

## ОТЗЫВ

официального оппонента д.т.н. Галкина Сергея Павловича  
на диссертационную работу Пустовойтова Дениса Олеговича  
**«Теоретическое и технологическое обоснование применения скоростной асимметрии для повышения механических свойств листового проката»**,  
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук  
по специальности 2.6.4 Обработка металлов давлением

### 1. Актуальность темы

Проблема исследования и создания термометаллодеформационных технологий, направленных на повышение свойств металлоизделий за счёт мелкозернистого строения несомненно относится к весьма актуальным направлениям современной обработки металлов давлением и металловедения. Число работ в этой области непрерывно растет. Большинство из них выполняется на стыке металловедения и обработки металлов давлением. Определенным стимулом таких исследований является развитие методов и аппаратуры металлографического анализа, физического металловедения, а также комплексов компьютерного моделирования процессов ОМД. Вместе с тем ощущается острая нехватка исследований, посвященных созданию собственно технологий и оборудования деформационного структурирования металлов, пригодных для реального промышленного применения.

Представленная диссертационная работа направлена на решение этой проблемы в области листовой прокатки. Для измельчения зерна до 1-2 мкм и комплексного повышения свойств проката предложено использовать асимметричный процесс прокатки, который весьма перспективен для применения в производстве. В основе работы лежит теоретическое и технологическое обоснование применения листовой прокатки со скоростной асимметрией (далее ЛПСА) для повышения механических свойств проката без, или с существенно, ограниченным использованием легирующих элементов.

Важно, что тема диссертационной работы соответствует Стратегии развития металлургической промышленности РФ на период до 2030 г. (см. Приложение № 3 к этой Стратегии, а именно: Перечень важнейших инновационных научно-исследовательских разработок, рекомендуемых к реализации в период до 2030 г., п.4 *«Разработка касетных технологий производства проката разных категорий прочности из стали одного состава»*).

ЗАРЕГИСТРИРОВАНО В ОТДЕЛЕ ДЕЛОПРОИЗВОДСТВА ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова»	
за № _____	_____
Дата регистрации	19.03.2026
Фамилия регистратора	_____

**2. Научная новизна** диссертационной работы заключается в развитии теории процессов плоской асимметричной прокатки, а именно – в систематизированном описании влияния скоростной асимметрии на напряженно-деформированное состояние металла во взаимосвязи с получаемой структурой и механическими свойствами. Среди результатов, обладающих научной новизной, можно выделить следующие:

- Разработана модель оценки деформационно-кинематического состояния металла при ЛПСА с учетом влияния горизонтальных скоростей течения металла на контакте с валками и геометрии очага деформации.

- Установлено предельное соотношение для средних горизонтальных скоростей течения металла на контакте с валками, вращающимися с различными скоростями, а также предельное значение угла сдвига, являющегося функцией параметра формы очага деформации по высоте.

- Показано, что при ЛПСА увеличение деформации, а также снижение усилия прокатки достигают экстремумов при минимальной (положительной) величине опережения металла относительно валка, вращающегося с *большой* скоростью.

- Уточнены закономерности связи скоростной асимметрии с распределением моментов и мощности между приводными рабочими валками, позволяющие определить два оптимальных кинематических состояния по условиям: максимума сдвиговой деформации, когда разница относительных моментов максимальна; минимума энергии, затрачиваемой на прокатку, когда момент на приводном валке, вращающемся с *меньшей* скоростью, равен нулю.

- Предложено уточнение модели контактного трения Леванова, с учетом влияния относительной скорости скольжения металла в очаге деформации на величину удельных сил трения при листовой прокатке со скоростной асимметрией.

- Определены геометрические и температурно-скоростные условия многопроходной ЛПСА, для достижения накопленной деформации за три прохода 3,0 и более, что обеспечивает полное прохождение динамической рекристаллизации и повышение прочности низкоуглеродистых С-Mn сталей без снижения пластичности.

