

На правах рукописи

МУНТИН АЛЕКСАНДР ВАДИМОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ ТОЛСТОГО ЛИСТА
С ЗАДАНЫМИ СВОЙСТВАМИ ИЗ ТРУБНЫХ МАРОК СТАЛИ
НА СТАНЕ 5000**

Специальность 05.02.09. – Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана.

Научный руководитель: Колесников Александр Григорьевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Московский государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана»,
кафедра «Оборудование и технологии прокатки»

Официальные оппоненты: Шаталов Роман Львович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Московский государственный
машиностроительный университет (МАМИ)»
/Университет машиностроения/, кафедра «Машины и
технологии обработки металлов давлением»

Мухин Юрий Александрович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный
технический университет» /Металлургический
институт/, кафедра «Обработка металлов давлением»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет»

Защита диссертации состоится «22» 01 2015 г. в 14 час. 30 мин.
на заседании диссертационного совета Д 212.141.04 при Московском
государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу:
105005, г. Москва, 2-ая Бауманская, 5.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим
высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана
и на сайте www.bmstu.ru.

Телефон для справок: 8 (499) 267-09-63.

Автореферат разослан «11» 12 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент

Семенов В.И.



3 111

Актуальность работы. В последние десятилетия в России для быстрой и экономической транспортировки углеводородного сырья реализованы и продолжают реализовываться проекты по строительству трубопроводов. Среди них Nord Stream длиной 1200 км по дну Балтийского моря, Южный поток – 900 км по дну Чёрного моря, Бованенково-Ухта 1100 км в условиях сурового северного климата и др.

Наряду с увеличением мощностей перекачивающих станций возникает **проблема** производства труб большого диаметра (до 1420 мм) с увеличенной (до 50 мм) толщиной стенки, с повышенными механическими, эксплуатационными и технологическими характеристиками. За последние 15 лет для полного замещения импорта труб данного сортамента в металлургическую отрасль России привлечены значительные инвестиции (около 360 млрд. руб.). На одном из крупнейших трубных предприятий страны ОАО «Выксунский металлургический завод» с целью обеспечения потребности в собственной толстолистовой заготовке для производства труб большого диаметра в 2011 году запущен в эксплуатацию прокатный стан 5000.

Стан 5000 предназначен для производства листа по технологии контролируемой прокатки, которая является эффективным, но одновременно сложным способом, ввиду большого числа технологических факторов, влияющих на получение проката заданного качества. В числе таких факторов необходимо отметить деформацию, скорость, междеформационные паузы и температуру при прокатке. Учёт этих факторов на этапе разработки технологии прокатки новых видов продукции требует многочисленных и дорогостоящих экспериментов на действующем промышленном оборудовании. В то же время эффективно выполненные предварительные исследования могут позволить значительно уменьшить количество промышленных экспериментов и снизить затраты на подготовку к массовому производству.

Из предварительных исследований, применяемых в настоящее время при разработке технологии контролируемой прокатки, наиболее эффективными являются математическое моделирование, физическое моделирование структурного состояния металла, а также прокатка на лабораторных станах. Однако каждый метод в отдельности не позволяет в полной мере раскрыть картину формирования структуры и свойств металла при прокатке на стане 5000.

В связи с этим актуальным является вопрос разработки комплексного подхода к предварительным исследованиям, направленного на снижение затрат на промышленные эксперименты при разработке новых технологий производства толстолистого проката.

Объектом исследования является листопрокатное производство.

Предметом исследования является технология получения толстолистого проката требуемого качества для производства труб большого диаметра.

Целью работы является обеспечение требуемого уровня механических свойств толстолистного проката классов прочности K52-K60 толщиной от 10 мм при прокатке на стане 5000.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Анализ современных технологических схем производства толстолистного проката и подходов к освоению новых видов продукции;

2. Разработка в программном комплексе DEFORM конечно-элементной модели прокатки слэба на стане 5000 и исследование с её помощью особенностей распределения деформации и температуры по сечению раската;

3. Исследование влияния напряжённо-деформированного и теплового состояния металла на рекристаллизационные процессы в черновой стадии прокатки с помощью имитационного комплекса Gleeble 3800;

4. Сравнительный анализ влияния температурного режима на механические свойства листа при чистовой прокатке на лабораторном стане дуо 300 и промышленном стане 5000;

5. Разработка методики выбора технологических режимов прокатки толстого листа из трубных марок сталей, обеспечивающих требуемый уровень механических свойств;

6. Разработка технологии производства листового проката классов прочности K52-K60 на стане 5000 ОАО «Выксунский металлургический завод».

