

О Т З Ы В

официального оппонента 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. Общая характеристика работы

Существующие технологические решения производства листового проката высоких классов прочности из низкоуглеродистых ($C \leq 0,25\%$) сталей с ферритной матрицей предусматривают введение в базовый химический состав таких легирующих элементов, как ниобий и молибден. Общим местом теории и практики прокатного производства является следующее положение: повысить класс прочности (при сохранении пластичности) листового проката без использования легирующих элементов невозможно.

Известно, что, в соответствии с соотношением Холла-Петча, уменьшение ферритного зерна с 10-5 мкм (10-12 балл) до 4-1 мкм (13-17 балл) может привести к двукратному увеличению предела текучести стали без изменения ее химического состава. Однако технологии, применяемые на отечественных металлургических предприятиях, позволяют получить листовой прокат с размером ферритного зерна лишь в диапазоне от 10 мкм до 5 мкм.

В основании диссертационной работы Д.О. Пустовойтова лежит идея повышения прочности при сохранении пластичности полос и листов из низкоуглеродистых сталей при прокатке в рабочих валках, вращающихся с различными окружными скоростями (т.е. в условиях скоростной асимметрии) без применения дефицитных легирующих элементов.

В ходе выполнения диссертационной работы соискателем был выполнен анализ влияния скоростной асимметрии на напряженно-деформированное состояние металла в очаге деформации, энергосиловые параметры прокатки, а также влияния деформационных и температурно-скоростных режимов листовой прокатки со скоростной асимметрией на структуру и механические

ЗАРЕГИСТРИРОВАНО В ОТДЕЛЕ ДЕЛОПРОИЗВОДСТВА ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова»	
за № _____	
Дата регистрации	10.03.2026
Фамилия регистратора	_____

свойства низкоуглеродистых сталей с ферритной матрицей; были разработаны новые технологические решения по применению скоростной асимметрии, обеспечивающие повышение прочности листового проката при сохранении его пластичности без использования легирующих элементов.

Диссертация Д.О. Пустовойтова состоит из введения, 6 глав, заключения, изложена на 294 страницах машинописного текста, включающего 190 рисунков, 46 таблиц, список литературы из 307 наименований, 3 приложения.

2. Актуальность диссертационной работы

Технологии, применяющиеся при производстве листового проката высоких классов прочности, например, S420MC, S460MC, S500MC, S550MC, S600MC, S650MC, S700MC, основаны на введении в базовый химический состав дополнительных легирующих элементов, типа Nb и Mo, и применения различных процессов термомеханической и/или термической обработки. Однако высокая стоимость ферросплавов (средние цены за 2025 г.: 43096 \$/т – феррониобий, 39763 \$/т – ферромолибден) существенно увеличивает затраты на производство листового проката высоких классов прочности. При этом ниобий, молибден и др. входят в перечень дефицитных видов твердых полезных ископаемых. Кроме того, ниобий, являясь ключевым элементом микролегирования для существующих технологий термомеханической прокатки, относится к критическому минеральному сырью в РФ, потребление которого обеспечивается на 98% за счет импорта в условиях значительных рисков поставок. В связи с этим требуется разработка новых ресурсосберегающих технологий производства листового проката высоких классов прочности без использования или при уменьшении содержания легирующих элементов. Все это делает тему диссертации Д.О. Пустовойтова весьма актуальной.

3. Научная новизна работы

К наиболее значимым результатам диссертации, отличающимся заметной научной новизной, можно отнести следующие:

а) разработана модель деформированного состояния металла при листовой прокатке в валках со скоростной асимметрией, отличающаяся

учетом влияния средних горизонтальных скоростей течения металла на контакте с валками, а также геометрических параметров очага деформации;

б) впервые установлена предельная величина соотношения скоростей металла $\frac{v_{M1}^{cp}}{v_{M2}^{cp}} \leq \frac{3}{2}$ на контакте с валками, вращающимися с различными скоростями, и угла сдвига φ_{max} , зависящего от формы очага деформации;

в) впервые установлено, что при листовой прокатке со скоростной асимметрией увеличение истинной деформации достигает максимума при минимальной положительной величине опережения металла относительно валка, вращающегося с большей скоростью;

г) определены деформационные и температурно-скоростные условия многопроходной листовой прокатки со скоростной асимметрией, обеспечивающие повышение прочности низкоуглеродистых сталей за счет полного прохождения динамической рекристаллизации при формировании мелкозернистой структуры;

д) определены деформационные и температурно-скоростные условия однопроходной листовой прокатки со скоростной асимметрией, обеспечивающие повышение прочности низкоуглеродистых сталей за счет полного прохождения динамического фазового превращения при формировании мелкозернистой структуры.

4. 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. Жилыева» двухвалковый стан листовой прокатки с индивидуальным приводом рабочих валков.

2. 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-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.

3. Теоретически и экспериментально обосновано влияние нового технологического параметра процесса горячей листовой прокатки $\left(\frac{v_1}{v_2}\right)$ на повышение класса прочности низкоуглеродистых С-Mn сталей без изменения их химического состава и применения отдельных операций термической обработки. Изменение величины скоростной асимметрии при листовой прокатке позволяет из подката одной марки стали 0,09С-1,6Mn получить 12 марок стали 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 со следующим расчетным экономическим эффектом на 1 тонну г/к проката:

- 2,2-2,9 тыс. руб. для классов прочности S420MC или HDT580F за счет экономии 0,03-0,04% ниобия по массе;

- 15,1-15,4 тыс. руб. для классов прочности S700MC или HDT760C за счет экономии 0,25% молибдена, 0,1% титана, 0,25% хрома по массе.

