

Отзыв

официального оппонента доктора технических наук профессора Колбасникова Николая Георгиевича на диссертацию Пустовойтова Дениса Олеговича на тему «**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

Актуальность темы диссертации. Сокращение производственных издержек при сохранении качества продукции является одной из основных задач любого коммерческого предприятия. При производстве горячекатаных сталей в металлургической промышленности основным методом решения этой задачи является снижение содержания легирующих элементов, а сохранение требуемых свойств произведенной продукции осуществляется за счет управления структурой металла, которая, как известно, определяет весь комплекс прочностных, пластических и вязких свойств. Управление структурой выполняют за счет корректировки технологий термомеханической обработки (ТМО), включающей оптимизацию параметров горячей прокатки и ускоренного контролируемого охлаждения (УКО). За счет параметров горячей прокатки управляют процессами структурообразования в аустените, а при помощи параметров УКО – формированием конечной структуры при фазовых превращениях (ФП). Следует отметить, что состояние аустенита перед ФП – размер зерна и накопленное упрочнение, оказывают сильнейшее воздействие на формирование структуры и конечных свойств проката.

В течение последних десятилетий передовыми предприятиями, как в России, так и за рубежом, в этом направлении достигнуты значительные успехи, причем прорывы в технологиях обусловлены внедрением новейших научных разработок как в области технологий и оборудования, так и в использовании цифровых аналогов промышленных технологий. Новое оборудование обеспечивает дополнительные технологические возможности, а цифровые аналоги – оптимизацию технологии для поддержания на заданном уровне комплекса механических свойств при минимальных издержках на легирование и минимизацию затрат на проведение опытных работ. В диссертационной работе Д.О. Пустовойтова предложено новое решение проблемы – изменение схемы напряженно-деформированного состояния и переход от обычного симметричного очага деформации при прокатке, используемому в большинстве технологий ТМО, к асимметричному очагу с рассогласованием скоростей валков для повышения интенсивности деформаций сдвига. Поскольку структура деформируемого металла формируется в зависимости от величины сдвиговых деформаций, в конечном итоге это приводит к расширению возможностей управления структурой при совмещении пластической деформации со структурными и фазовыми превращениями. Это направление

ЗАРЕГИСТРИРОВАНО В ОТДЕЛЕ ДЕЛОПРОИЗВОДСТВА ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова»
за № _____
Дата регистрации <u>04.03.2026</u>
Фамилия регистратора _____

работ является чрезвычайно перспективным и развивается в передовых промышленно развитых странах. Для Российской Федерации эта работа является одной из первых, причем можно предполагать и надеяться, что она послужит мощным стимулом для применения асимметричной прокатки при создании инновационных технологий производства экономно легированных сталей с заданной структурой и комплексом механических свойств. В связи с этим диссертационная работа Д.О. Пустовойтова безусловно актуальна.

Новизна исследования и полученных результатов диссертации. По тексту диссертации Д.О. Пустовойтова можно выделить следующие положения:

1. Результаты теоретического анализа и компьютерного эксперимента при помощи разработанной конечно-элементной программы, которые позволили автору сформулировать утверждение о том, что асимметричная прокатка (АП) с рассогласованием скоростей прокатных валков имеет существенные преимущества для достижения больших сдвиговых деформаций по сравнению с симметричной прокаткой, и, следовательно, может служить эффективным методом управления структурой деформированного металла. Установлены параметры, позволяющие управлять величиной сдвиговых деформаций для последующего эффективного совмещения с процессами формирования структуры при термическом разупрочнении деформированного металла и последующих фазовых превращениях.

2. Для обеспечения возможности детального анализа процесса АП, исследования и разработки параметров управления этим процессом, разработан и введен в эксплуатацию одноклетьевого двухвалковый стан листовой прокатки с индивидуальным приводом рабочих валков, оснащенный необходимым комплексом измерительного оборудования. Поскольку стан обладает широким диапазоном возможностей для исследования этого вида пластической деформации, ему был присвоен статус «Уникальная научная установка», что само по себе является большим достижением в экспериментальных научных исследованиях, выполняемых в Российской Федерации.

3. При помощи уникальной научной установки и детального теоретического анализа выполнен комплекс исследований асимметричной прокатки, в том числе особенностей энергосиловых параметров АП по сравнению с симметричной, выявлены особенности распределения напряжений и контактного трения, уточнена модель трения А.Н. Леванова, использованная автором при КЭ-моделировании. Результаты исследования асимметрии скоростей прокатных валков позволяют управлять энергосиловыми параметрами АП и определить оптимальные кинематические условия достижения максимума сдвиговой деформации, что необходимо для последующей разработки технологий прокатки металла с заданной структурой и уровнем механических свойств.

4. Доказана и экспериментально подтверждена возможность и целесообразность использования динамической рекристаллизации для получения мелкозернистой структуры аустенита при горячей деформации, что возможно в прокатном производстве лишь в условиях больших сдвиговых деформаций при использовании скоростной асимметрии. Высокие значения сдвиговой деформации обеспечивает протекание динамической рекристаллизации практически по всему объему металла. Этого эффекта не удастся достичь в технологиях горячей симметричной прокатки на непрерывных или реверсивных станах – при недостаточных сдвиговых деформациях формируется неблагоприятная и трудно устранимая бимодальная структура аустенита. Охлаждение горячекатаного листа с заданной скоростью после АП с большими сдвиговыми деформациями позволяет в результате фазовых превращений получить структуру ультрамелкозернистого феррита. Показана эффективность асимметричной прокатки в межкритическом интервале температур по разработанным температурно-деформационным режимам и охлаждению в заданном интервале скоростей.