- Определены геометрические и кинематические условия однопроходной горячей ЛПСА, отличающиеся тем, что в очаге деформации осуществляется понижение температуры металла от точки начала ферритного превращения (на входе в очаг) до точки конца ферритного превращения (на выходе из очага), что обеспечивает динамическое формирование

мелкозернистой структуры по всей толщине листа и повышение прочности низкоуглеродистых С-Мп сталей без снижения пластичности.

**3. Значимость диссертационной работы для науки** заключается в разработке применительно к процессам листовой прокатки особых схем напряженно-деформированного состояния, совмещающих сжатие и сдвиг с одновременно протекающими в очаге деформации структурно-фазовыми превращениями, обеспечивающими повышение прочности (до 2 раз) низкоуглеродистых сталей без снижения их пластичности.

Существенное научное значение имеет описание напряженно-деформированного состояния металла при кинематически асимметричной прокатке во взаимосвязи с получаемой структурой и механическими свойствами, а также выявленные и уточненные закономерности изменения усилия и распределения моментов и мощности между приводными рабочими валками.

Значительный научный интерес представляют установленные закономерности связи параметров скоростной асимметрии с расходом энергии в очаге деформации, позволяющие оптимизировать процесс по различным критериям.

**4. Значимость диссертационной работы для практики** заключается в следующем:

- Разработано техническое задание, изготовлен и введен в эксплуатацию в лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» уникальное оборудование – уникальный стан асимметричной прокатки, имеющий статус уникальной научной установки.

- Разработана технологическая схема листовой прокатки (как холодной, так и горячей) со скоростной асимметрией, снижающая расход энергии 10-15%.

- Разработаны технологические схемы многопроходной и однопроходной листовой прокатки со скоростной асимметрией, для производства горячекатаных полос толщиной 1 ... 10 мм из высокопрочных низкоуглеродистых С-Мп сталей с ферритной матрицей со средним диаметром зерна феррита в диапазоне от 4 мкм до 1 мкм.

- Разработаны новые способы листовой прокатки со скоростной асимметрией, техническая новизна которых подтверждена 8 патентами на изобретения РФ.

- Научно-технологические положения, предложенные в диссертации, используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» при подготовке кадров высшей квалификации по направлению 2.6.4 Обработка металлов давлением.

**5. Достоверность и обоснованность основных положений, результатов и выводов диссертационной работы** подтверждается согласованностью теоретических и экспериментальных результатов работы, а также отсутствием противоречий известным положениям теории прокатки. Достоверность расчетов подтверждается применением программы конечно-элементного моделирования QForm, симулятора Gleeble 3800 для физического моделирования термомеханических процессов и дилатометрического анализа, а также применением уникальной научной установки – стана асимметричной прокатки. Достоверность полученных результатов, касающихся микроструктуры и механических свойств, подтверждается металлографическими исследованиями (оптическая и сканирующая микроскопия, EBSD анализ), а также механическими испытаниями полноразмерных опытных образцов.

#### **6. Общая оценка содержания диссертационной 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.

**В первой главе** представлен обзор современного состояния исследований в области технологий повышения механических свойств листового проката. Аргументированно показано, что измельчение ферритного зерна является альтернативой микролегированию (Nb, V, Ti, Mo и др.) низкоуглеродистых сталей повышенных классов прочности. Выполнен довольно подробный анализ перспективных технологий листовой прокатки (DIFT, DT, LDRP, SSMR, LSWD), обеспечивающих измельчение ферритного зерна до 1 мкм. Представляет интерес критическое описание первой промышленной технологии асимметричной листовой горячей прокатки SRDD с приводным и холостым валками разного диаметра в трех последних клетях чистовой группы НШПС (реализованная в Японии).

На основе выполненного обзора автор справедливо отмечает, что 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 микроструктурой и механическими свойствами низкоуглеродистых сталей с ферритной матрицей. Поэтому теория процессов листовой прокатки этого направления требует дальнейшего развития и систематизированного обобщения. Автор формулирует: 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.