Получены следующие результаты, характеризующиеся **научной новизной**:

1. Впервые на основе анализа распределения накопленной эквивалентной деформации и температуры, а также междеформационных пауз при прокатке экспериментально, в условиях комплекса Gleeble 3800, установлена зависимость распределения доли статически рекристаллизованного зерна по сечению раската от величины деформации в черновой стадии;

2. Установлено, что при прокатке слэба толщиной 355 мм на лист толщиной 30,5 мм на стане 5000 максимально возможные единичные обжатия в черновой стадии (от $\approx 6\%$ до 13% при производстве однократного листа и от $\approx 4\%$ до 11% – двукратного) формируют среднюю долю статически рекристаллизованного зерна на расстоянии $\frac{1}{4}$ от поверхности раската более 90% в обоих случаях, в середине сечения раската – 82% для однократного слэба и 55% для двукратного;

3. Предложена и реализована на ОАО «Выксунский металлургический завод» научно обоснованная методика предварительных исследований, направленная на снижение затрат при освоении технологии прокатки на стане 5000 толстого листа из трубных марок сталей с заданными механическими свойствами, основанная на использовании данных о распределении деформаций, температуры и доли рекристаллизованного зерна по сечению раската, а также особенностях физического моделирования контролируемой прокатки.

Практическая значимость и реализация результатов работы:

1. Предложенная методика исследований позволяет снизить затраты на разработку технологии производства новых видов продукции до 15 млн. руб./год за счёт снижения количества промышленных экспериментов;

2. Разработана и освоена технология производства на стане 5000 ОАО «Выксунский металлургический завод» толстолистового проката классов прочности K52-K60 различной заданной толщины от 10 до 30,5 мм. По разработанной технологии произведено 213 тыс. тонн листа. Экономический эффект от внедрённой технологии составляет 84 405 946 руб./год;

3. Рекомендации по характеристикам лабораторного прокатного стана использованы при подготовке технического задания для лабораторного стана, планируемого к установке на ОАО «Выксунский металлургический завод».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийской конференции молодых специалистов во ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина». Москва, 2010 г., Российской конференции ИМЕТ РАН. Москва, 2011 г., IX Конгрессе прокатчиков. Череповец, 2013 г., конференции «Будущее машиностроения России». Москва, 2013 г., конференциях молодых специалистов Объединённой металлургической компании. Выкса, 2011–2014 гг., Международной конференции Metal. Брно (Чехия), 2014 г., на научных семинарах кафедры оборудования и технологий прокатки МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2010–2014 гг.

Методы исследований и достоверность результатов. Достоверность результатов исследований обеспечивалась применением стандартных методов с использованием современного оборудования. Для теоретического исследования процесса деформации металла в работе применяли программный комплекс DEFORM. Экспериментальные исследования доли рекристаллизованного зерна проводили на имитационном комплексе Gleeble 3800. Влияние режимов деформации на формирование микроструктуры и свойств стали исследовали после прокатки на лабораторном стане дуо 300. Механические свойства стали определяли по стандартным методикам на оборудовании компании Zwick/Roell. Обоснованность теоретических выводов и результатов экспериментальных исследований подтверждена результатами производства промышленных партий листа на стане 5000 ОАО «Выксунский металлургический завод».

Личный вклад автора. Мунтин А.В. лично провел анализ современных технологических тенденций производства толстолистового проката и подходов к освоению новых видов продукции, разработал конечно-элементную модель прокатки на стане 5000, исследовал распределение деформации, температуры и доли рекристаллизованного зерна по сечению раската, провёл сравнительный анализ влияния температурного режима на механические свойства листа при чистовой прокатке на лабораторном стане дуо 300 и промышленном стане 5000, разработал методику выбора технологических режимов прокатки толстого листа из трубных марок сталей, обеспечивающих требуемый уровень механических свойств, участвовал в разработке и освоении технологии производства листового проката трубного назначения классов прочности K52-K60 на стане 5000 ОАО «Выксунский металлургический завод».