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

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

5. Оценка содержания диссертации, ее значимости

Диссертация Пустовойтова Д.О. представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу. В диссертации содержатся положения, развивающие теорию асимметричной листовой прокатки в валках, вращающихся с различной скоростью; показано, что асимметричная листовая прокатка повышает прочностные свойства листового проката за счёт измельчения зерна.

В главе 1 представлен исчерпывающий литературный обзор технологий для повышения механических свойств листового проката из низкоуглеродистых сталей с ферритной матрицей; эту главу можно опубликовать отдельно в качестве справочника.

В главе 2 показаны результаты экспериментальных исследований сопротивления деформации (кривых течения) низкоуглеродистых сталей и выполнен оригинальный анализ влияния скоростной асимметрии рабочих валков на величину сдвиговой деформации металла в очаге деформации, которая увеличивает суммарную деформацию металла, необходимую для измельчения зерна.

В главе 3 дается описание прокатного стана с индивидуальным приводом рабочих валков лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» МГТУ им. Г.И. Носова, на котором проводились исследования листовой прокатки со скоростной асимметрией.

Глава 4 посвящена описанию и применению математических моделей Колмогорова - Джонсона - Мела - Авраами и Захири – Дэвиса - Ходжсона для описания динамической рекристаллизации низкоуглеродистой стали. Выполнена оценка влияния параметра Зинера–Холломона Z , температуры и скорости деформации на средний диаметр динамически рекристаллизованного зерна аустенита в низкоуглеродистой стали

В главе 5 представлен анализ деформационных и температурно-скоростных условий листовой прокатки со скоростной асимметрией для измельчения зерна по механизму динамического ферритного превращения; показано, что применение скоростной асимметрии при листовой горячей прокатке позволяет получить в центре горячекатаного стального листа микроструктуру со средним диаметром зерна феррита в диапазоне 2-1 мкм.

Глава 6 посвящена описанию новых технологических разработок с применением скоростной асимметрии при листовой прокатке. Показано, что технологические возможности управления размером зерна феррита в диапазоне от 4 до 1 мкм (от балла $G = 13$ до $G = 16$) за счет применения однопроходной листовой прокатки со скоростной асимметрией с эффектом полного динамического ферритного превращения позволяют производить листовой прокат различных классов прочности из низкоуглеродистых C-Mn сталей с ферритной матрицей единого химического состава без использования

дорогостоящих легирующих элементов (Nb, V, Ti, Cr, Ni, Cu, Mo) и применения отдельных операций термической обработки.

Объем, глубина и география экспериментальной части диссертации производят сильное впечатление; результаты научно обоснованных экспериментов слаженно работают на цель диссертационной работы.

Математические выкладки, описывающие течение металла в очаге деформации при скоростной асимметрии и посвященные оценке ее влияния на величину сдвиговой и полной деформации металла в очаге деформации, оригинальны и убедительны.

Докторскую диссертацию Д.О. Пустовойтова следовало бы опубликовать (с некоторой доработкой) в качестве учебного пособия для студентов и аспирантов, обучающихся по профилю «Обработка металлов давлением».

По актуальности разработанной темы, научной новизне, теоретической и практической значимости, технико-экономической эффективности полученных результатов представленная к защите диссертация удовлетворяет требованиям ВАК Российской Федерации, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук.

Оформление диссертации отвечает требованиям ВАК.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

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 иных изданиях, 5 монографиях и 8 патентах на изобретения РФ.

6. Замечания и вопросы по диссертационной работе

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

2. На стр. 94 сказано, что «... для создания максимального угла сдвига скорости течения металла должны стремиться к скоростям валков, т.е. $v_{M_1} \rightarrow v_1$, $v_{M_2} \rightarrow v_2$...». Если условие $v_{M_2} \rightarrow v_2$ можно представить, то условие $v_{M_1} \rightarrow v_1$ явно гипотетическое – оно возможно только в случае

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

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

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

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

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

7. Заключение по работе

Представленная диссертация соответствует требованиям ВАК РФ, по своему содержанию отвечает требованиям п.9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» (утверждённого постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, с дополнениями), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук; в диссертации

изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения по асимметричной прокатке в валках, вращающихся с различными скоростями, для повышения механических свойств листового проката, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны. Считаю, что автор диссертации, Денис Олегович Пустовойтов, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.4 – Обработка металлов давлением.

Выражаю согласие на включение моих персональных данных в аттестационные документы соискателя ученой степени доктора технических наук Д.О. Пустовойтова.

Официальный оппонент
 профессор кафедры «Обработка металлов
 давлением» Федерального
 государственного бюджетного
 образовательного учреждения высшего
 образования «Липецкий государственный
 технический университет»
 д-р техн. наук, профессор, докторская
 диссертация защищена по специальности
 05.16.05 – Обработка металлов давлением
 Адрес 398055, г. Липецк, ул. Московская, д. 30
 тел.: +7 (4742) 32-81-37, раб.
 +7 (903) 867-18-81, моб.
 E- mail: Belsky-55@yandex.ru



Сергей
 Михайлович
 Бельский