5. Доказана и экспериментально подтверждена возможность и целесообразность использования листовой прокатки со скоростной асимметрией при совмещении температурного диапазона фазовых превращений, зависящего от структурного состояния аустенита и скорости охлаждения, с температурным диапазоном прокатки, который зависит от степени, скорости деформации и теплофизических свойств деформируемого металла. Этот метод – динамическое фазовое превращение, позволяет достичь наилучших параметров структуры деформированного металла, а также комплекса прочностных, пластических и (очевидно) вязких свойств проката. Выполненный объем структурных исследований с использованием оптической, сканирующей микроскопии с применением метода анализа дифракции обратно рассеянных электронов (*EBSD*) и цифрового анализа изображений структуры наглядно доказывает это. Проведение ТМО типа «динамическое фазовое превращение» с использованием асимметричной прокатки в области средних температур (680-780 °С) не должен сопровождаться чрезмерно высокими усилиями прокатки в связи с особенностями энергосиловых параметров АП и снижением напряжений в очаге деформации за счет сбросов деформационного упрочнения, расходуемого при ФП на образование зародышей низкотемпературной фазы.

Значимость для науки и практики полученных результатов. Выполненный анализ напряженно-деформированного состояния, особенностей распределения сдвиговых деформаций по очагу деформации при асимметричной прокатке, обусловленной разностью скоростей валков при асимметричной прокатке открыл возможности достижения за 1-3 прохода огромных сдвиго-

вых деформаций, соизмеримых с процессами интенсивной пластической деформации (ИПД), недостижимых для симметричной прокатки.

Совмещение высокой интенсивности деформаций при асимметричной прокатке с фазовыми превращениями при контролируемом охлаждении позволяет разработать достаточно много промышленных технологий изготовления горячекатаных экономно легированных сталей с высоким комплексом механических свойств. В диссертации рассмотрены некоторые из них, например:

- 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;

- технологические схемы многопроходной и однопроходной листовой прокатки со скоростной асимметрией, прокатки 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;

- применение скоростной асимметрии при листовой прокатке позволяет из одной марки 0,09C-1,6Mn получить 12 разных классов прочности.

Рассмотрено также несколько других возможных применений АП для изготовления материалов с заданным уровнем механических свойств и ключевыми параметрами структуры. Техническая новизна технологических решений подтверждена 8 патентами на изобретения, которые имеют безусловные промышленные перспективы.

Обоснованность и достоверность основных положений, результатов и выводов диссертации. Обоснованность основных положений диссертации подтверждается исторической практикой развития положений теории обработки давлением, в том числе в области исследований асимметричной прокатки, а также в области развития технологий термомеханической обработки для повышения комплекса свойств стали посредством управления структурой. Использование скоростной асимметрии горячей или теплой прокатки можно считать очередным этапом развития технологий ОМД и ТМО.

Достоверность основных результатов и положений, полученных в диссертации Д.О. Пустовойтова определяется в основном системным подходом, позволяющим выполнить анализ каждого из исследуемых процессов во всех их возможных проявлениях. Большое значение имеет согласованность результатов теоретического анализа, компьютерного моделирования с помощью разработанной конечно-элементной модели (КЭ-модели), и результатов физического моделирования с использованием термомеханического симуля-

тора *Gleeble* и уникальной научной установки – одноклетьевого двухвалкового стана листовой прокатки с индивидуальным приводом рабочих валков. Получение прогнозируемых ключевых параметров структуры и механических свойств стали подтверждено комплексом металлографических методик исследования структуры и механическими испытаниями прокатанного металла.

Оценка содержания диссертации, ее завершенности в целом, замечания по оформлению. Решение сформулированных задач, необходимых для достижения поставленной в диссертации цели, выстроено в логически обоснованном порядке, начиная от анализа возможностей экономии легирующих элементов при сохранении комплекса свойств горячекатаной стали, в первую очередь за счет измельчения размера зерна. Рассмотрены некоторые технологии горячей прокатки, ориентированные в первую очередь на получение мелкозернистой структуры, в том числе:

за счет уменьшения размера зерна исходного аустенита при динамической рекристаллизации различных типов (в зависимости от температурно-деформационных параметров обработки);

при деформационно-стимулированном фазовом превращении (*DIFT*), предусматривающем приложение пластической деформации на определенной стадии фазового превращения;

при прокатке с высоким обжатием на валках большого диаметра перед началом фазового превращения (*LDRP*);

при прокатке с короткими междеформационными паузами (*SSMR*) с большой накопленной деформацией вблизи температур старта перлитного превращения A_{r1} ;

совмещение температурного интервала прокатки с интервалом фазового превращения.