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 12 научных работах общим объёмом 1,17 п.л., в том числе – 5 статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ, и одной заявке на патент РФ (№2013154377).

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы из 133 наименований. Работа изложена на 141 странице машинописного текста, содержит 80 рисунков и 28 таблиц.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю доктору технических наук, профессору А.Г. Колесникову, сотрудникам Инженерно-технологического центра ОАО «Выксунский металлургический завод», Центра трубных сталей и сварных конструкций ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, кафедры «Оборудование и технологии прокатки» МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также Л.И. Эфрону, Г.С. Никитину и А.Г. Зинягину за содействие в выполнении работы и ценные замечания по содержанию диссертации.

Во введении обоснована актуальность исследований, сформулированы цели и задачи работы, определены научная новизна и практическая значимость.

В первой главе рассмотрены и проанализированы требования, предъявляемые к трубным сталям, особенности технологии производства толстого листа, а также современные подходы к разработке новых технологий.

Во второй главе выбраны и обоснованы материалы, методы и оборудование теоретических, лабораторных и промышленных исследований. В качестве материала выбраны микролегированные стали, применяемые для труб большого диаметра классов прочности K52-K60 (Таблица 1).

Таблица 1.

Химический состав исследуемых сталей

Марка стали	Содержание элементов в % по массе										
	C	Mn	Si	P	S	N	Ni	Cu	Al	Ti	Nb
K52-K56	0,10	1,45	0,40	≤0,010	≤0,005	≤0,010	-	-	0,030	0,020	0,040
K60	0,07	1,70	0,25				0,17	0,16	0,030	0,020	0,055

В третьей главе изложены результаты исследований распределения деформации, температуры и доли рекристаллизованного аустенитного зерна по толщине раската при различных режимах прокатки.

В программном комплексе DEFORM спроектирована симметричная двумерная конечно-элементная модель плоской прокатки на стане 5000 (Рис.1). Пластическая модель слэба сформирована из 4-х узловых элементов, модель вала – абсолютно жёсткая. Исходную температуру слэба приняли равной среднемассовой температуре выдачи из печи (1150°C). Для обеспечения стабильного захвата в начальный момент прокатки использован толкатель.

Оценку результатов моделирования проводили по накопленной эквивалентной деформации, т.к. этот параметр позволяет наиболее полно учесть изменения линейной и сдвиговой составляющих деформации:

$$\varepsilon_e = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_x^2 + \frac{1}{4} \gamma_{xy}^2}$$

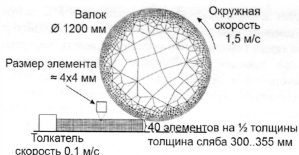


Рис. 1. Схема конечно-элементной модели стана 5000

Расчёт прокатки сляба толщиной 300 мм с обжатием 10% в изотермических условиях показал, что минимальная накопленная эквивалентная деформация формируется в середине раската. Далее при движении к поверхности она растёт вплоть до максимального значения, расположенного на расстоянии около 1/8 толщины от поверхности раската. Далее ближе к поверхности наблюдается снижение (Рис.2а). При этом существенный вклад в неравномерность накопленной эквивалентной деформации вносит сдвиговая составляющая за счёт изменения направления в очаге прокатки (Рис.2б).

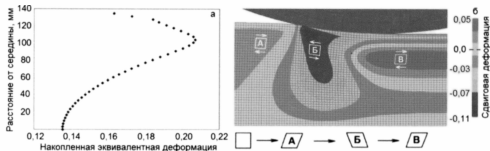


Рис. 2. Распределение накопленной эквивалентной деформации после обжатия 10% (а) и изменение сдвиговой деформации в очаге прокатки (б)

На практике перед прокаткой формируется градиент температур по сечению сляба за счёт охлаждения поверхности при транспортировке от печи к клети и в окалиноломателе. На распределение деформации также влияет теплопередача между валком и заготовкой во время прокатки и деформационный разогрев металла. Расчёт неизотермической задачи показал, что температура поверхности сляба перед прокаткой составляет около 1000°С. При этом по сравнению с изотермической задачей после прохода деформация поверхностных и приповерхностных слоев снижается, внутренних – увеличивается, положение слоя с максимальной деформацией смещается ближе к середине раската.