**Во второй главе** приведены результаты теоретических исследований влияния скоростной асимметрии на деформированное состояние металла при плоской прокатке.

Исследования выполнены с применением аналитических и численных методов, в частности, с помощью компьютерного комплекса конечно-элементного моделирования QForm. Важно отметить, что зависимости, описывающие реологию и теплофизические свойства использованной при моделировании стали, были получены на основе предварительных экспериментов на симуляторе термомеханических процессов Gleeble 3800. Испытания проводились на сжатие и кручение в широком диапазоне температур, скоростей и степеней деформации. Это несомненно повышает достоверность результатов.

В настоящее время считается доказанным, что степень измельчения структурного строения деформированного металла напрямую связана с истинной (накопленной) деформации. В традиционной листовой прокатке истинная деформация оценивается величиной логарифмического коэффициента обжатия, т.е. практически однозначно определяется уменьшением толщины полосы.

Расчётами показано, что при асимметричной листовой прокатке скорость деформации и истинная деформация может быть существенно увеличена за счет активизации сдвиговых перемещений без изменения начальной и/или конечной толщины заготовки. Это достигается благодаря своеобразному «разрыву» скоростей течения металла в очаге деформации при асимметричной прокатке.

Полученные соотношения связи сдвиговой деформации и скоростной асимметрии позволяют управлять параметрами деформированного состояния и определять оптимальные условия.

Например, установлено, что оптимальное деформированное состояние металла в центре листа достигается при минимальной положительной величине опережения металла относительно вала, вращающегося с *большой* скоростью.

**В третьей главе** приведены результаты прямых экспериментальных исследований влияния скоростной асимметрии на напряженное состояние металла в очаге деформации, а также энергосиловые параметры (усилие, момент, мощность) процесса листовой прокатки. Для этого, в рамках диссертационной работы, был создан специализированный стан

асимметричной прокатки, получивший статус уникальной научной установки. Установлены новые закономерности распределения усилий, моментов и мощности между валками при различных соотношениях скоростей валков. Предложена уточненная модель трения Леванова, учитывающая влияние скорости скольжения металла на контактной поверхности валка.

Экспериментально показано, что при асимметричной прокатке происходит значительный рост момента на валке, вращающемся с *большой* скоростью, связанный со степенью увеличения сдвиговой деформации в обрабатываемом материале.

**Четвертая глава** посвящена исследованию деформационных и температурно-скоростных условий листовой прокатки со скоростной асимметрией, обеспечивающих измельчение зерна по механизму динамической рекристаллизации (во время деформации). Для компьютерного конечно-элементного моделирования процесса динамической рекристаллизации использованы модели Колмогорова–Джонсона–Мела–Аврами и Захири–Дэвиса–Ходжсона. Для определения доли динамически рекристаллизованных аустенитных зерен использован механический принцип определения доли разупрочнения по напряжениям, полученным из экспериментов на горячее кручение опытных образцов.

На основе выполненных расчетов и экспериментов показано, что для формирования однородной структуры со средним диаметром зерна аустенита менее 5 мкм требуется большая единичная деформация  $\varepsilon > 3$  (относительное обжатие свыше 90 %). Предложена схема широкополосной прокатки со скоростной асимметрией в последних трех клетях чистовой группы с паузами между проходами менее 1 сек и скоростью прокатки в последней клетке более 20 м/с.

Для демонстрации возможностей уникального стана показано, что асимметричной прокаткой за один проход обеспечивается эффективное измельчение ферритной структуры и полное дробление центральной ликвационной полосы.

**Пятая глава** (объем 52 стр.) посвящена изучению деформационных и температурно-скоростных условий листовой прокатки со скоростной асимметрией, обеспечивающих измельчение зерна по механизму динамического ферритного превращения. В исследованиях использованы методы дилатометрических испытаний образцов, испытаний на Gleeble 3800, металлографический анализ с применением EBSD, испытания на растяжение. Установлены связи металлофизических процессов с температурно-скоростными параметрами ЛПСА, для управления прокаткой.