Рассмотрены ограничения возможностей управления размером зерна в перечисленных технологиях, а затем показаны возможности и преимущества асимметричной прокатки в управлении размером зерна горячекатаного металла, который формируется в условиях больших сдвиговых деформаций, характерных для несимметричного очага деформации. Большие деформации обеспечивают возможности включения дополнительных механизмов термического разупрочнения в виде динамической рекристаллизации, происходящей непосредственно в очаге деформации наряду с динамическим возвратом, который сопровождает деформационное упрочнение с момента начала пластической деформации.

К сожалению, при анализе не рассмотрены причины влияния пластической деформации на конечный размер зерна, которые состоят в изменении движущих сил фазовых превращений, изменения интенсивности зародышеобразования и кинетики роста низкотемпературной фазы. Эти дополнитель-

ные исследования могли бы привести к более целенаправленному дальнейшему поиску оптимальной технологии.

Автором предпринят небольшой исторический экскурс в развитие исследований и промышленного применения асимметричной прокатки. Показано, что последние два десятилетия исследования и практическое применение технологий асимметричной прокатки направлены на раскрытие ее больших возможностей управления структурой в связи с достигаемой высокой интенсивностью деформации, сравнимых с процессами интенсивной пластической деформации (ИПГ). Отмечаются успехи, достигнутые зарубежными коллегами, которые обладают специализированными исследовательскими лабораторными установками, в исследовании возможностей АП при прокатке стали с ультрамелким размером низкотемпературной фазы, в основном ультрамелкозернистого феррита (*UFF*).

В заключение анализа современного состояния исследований в области асимметричной прокатки отмечается, что с 2001 г. японская металлургическая компания «*Nakayama Steel Works*» промышленно производит горячекатаный лист под брендом *NFG* («*Nakayama Fine Grain*») с применением технологии *SRDD*, основанной на создании скоростной асимметрии при использовании приводного и не приводного рабочих валков разного диаметра

Во II главе диссертации для описания деформированного состояния при асимметричной прокатке, как способа достижения больших сдвиговых деформаций, создана конечно-элементная (КЭ) модель в программном комплексе *QForm*. Важным условием получения достоверных результатов при КЭ-моделировании является правильное использование закона трения на поверхности раздела металл-деформирующий инструмент и определение реологических уравнений для исследуемого металла в зависимости от температуры, степени и скорости деформации. В качестве закона трения автор избрал соотношение Леванова, а для исследования реологических свойств исследуемой стали были выполнены испытания на сжатие и кручение на соответствующих модулях термомеханического симулятора *Gleeble 3800*. Кроме реологических свойств были экспериментально определены температурные зависимости теплопроводности и теплоемкости, необходимые для решения тепловых задач. Очень важно, что в КЭ-модели были использованы не табличные, а экспериментально определенные свойства исследуемой стали.

При анализе деформированного состояния при асимметричной прокатке в сравнении с симметричной прокаткой разработана модель, отличающаяся учетом влияния средних горизонтальных скоростей течения металла v_{M1}^{cp} и v_{M2}^{cp} на контакте с валками, имеющими различные скорости вращения, а также с учетом геометрии очага деформации. Показано, что важнейшим эффектом асимметричной прокатки является возможность существенного увеличения интенсивности деформации без изменения высотной деформации. А по-

скольку структура деформированного металла в основном развивается под действием деформаций сдвига, то при прокатке со скоростной асимметрией могут быть получены существенно более сложные структуры с более высокой плотностью дислокаций и существенно более высоким деформационным упрочнением за один проход при непрерывной деформации. Именно этот факт активизирует динамическую рекристаллизацию и позволяет достичь нового структурного состояния аустенита, которое в результате фазового превращения обеспечивает получение ультрамелкого зерна феррита. Установлен ряд других кинематических соотношений, характерных для листовой прокатки с различной скоростью прокатных валков.

В III главе диссертации выполнен анализ напряженного состояния и энергосиловых параметров листовой прокатки со скоростной асимметрией. При исследовании был получен ряд интересных результатов. Расчетным и экспериментальными методами показано, что усилие прокатки достигает минимальных значений при минимальных положительных значениях опережения металла относительно валка, вращающегося с большей скоростью. В сравнении с симметричной прокаткой может быть снижено в 2 и более раз. Это может обеспечить повышение обжимной способности прокатных клетей. С точки зрения достижения максимальных деформаций сдвига и формирования структуры металла это может показаться второстепенным результатом, но для теории прокатки установленные закономерности являются важным вкладом.

На первый взгляд могут показаться необычными некоторые результаты исследования энергосиловых параметров асимметричной прокатки. В частности установлено, что минимум активной мощности в очаге деформации, обеспечивается при оптимальном соотношении скоростей валков v_1/v_2 , когда один из двух приводных валков переходит в генераторный режим работы. При этом суммарная относительная мощность на двух валках при асимметричной прокатке $(N_{\text{быстр}} + N_{\text{медл}})$ оказывается меньше мощности симметричной прокатки, $(N_{\text{быстр}} + N_{\text{медл}})/2N_{\text{сим}} < 1$. Технологическая значимость этого эффекта заключается в возможности снижения на 10-15% расхода электроэнергии главных приводов в сравнении с симметричной листовой прокаткой при прочих равных условиях. Объяснение этого эффекта, возможно, заключается в более низком сопротивлении деформации, как результате динамической рекристаллизации и сопровождающего ее теплового эффекта, обеспечивающих снижение деформационного упрочнения.

