квалификации.

Достоверность и апробация результатов. Достоверность обеспечивается применением специализированной конечно-элементной инженерной программы QForm, применением симулятора Gleeble для физического моделирования термомеханических процессов и дилатометрического анализа, соответствием теоретических закономерностей результатам экспериментов, полученных на уникальной научной установке, а также согласованностью теоретических и экспериментальных результатов с известными закономерностями обработки металлов давлением. Основные результаты докладывались на международных конференциях Metal Forming (2014, 2016, 2020), ICTP (2014, 2017), NUMIFORM (2016), ESAFORM (2019), ICSAM (2018, 2023), BAOSTEEL (2018), XIV Международном конгрессе прокатчиков (2024) и др. Материалы диссертации опубликованы в 50 научных работах, включая 16 статей в журналах из перечня ВАК РФ, 12 — в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science, 5 монографий и 8 патентов.

Замечания по автореферату:


1. В тексте автореферата приведены обширные теоретические выкладки и результаты моделирования, однако объем экспериментальных данных, особенно металлографических исследований, подтверждающих формирование структуры с размером зерна 1-4 мкм, представлен достаточно сжато. Было

бы полезно увидеть более детальный статистический анализ распределения зерен по размерам для различных режимов прокатки.

2. Подписи к некоторым рисункам выполнены мелким шрифтом, что несколько затрудняет восприятие графической информации.

В заключении необходимо отметить, что несмотря на наличие некоторых замечаний, работа производит положительное впечатление, обладает научной новизной и практической значимостью, внося вклад в решение важной государственной задачи – разработку высокотехнологичных алюминиевых сплавов с улучшенными характеристиками.

19.03.2026 г. Согласен на обработку персональных данных

Доктор технических наук (1.3.8 (01.04.07) – Физика конденсированного состояния), профессор, заведующий кафедры «Обработка металлов давлением и материаловедения. ЕВРАЗ ЗСМК» ФГБОУ ВО Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ) (654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова 42, Тел. +7(3843)74-89-93, Email: arishenskiy_ev@sibsiu.ru) Арышенский Евгений Владимирович 

Подпись Е.В. Арышенского удостоверяю

Начальник отдела кадров ФГБОУ ВО СибГИУ ((3843)46-41-47, Email: otdelkadrov@sibsiu.ru)

Миронова Татьяна Анатольевна