Экспериментально подтверждено, что асимметричная прокатка за счет измельчения зерна феррита обеспечивает повышение предела текучести низкоуглеродистой стали до 2 раз.

**В шестой главе** приведены новые технологические решения применения скоростной асимметрии при листовой прокатке. В частности, представлено краткое описание трех технологических схем: 1) листовой прокатки со скоростной асимметрией и снижением на 10-15 % расхода энергии; 2) многопроходной листовой (рулонной) прокатки с эффектом полной динамической рекристаллизации аустенита, которая может применяться в 3 последних клетях чистовой группы высокоскоростных (при скоростях прокатки более 20 м/с) широкополосных станов горячей прокатки или литейно-прокатных агрегатов; 3) однопроходной листовой (рулонной) прокатки с полным динамическим ферритным превращением, которая может применяться на одноклетевых станах (при скоростях прокатки не более 0,5 м/с).

Новизна, изобретательский уровень и промышленная применимость технических решений подтверждена 8 патентами РФ на изобретения.

**Список использованной литературы** является достаточно полным, состоит из 307 источников (за временной период с 1941 г. по 2025 г.), при этом более половины из них (186 источников) – англоязычные. Публикации автора диссертации также представлены в списке литературы.

**Приложения** включают в себя копии документов об использовании результатов диссертации.

Основные результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались в период 2014-2025 гг. на международных российских и зарубежных конференциях, в том числе, Metal Forming, ICTP, NUMIFORM, ICSAM, ESAFORM и др. Исследования, выполненные автором диссертации, проводились в рамках выполнения работ по грантам, в частности, Мегагранта по Постановлению № 220 Правительства РФ.

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 или Web of Science, 9 – в иных изданиях, 5 монографиях и 8 патентах на изобретения РФ.

Текст диссертационной работы и автореферата оформлен в соответствии с действующими нормами. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

## **7. Замечания и вопросы по диссертационной работе:**

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

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

- Недостаточно освещена термостабильность получаемых мелкодисперсных структурных состояния, в частности, возможна ли сварка таких листов.

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

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

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

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

Данные замечания носят рекомендательный характер и не снижают положительной оценки работы в целом не снижают.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа «Теоретическое и технологическое обоснование применения скоростной асимметрии для повышения механических свойств листового проката» является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований **решена актуальная научная проблема**, заключающаяся в создании асимметричных процессов листовой прокатки с развитыми сдвиговыми компонентами напряженно-деформированного состояния и управляемыми, динамическими структурно-фазовыми превращениями, обеспечивающими повышение прочности (до 2 раз) низкоуглеродистых сталей без снижения их пластичности и без использования дополнительных легирующих элементов или отдельных операций термической обработки, что имеет важное теоретическое и прикладное значение в области листопрокатного производства.

Диссертационная работа «Теоретическое и технологическое обоснование применения скоростной асимметрии для повышения механических свойств листового проката» соответствует критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук согласно п. 9-14 «Положение о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (с дополнениями), а ее автор, Пустовойтов Денис Олегович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.4 Обработка металлов давлением.

Официальный оппонент,  
профессор кафедры обработки металлов  
давлением НИТУ МИСИС,  
доктор технических наук, профессор, докторская  
диссертация защищена по специальности  
05.16.05 Обработка металлов давлением



Галкин  
Сергей Павлович

119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1  
тел.: 8-499-230-28-56  
E-mail: galkin.sp@misis.ru

Я, Галкин Сергей Павлович, выражаю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Пустовойтова Дениса Олеговича, и их дальнейшую обработку.



Галкин Сергей Павлович

ПОДПИСАНО  
Проректор  
и общим во  
НИТУ МИСИС



И.М. Исаев