В Главе IV автор определяет деформационные и температурно-скоростные условия асимметричной прокатки, обеспечивающие условия измельчения зерна аустенита непосредственно во время горячей деформации за счет динамической рекристаллизации. Отмечу, что необходимым условием

является обеспечение динамической рекристаллизации по всему объему металла, исключая образование неблагоприятной бимодальной структуры. Для определения доли динамически рекристаллизованного металла (DRX) автор использует традиционный эмпирический подход описания DRX – уравнение Колмогорова-Джонсона-Мела-Аврами (КДМА), который хорошо зарекомендовал себя при описании этого процесса. Использование другого метода – физически обоснованных моделей, описывающих образование и рост зародышей DRX , сопровождается относительными ошибками по сравнению с экспериментальными данными, соизмеримыми с эмпирическими моделями. Таким образом, применение эмпирических моделей вполне допустимо.

Чтобы уйти от многосложного экспериментального метода определения объемной доли DRX , связанного с необходимостью выполнения множества экспериментов на комплексе *Gleeble* в виде «стоп-закалки» с последующим определением размера зерна аустенита, автор использует математические методы описания характеристик DRX при минимальном количестве экспериментального материала. Методики подобного анализа изменений структуры при динамическом возврате и динамической рекристаллизации известны по работам Ходжсона и Джонаса с коллегами. Для расчета размера динамически рекристаллизованного металла использована формула Ходжсона для низкоуглеродистых марок стали.

Однако необходимо заметить, что кроме температуры и скорости деформации на размер зерна динамически рекристаллизованного металла, а также на объемную долю DRX , оказывают дополнительное влияние как исходный размер зерна аустенита, сформированный на предыдущих этапах обработки металла, так и химический состав металла, который определяет энергию активации процесса Q_{DRX} и контролирует кинетику процесса. В то же время можно полагать, что автор рассматривает стабильную исходную структуру металла перед деформацией и незначительные изменения химического состава, на что принципиально и нацелена работа, а именно – на производство стали различных категорий прочности при минимальном содержании дорогостоящих легирующих элементов. Информация о характеристиках динамической рекристаллизации, полученная в результате выполненных исследований для стали конкретного химического состава, основанная на результатах физического моделирования, была встроена в программу *QForm*. В связи с этим можно считать, что конечно-элементные расчеты процессов структурообразования при асимметричной прокатке близки к реальным.

Установлено, что структура полностью динамически рекристаллизованного металла может быть получена только при больших даже для асимметричной прокатки логарифмических деформациях, поэтому целесообразно для практической реализации использовать трехстадийную прокатку с короткими

междеформационными паузами. При одностадийной прокатке со скоростной асимметрией удастся достичь приблизительно 69% объемной доли *DRX*, обеспечить размер зерна низкотемпературной фазы порядка 2,39 мкм, однако при этом наблюдается разнотекстурность.

Наиболее важным разделом диссертации Д.О. Пустовойтова, на мой взгляд, следует считать Главу V, поскольку именно здесь описано формирование конечной структуры металла в результате асимметричной прокатки с большими сдвиговыми деформациями, последовательно или одновременно с которыми происходят процессы структурных или фазовых превращений. С сожалением необходимо отметить, что фазовые превращения, тем более происходящие в деформируемом металле, нельзя упрощенно трактовать, как замену зерна аустенита (γ -фаза) новыми зернами феррита (α -фаза), то есть как аналог динамической рекристаллизации – см. первый абзац Главы V. Это связано с тем, что в деформированном аустените, фазовое превращение, помимо образования зародышей низкотемпературной фазы и их роста, сопровождается сложными процессами перераспределения углерода, полнота которых зависит от соотношения скорости деформации и скорости диффузионных процессов. Незавершенность оттока углерода из ферритной структурной составляющей определяет уровень ее неравновесности, от которого зависят механические свойства как ферритных фаз, так горячекатаного металла в целом. В свою очередь, скорость диффузионных процессов роста зерен новой фазы и перераспределения углерода определяется химическим составом твердого раствора, плотностью дислокаций, размером зерна и др.

Для определения температур фазовых превращений в диссертации выполнены дилатометрические исследования. Определены температуры превращения при различных степенях предварительной деформации и скоростях охлаждения. Вслед за этим была выполнена серия экспериментов на комплексе *Gleeble* по исследованию влияния степени деформации в межкритическом диапазоне температур на формирование размера зерна исследуемой стали. Особое внимание было уделено температурам деформации, совпадающими с максимальной скоростью и максимальным ускорением ферритного превращения. Показано, что вследствие неравномерного распределения сдвиговой деформации структура образцов (размер зерна), деформированных сжатием на модуле *Hydrawedge*, неоднородна по сечению образцов, а минимальный размер зерна соответствует максимальным деформациям. Отмечается дополнительно, что минимальный размер зерна формируется в том случае, если деформацию выполнять при температуре, соответствующей максимальному ускорению превращения, как функции температуры. Следует заметить, что в этом разделе автору необходимо было расставить ссылки на более ранние работы других авторов, чтобы в данном случае не возникало ощущения впервые обнаруженного явления.