При многопроходной прокатке температура поверхности снижается при контакте с валками в каждом проходе до $\approx 965^{\circ}\text{C}$ и восстанавливается до $\approx 1000^{\circ}\text{C}$ во время междеформационной паузы. Температура середины сляба

повышается за счёт деформационного разогрева на 3-5°С за проход. Снижение среднемассовой температуры слэба происходит за счёт подповерхностных слоёв (Рис.3б). Расчёты также показали, что неравномерность деформации по толщине раската выше при прокатке за большее количество проходов. При этом минимальная накопленная деформация (в середине раската) практически не зависит от количества проходов. При большем количестве проходов увеличивается максимальное значение накопленной эквивалентной деформации за счёт многократной разнонаправленной сдвиговой деформации (Рис.3а).

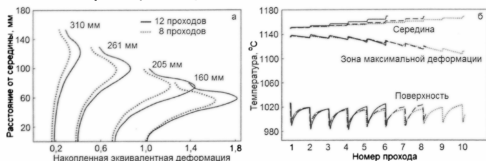


Рис. 3. Распределение накопленной эквивалентной деформации при прокатке слэба толщиной 355 мм на толщину 160 мм за 8 и 12 проходов (а) и изменение температуры раската при прокатке за 6, 8 и 10 проходов (б)

Подробные данные о температуре, эквивалентной деформации и скорости деформации, полученные в результате моделирования, использованы для экспериментального определения доли рекристаллизованного зерна в различных слоях по толщине проката с помощью испытаний на сжатие в условиях комплекса Gleeble 3800. Слэб условно разделили на 9 слоёв по толщине, каждому из которых соответствовало отдельное испытание на цилиндрическом образце. При этом образец деформировали на величину, равную накопленной эквивалентной деформации в соответствующем слое.

Такой подход позволяет повысить точность определения доли рекристаллизованного зерна по сравнению с традиционным экспериментом, где для имитации деформации всего слэба используется только один цилиндрический образец, подвергаемый истинной деформации, рассчитанной по величине обжатия в клети прокатного стана. Необходимо отметить, что ввиду малых обжатий в черновой стадии прокатки на стане 5000 не создаются условия для протекания динамической рекристаллизации, поэтому в работе исследована доля статически рекристаллизованного зерна, которую определяли на Gleeble 3800 методом двойного сжатия цилиндрического образца диаметром 10 мм и высотой 15 мм. Этот метод основан на сильной структурной чувствительности предела текучести стали. Суть испытания заключается в определении степени разупрочнения металла в ходе изотермической выдержки между двумя деформациями. Повторное сжатие проводили через 1 секунду после первой деформации. Для определения доли разупрочнения рассчитывали

отношение между упрочнением, вызванным первой деформацией, и разупрочнением в процессе выдержки:

$$X_{SS} = \frac{\sigma_M - \sigma_2}{\sigma_M - \sigma_1}$$

где X_{SS} – доля статического разупрочнения, σ_M – напряжение перед разгрузением образца, МПа; σ_1 – предел текучести в исходном состоянии, МПа; σ_2 – предел текучести при повторном нагружении, МПа.

Вклад процесса рекристаллизации в статическое разупрочнение рассчитывали по формуле:

$$X_{SRX} = \frac{X_{SS} - X_R}{1 - X_R}$$

где X_{SRX} – доля статически рекристаллизованного металла, X_R – доля разупрочнения вследствие процессов возврата и полигонизации.