Дальнейшим развитием исследований формирования структуры явились эксперименты по исследованию структуры образцов, деформированных прокаткой на лабораторном стане в межкритическом интервале температур методами симметричной и асимметричной прокатки с различным соотношением скоростей вращения прокатных валков. Показаны преимущества структуры после асимметричной прокатки – увеличение сдвиговых деформаций, приводит к выравниванию структуры по толщине проката, повышению ее однородности, снижению объемной доли закалочных структур (мартенсит+бейнит) в центральном сечении по толщине в зоне возможного ликвационного перелегирования твердого раствора. Этот интересный факт не комментируется, поскольку он, как справедливо считает автор, выходит за пределы выполненной работы.

Размер зерна, полученного при асимметричной прокатке с максимальным рассогласованием скоростей (в пределах эксперимента), приводит к более мелкому размеру зерна в сравнении с деформацией сжатием на модуле *Hydrawedge* комплекса *Gleeble*, если сопоставить температурные условия проведения экспериментов. При прокатке с максимальной степенью асимметрии и охлаждения образцов на воздухе, судя по представленным данным, в структуре бейнита не наблюдается выделений цементита, см. табл. 5.6. При охлаждении в воду перлитная структура полностью замещается бескарбидным бейнитом, а при максимальной скоростной асимметрии и максимальных сдвиговых деформациях в качестве второй структурной составляющей бейнита вновь появляется цементит. Несмотря на высокое содержание феррита в структуре стали, она имеет высокую твердость, характерную для бейнитной структуры, что свидетельствует о неравновесности феррита. При охлаждении на воздухе верхняя часть образца также имеет твердость, характерную для бейнитных структур, а средняя и нижняя часть образцов по твердости лишь приближаются к бейниту.

Дальнейшее развитие исследований структуры в диссертации Д.О. Пустовойтова связано с изучением влияния скоростной асимметрии в условиях динамического ферритного превращения (ДФП). Условие динамического ферритного превращения обеспечивается за счет оригинального температурного режима прокатки, при котором температура начала деформации совпадает с температурой старта превращения, а температура окончания деформации – с окончанием превращения, когда ускорение ферритного превращения стремится к нулю. Достичь расширения температурного интервала прокатки при заданной степени высотной деформации оказалось возможным за счет регулирования скорости прокатки. Дополнительно, для установления условий, необходимых для динамического превращения, было исследовано влияние скорости охлаждения, а также степени и скорости предварительной деформации, на температурный интервал превращения. Совершенно резонно

отмечается, что магнитное превращение в стали, как превращение II-го рода, приводит к значительному повышению теплоемкости стали, что позволяет избежать чрезвычайного разогрева образцов в диапазоне температур динамического ферритного превращения, поскольку температурные интервалы этих явлений практически совпадают. Это подтверждают конечно-элементные расчеты при помощи разработанной модели. Можно лишь надеяться, что в расчетах были правильно заданы коэффициенты теплопередачи в прокатные валки, а результаты расчетов подтверждаются непосредственным измерением температуры поверхности проката.

Интересно отметить, что если температурные диапазоны фазовых превращений I-го рода (ферритного) и II-го рода (магнитного) совпадают, а в дополнение к ним в металле происходит пластическая деформация с наложением внешних напряжений и ростом внутренних напряжений за счет деформационного упрочнения, то в этот момент возможно возникновение дополнительных, так называемых *резонансных*, межатомных связей, обнаруженных и исследованных нобелевским лауреатом Л. Полингом. Если возникают дополнительные межатомные связи, это должно сопровождаться увеличением модулей упругости, а как следствие – повышением деформационного упрочнения и влиянием на все последующие процессы структурообразования. Эффект влияния этих условий деформации обнаружен и описан в технической литературе¹.

Фотографии структуры, полученные в диссертации Д.О. Пустовойтова при помощи сканирующего микроскопа, показывают, что в результате совмещенного процесса «АП+динамическое фазовое превращение» (АП+ДФП) была сформирована прекрасная структура ультрамелкозернистого феррита при наличии некоторой доли углеродонасыщенной фазы, которую можно по некоторым признакам идентифицировать, как непревращенный аустенит. Однако, чтобы точно установить природу этого структурного элемента, необходимо использовать специальные методы травления или фазового анализа. Но если вторая структурная составляющая является непревращенным аустенитом, то такую структуру можно считать бейнитной структурой типа ацикулярного феррита, который обладает прекрасным комплексом механических свойств, в том числе высокими вязкими свойствами. Ацикулярный феррит – это бейнитная структура, формирующаяся в результате распада сильноподдеформированного аустенита. Разработкой технологий термомеханической обработки сталей для получения подобной замечательной структуры занимаются специалисты передовых исследовательских центров во всем мире.

Исследования, выполненные при помощи метода *EBSD* и представленные в табл. 5.10, показывают наличие признаков турбулентного течения ме-

¹ А.И. Рудской, Н.Г. Колбасников, С.С. Торопов. Структура, пластичность и разрушение сталей. Эксперимент и моделирование. СПб. Наука. 2016. 328 с.

талла при АП – ротационной пластичности, которые обычно сопровождаются образованием новых границ деформационного происхождения. Если рассматривать движущие силы динамического ФП, то можно сказать, что энергия накопленного при непрерывной деформации деформационного упрочнения суммируется с обычными движущими силами ФП – разностью энергий низко- и высокотемпературной фаз, и расходуется на образование границ зародышей новой фазы, причем это происходит на протяжении всего температурного диапазона превращения и деформации. Именно огромное число зародышей, генерированных при динамическом ФП, обеспечивает ультрамелкое зерно, а довольно низкая температура и ускоренное охлаждение препятствует росту зерна. Образование новых границ деформационного происхождения отмечается в диссертации.

Бимодальность гистограмм распределения по углам разориентировки границ зерен (табл. 5.11) для динамического фазового превращения, совмещенного с АП, характеризует формирование именно бейнитной структуры с углами специальных границ $3-5^\circ$ и $50-55^\circ$, характерными для верхнего и нижнего бейнита. Ацикулярный неравновесный (содержащий неравновесный углерод) ультрамелкозернистый феррит формируется в сильнодеформированном металле в температурном интервале нижнего бейнита с углами разориентировки границ $\sim 55^\circ$. Эти углы, согласно исследованиям последних лет, являются дополнительными признаками верхнего и нижнего бейнита². При этом необходимо заметить, что повышение прочностных свойств стали после АП+ДФП достигается не только за счет эффекта Холла-Петча, но и за счет неравновесности (присутствия неравновесного углерода) бейнитного феррита или ультрамелкозернистого феррита.

Последняя, VI-я глава диссертации Д.О. Пустовойтова представляет собой эссе о существующих и возможно осуществимых процессах применения асимметричной прокатки. Необходимо заметить, что наибольший эффект применения АП может достигнуть именно при управлении структурой за счет ее совмещения с динамическим ФП. Особенно это важно для стали и других сплавов, требования к которым включают высокие вязкие свойства, например, трубные стали. Вполне возможно, что для разработки перспективных технологий и расширения номенклатуры по толщине и ширине проката, производимого с использованием новых технологий процессов АП, потребуются дополнительные исследования и технологические проработки, однако диссертационная работа Д.О. Пустовойтова может явиться для них базовым вариантом и примером творческого отношения к разрабатываемой тематике.

² Quantitative Structure-Property Relationships for Complex Bainitic Microstructures // Commission of European Communities ECSC Sponsored Research Project // Swedish Institute for Metals Research / SIMR Report: IM-2004-247.07. – 157 p.

Необходимо заметить, что основными итогами работы являются результаты теоретического и экспериментального исследования возможности совмещения больших сдвиговых деформаций, достигаемых за счет асимметричной прокатки, с последовательно или параллельно протекающими процессами структурообразования – динамической рекристаллизацией, деформационно-стимулированным или динамическим фазовым превращением, подкрепленные детальным исследованием формирующихся структур. Наилучший достигнутый вариант управления структурой для повышения комплекса свойств – это динамическое фазовое превращение, совмещенное с пластической деформацией методом асимметричной прокатки.

Можно ожидать, что ДФП, совмещенное с асимметричной прокаткой, должно сопровождаться сбросами деформирующих напряжений (сопротивления деформации) в связи с тем, что энергия накопленного деформационного упрочнения непрерывно расходуется на гомогенное (то есть происходящее в произвольной точке зерна аустенита) зарождение низкотемпературной фазы и последующий рост зародышей. Высокая скорость роста зародышей должна стимулироваться высокой плотностью дислокаций.

В процессах формирования ультрамелкого зерна феррита (*UFF*) при ДФП, согласно упомянутым в диссертации работам М. Хиксона и др., есть некоторые нюансы, такие как влияние исходного размера зерна, схемы напряженно-деформированного состояния, которые могут привести к снижению эффективности метода динамического ферритного превращения. Однако удачное соотношение параметров сдвига при асимметричной прокатке, геометрии очага деформации, скоростного и температурного режимов прокатки, позволило Д.О. Пустовойтову достичь результатов очень высокого уровня. Разработанный метод совмещения АП+ДФП – это новая высокая технология, которая способна заменить ряд существующих технологий ТМО – получения сплавов с высоким или повышенным уровнем свойств. Здесь можно прогнозировать явный технологический прорыв, который имеет прекрасные перспективы, но, очевидно, потребует для промышленных предприятий разработки и создания комплексов нового производственного оборудования и дополнительных технологических проработок. Диссертационная работа Д.О. Пустовойтова – законченная научная работа высокого уровня, которая обладает всеми признаками докторской диссертации.

Автореферат соответствует содержанию диссертации, освещает основные идеи и результаты исследований и разработок, представленные в диссертации. Замечаний по оформлению текста диссертации и автореферата не выявлено. Повторение рисунков изменения теплоемкости от температуры оправдано удобством восприятия материала.

Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати. Основные положения диссертации опубликованы в 50

научных публикациях, из них 16 – в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, 12 – в изданиях, входящих в наукометрические базы данных «Scopus» и «Web of Science», 9 – в других изданиях, 5 монографий и 8 патентов на изобретения РФ. Результаты работы были представлены на многочисленных международных и российских конференциях. В диссертацию включены результаты выполнения работ по грантам Президента РФ, ФЦП Минобрнауки РФ, Мегагранта по Постановлению №220 Правительства РФ.

Замечания. Несмотря на общее сугубо положительное отношение к диссертации Д.О. Пустовойтова, необходимо высказать некоторые замечания.