Результаты эксперимента показали значительную неравномерность доли рекристаллизованного зерна в направлении толщины (Рис.4). Наибольшая степень рекристаллизации наблюдается на ¼ толщины (слои 3 и 7). При этом зона максимальной деформации располагается чуть ближе к поверхности (слои 2 и 8), но рекристаллизация в них затруднена по причине снижения температуры. Низкая температура также способствует практически полному отсутствию рекристаллизации на поверхности раската (слои 1 и 9).

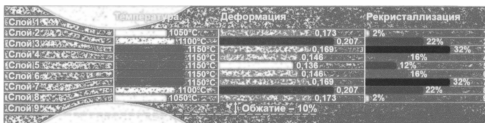


Рис. 4. Распределение температуры, накопленной эквивалентной деформации и доли рекристаллизованного зерна по толщине – обжатие 10%

Полученные при выполнении моделирования в DEFORM и эксперимента на Gleeble 3800 данные о распределении деформации, скорости деформации, температуры и доли статически рекристаллизованного зерна интегрированы в специализированную модель расчёта рекристаллизации в черновой прокатке микролегированных сталей, разработанную в Центре исследовательских лабораторий ОАО «ВМЗ». Применение этого инструмента позволяет очертить круг допустимой разнородности и возможные ограничения по количеству черновых проходов в промышленных условиях.

В четвёртой главе рассмотрены особенности физического моделирования контролируемой прокатки и выявлены критерии, необходимые для планирования эксперимента по контролируемой прокатке на лабораторном прокатном стане, а также исследовано влияние режимов чистовой прокатки на микроструктуру и механические свойства стали.

На основе теории подобия и металловедческих основ контролируемой прокатки выявлены критерии, представленные в Таблице 2.

Таблица 2.

Критерии физического моделирования контролируемой прокатки

Критерий	Параметры прокатки	Микроструктура
Черновая прокатка		
$\left(\frac{H_{cp}}{l_d}\right)_m = \left(\frac{H_{cp}}{l_d}\right)_n$	Деформационное подобие, определение геометрического множителя подобия n	Подобие процессов, влияющих на рекристаллизацию
$\varepsilon_m = \varepsilon_n$		
$v_m = \frac{v_n}{n}$	Подобие скоростей деформации	
$\tau_m = \tau_n$	Подобие междеформационной паузы	Подобие статической рекристаллизации
Чистовая прокатка		
$\left(\frac{H_{cp}}{l_d}\right)_m = \left(\frac{H_{cp}}{l_d}\right)_n$	Деформационное подобие	Подобие наклепа аустенитного зерна

На основе выявленных критериев и для их наиболее близкого выполнения рекомендованы следующие характеристики лабораторного прокатного стана: диаметр валков – не менее 700 мм, ширина бочки – не менее 500 мм, поперечное сечение заготовки – не менее 200 x 300 мм. Предложенные характеристики приняты ОАО «Выксунский металлургический завод» в виде рекомендаций при составлении технического задания на новый лабораторный прокатный стан.

Лабораторный прокатный стан дуо 300 обладает следующими характеристиками: диаметр валков – 300 мм, ширина бочки валка – 250 мм, максимальный раствор – 110 мм, максимальная скорость прокатки – 0,3 м/с. Правомерность применения стана с подобными характеристиками и соответствующими допущениями определяли экспериментальным путём.

Для проведения эксперимента в лабораторных условиях выплавляли заготовки размером 80x80x150 мм. Заготовки прокатывали на стане дуо 300 и получали полосы толщиной 12 мм за две стадии: черновая (3 прохода) и чистовая (4 прохода). Черновая стадия проводилась сразу после нагрева до 1170°C. В чистовой стадии каждой заготовке соответствовал определённый интервал температур – прокатку начинали при 800-900°C, заканчивали при 730-830°C.

Для проведения промышленного эксперимента в условиях конвертерного производства ОАО «НЛМК» произведены слябы размером 250x1850x3400 мм. Слябы прокатывали на стане 5000 и получали листы толщиной 12 мм, шириной 3150 мм за две стадии: черновая (12 проходов) и чистовая (7 проходов). Температурные режимы черновой и чистовой стадий соответствовали температурам при лабораторном эксперименте.