1. В данной работе речь идет об очень больших сдвиговых деформациях, достигаемых в очаге деформации при асимметричной прокатке. Математическое моделирование при помощи конечно-элементных программ является эффективным методом исследования, который показывает хорошие результаты при правильном экспериментальном определении реологических свойств металла. Однако, методы физического моделирования *больших деформаций*, в том числе на лучшем термомеханическом симуляторе *Gleeble*, использованные в диссертации, могут иметь большие погрешности. Это касается, в том числе, методик, применяемых на модулях *Torsion* – при больших углах закручивания, несмотря на небольшие вспомогательные деформации растяжения, может нарушаться устойчивость пластической деформации. При этом на образцах формируются «узелки», в которых сосредоточивается деформация, не развиваясь по всему образцу. Некоторые фотографии деформированных образцов на рис. 2.8 свидетельствуют об этом. При этом зависимости истинных напряжений $\sigma(\epsilon)$ выглядят не столь идеально, как представлено в диссертации. Дополнительно, при кручении распределение деформаций по толщине рабочей части образца неоднородно при изменении радиуса R , см. формулу (2.34). В связи с этим непонятно, а в тексте диссертации не указано, как определяли величину деформации при построении реологических зависимостей – принимали максимальную или среднюю по образцу.

2. Методы математического и физического моделирования процессов ОМД базируются на гипотезе единой кривой, которая предполагает, что зависимость интенсивности напряжений от интенсивности деформаций не зависит от схем напряженного состояния. На протяжении многих десятилетий эта гипотеза поддерживалась и поддерживается в настоящее время большинством специалистов в области механики сплошной среды и теории обработки металлов давлением, но некоторый скепсис в ее справедливости у многих специалистов присутствовал всегда. Несмотря на то, что исследования были выполнены Людвигом и Шоем (1925 г.) для относительно небольших деформаций, результаты обобщались и для развитых пластических деформаций, характерных для промышленных технологических процессов. Однако, в по-

следнее десятилетие, благодаря развитию экспериментальных методов исследования больших деформаций, в том числе истинных деформаций после потери устойчивости и образования шейки при растяжении, гипотеза единой кривой опровергается именно для высоких степеней деформации. При этом в области малых деформаций эта гипотеза остается приблизительно справедливой. Различия интенсивности напряжений в зависимости от температуры, скорости деформации и коэффициента жесткости напряженного состояния могут достигать больших значений³. При этом гипотеза единой кривой выполняется приблизительно до 15% параметра Одквиста, что на диаграмме условных напряжений близко к деформации, соответствующей потере устойчивости пластической деформации (образованию шейки при одноосном растяжении или пределу прочности в условных напряжениях). Отмечается, что чем более отрицательным становится значение коэффициента жесткости k_2 , тем выше уровень деформационного упрочнения, что должно приводить к формированию более мелкого зерна. Таким образом, при формировании структуры сказывается дополнительное влияние гидростатических напряжений. Экспериментально это было подтверждено при моделировании формирования структуры на комплексе *Gleeble* режимов прокатки в калибрах на рельсобалочном стане. В связи с этим результаты КЭ-моделирования формирования структуры, а точнее – размера зерна аустенита, с использованием асимметричной прокатки было бы крайне целесообразно подтвердить металлографически. Методы исследования исходного зерна аустенита непросты, но вполне осуществимы.

3. Не совсем понятны утверждения автора о том, что при симметричной прокатке наблюдаются только деформации сжатия, а сдвиговая деформация, в отличие от асимметричной прокатки, отсутствует, а также о том, что при симметричной прокатке не происходит проработки структуры средней части проката (по толщине). Не ясны причины, по которым в диссертации не приведены графики распределения интенсивности деформаций по очагу деформации при симметричной и асимметричной прокатке, полученные при помощи КЭ-модели. Они могли бы дать дополнительную качественную и количественную информацию о преимуществах АП. А проработка структуры

³ 1) Д.Л. Осетров «Идентификация прочностных характеристик металлов и сплавов при больших деформациях и неоднородном напряженно-деформированном состоянии с учетом сил инерции и трения» // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук по специальности 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры. Национальный исследовательский нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2019.

2) Н.В. Бердин. «Формирование микрокристаллической структуры в титановом сплаве ВТ5-1 при горячей деформационной обработке». Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов. М. МАИ. 2020.

по толщине проката зависит, как известно, от показателя формы очага деформации, а при прокатке средне- и тонколистового горячекатаного листа средняя часть прорабатывается хорошо. Об этом свидетельствует однородная равномерная структура после горячей прокатки листа средних и малых толщин.

4. При рассмотрении и описании различных типов динамической рекристаллизации автор ограничивается эмпирическим описанием при помощи уравнения Колмогорова (КДМА), полагая что этот процесс происходит за счет диффузионных процессов образования зародышей и их роста по аналогии со статической рекристаллизацией, причем независимо от температурно-скоростных условий деформации. Однако, большинство исследователей считают, что диффузионный механизм динамической рекристаллизации возможен только при высоких температурах и малых скоростях деформации, поскольку и образование зародышей, и их рост, контролируются диффузионными процессами. Как известно, диффузионные процессы развиваются во времени и зависят *экспоненциально* от температуры и химического состава сплава. Кстати, низкое содержание углерода, а также высокая концентрация марганца (и немного кремния) повышают энергию активации и тормозят диффузию в стали. Понижение гомологической температуры деформации до $(0,55-0,6)T_{пл}$, то есть 700-800 °С, экспоненциально снижает скорость диффузии и приводит к невозможности *диффузионного механизма* динамической рекристаллизации, происходящей непосредственно в очаге деформации при времени прохождения очага деформации, составляющей сотые доли секунды.

Между тем известно, что образование границ, то есть зародыша рекристаллизации, возможно как диффузионным, так и сдвиговым путем, тем более что при АП сдвиговые деформации значительно больше, чем при симметричной прокатке. Сдвиговым путем образуются границы при мартенситном или бейнитном превращениях, а также при ротационной пластичности, что установлено экспериментально⁴, а энергетическое условие образования новых границ известно. Сдвиговым путем границы могут быть образованы при низких температурах, причем скорость их образования идет со скоростью пластической деформации.

Суть замечания состоит в том, что более глубокий анализ процессов структурообразования с позиций представлений физического металловедения мог бы украсить диссертацию, придав более физически обоснованный характер.

5. Автор в диссертации исследует энергосиловые характеристики симметричной и асимметричной прокатки, рассуждает о выполнении закона со-

⁴ В.И. Владимиров, А.Е. Романов. Дисклинации в кристаллах. Наука. 1986. 226 с.

В.В. Рыбин. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М. Металлургия. 1986. 224 с.

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

6. Бросается в глаза и режет слух легковесность некоторых суждений автора, которую он допускает в ряде случаев, очевидно цитируя «более ранних авторов». Это касается, во-первых, уже упомянутых высказываний о фазовых превращениях, происходящих в деформируемом или деформированном металле, как замене зерна аустенита (γ -фаза) новыми зернами феррита (α -фаза) по аналогии с динамической рекристаллизацией.

Во-вторых, проводя аналогию асимметричной прокатки с радиально-сдвиговой прокаткой (РСП), автор утверждает, что «металл глубоко уплотняется». Это означает, что и при РСП, и при АП, можно получить металл, *значительно более плотный*, чем его табличная плотность?

В главе 6 рассматривается технологическая схема совмещенного процесса непрерывного литья сверхтонкой полосы в двухвалковый кристаллизатор и однопроходной листовой прокатки со скоростной асимметрией, рис.6.6. Необходимо заметить, что процесс разливки жидкой стали в валки-кристаллизаторы по технологии, разработанной для завода в г. *Crawfordsville* (Индиана, США) на агрегате *Castrip LLC*, очень сложен, а на разработку узла разливки фирмой *Nucor Steel* были инвестированы огромные средства.

В итоге, некоторые высказанные замечания носят рекомендательный характер и имеют целью дальнейшее совершенствование выполняемых расчетных и экспериментальных работ, а последние призывают автора уделять большее внимание физическим аспектам процессов, происходящих при пластической деформации, совмещенных с фазовыми превращениями. Можно утверждать, что это может дать еще более эффективное достижение поставленных задач управления структурой и свойствами металлов при термомеханической обработке.

Заключение. Диссертация Пустовойтова Дениса Олеговича, выполненная на тему «**Теоретическое и технологическое обоснование применения скоростной асимметрии для повышения механических свойств листового проката**» является научно-квалификационной работой, в которой в результате выполненного автором *большого объема теоретических изысканий и экспериментальных исследований, в том числе с использованием специально созданной уникальной научной установки, разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать, как новое*

научное достижение, а именно – как разработку научных основ применения скоростной асимметрии, совмещенной с последующими или одновременно протекающими процессами структурных и фазовых превращений, для эффективного управления структурой и свойствами деформируемых металлов, существенного повышения комплекса свойств сталей при экономии легирующих элементов.

Можно констатировать, что обосновано и подготовлено решение проблемы разработки **новых промышленных технологий**, совмещающих асимметричную прокатку, обеспечивающую большие сдвиговые деформации, с процессами контролируемого охлаждения, что имеет важное научно-практическое значение для производства сталей с высоким комплексом механических свойств при одновременном сокращении издержек на производство продукции в металлургии.

По своей актуальности, новизне, научно-практической значимости диссертация Д.О. Пустовойтова на тему «**Теоретическое и технологическое обоснование применения скоростной асимметрии для повышения механических свойств листового проката**» соответствует требованиям, 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 (в редакции Постановлений Правительства РФ от 21.04.2016 № 335, от 02.08.2016 № 748, от 29.05.2017 № 650, от 28.08.2017 № 1024, от 01.10.2018 № 1168), а ее автор Денис Олегович Пустовойтов достоин присуждения искомой ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.4. Обработка металлов давлением.

Официальный оппонент

профессор высшей школы физики
и технологии материалов института
машиностроения, материалов и транспорта
Санкт-Петербургского политехнического
университета Петра Великого
д.т.н., профессор

Колбасников Николай Георгиевич

Специальность 05.16.05 - Обработка металлов давлением.
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29.
М.т. +79213694531; e-mail: kolbasn_ng@spbstu.ru.
Согласен на обработку персональных данных с подписью.