По результатам механических испытаний установлено, что прокатка в исследованном диапазоне температур чистовой стадии позволяет на данном химическом составе достигать требований сталей классов прочности от K52 до K56 (Рис.5а) с высоким уровнем ударной вязкости при отрицательных температурах (Рис.5б). Более высокая прочность достигается путём понижения температуры чистовой прокатки.

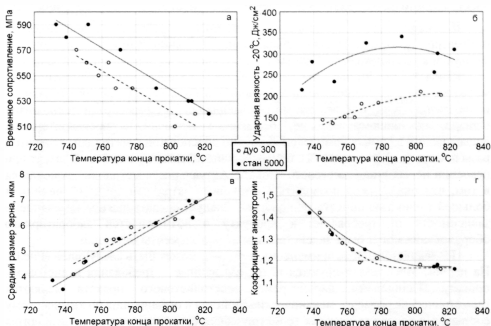


Рис. 5. Сравнение механических свойств и параметров ферритного зерна после прокатки на стане дуо 300 и стане 5000

Причинами упрочнения являются уменьшение среднего размера зерна феррита с ≈ 7 мкм при $T_{\text{кп}} = 820^\circ\text{C}$ до ≈ 4 мкм при $T_{\text{кп}} = 740^\circ\text{C}$ (Рис.5в), а также повышение плотности дислокации в феррите – коэффициент анизотропии меняется от 1,1 до 1,4 (Рис.5г). Микроструктура представляет собой ферритно-перлитную смесь с выраженной полосчатостью. При большой суммарной деформации ниже температуры начала γ - α превращения ($\leq 770^\circ\text{C}$) ферритные зерна мелкие и имеют вытянутую форму. При окончании прокатки выше γ - α превращения зёрна крупнее и практически равноосные.

Разница между прочностными характеристиками лабораторного и промышленного проката составляет около 20 МПа (не более 4%), а размером зерна не более 0,5 мкм (в среднем около 5%). Значительное отличие отмечено в результатах испытания на ударную вязкость – в 1,5 раза выше на промышленных образцах. Этот факт объясняется повышенным содержанием серы и азота при выплавке в лабораторных печах (S – 0,005%, N – 0,010%) по сравнению с

промышленными плавками ($S - 0,001\%$, $N - 0,006\%$). Тем не менее результаты лабораторных прокаток позволяют провести нижнюю оценку механических свойств и подтвердить возможность прокатки в промышленных условиях.

Таким образом, проведённые эксперименты подтверждают правомерность применения критериев и допущений, предложенных для физического моделирования контролируемой прокатки, а также возможность применения лабораторного стана дуо 300 для моделирования прокатки в условиях стана 5000.

В пятой главе представлена методика разработки технологических параметров на основе предварительных исследований и примеры реализации методики в условиях стана 5000 ОАО «Выксунский металлургический завод».

Каждый из этапов предварительных исследований: математическое моделирование, эксперименты на Gleeble и лабораторном прокатном стане – позволяют получить эффективные рекомендации для разработки технологии. Однако, по нашему мнению, осознанное применение предварительных исследований в рамках комплексной научно обоснованной методики позволит в разы повысить эффективность и приведёт к значительному снижению затрат при освоении новых видов листового проката. Актуальность методики заключается в том, что она должна позволить с меньшими затратами труда и времени и большей точностью описать технологию. Следует сделать важное замечание: в зависимости от требований к продукту и возможностей лабораторного оборудования могут быть задействованы не все элементы методики.

Последовательность применения методики может быть следующей (Рис.6). На первом этапе анализируются исходные данные – требования к листовому прокату. Основными параметрами толстолистого проката являются геометрические размеры, механические свойства и ограничения по химическому составу. На основе требуемых геометрических размеров проката производится расчёт возможных размеров исходной заготовки – сляба. Для одного и того же размера готового проката могут быть использованы слябы различного размера, т.к. длина сляба в значительной степени зависит от выбранной кратности материнского листа (количества заготовок под трубу, которое можно получить из конечного раската). Раскат может быть однократным – длиной 14-15 метров, двукратным – длиной 25-26 метров и трёхкратным – длиной до 40 метров. Повышение кратности проката позволяет снизить количество торцевой обрезки на тонну годной продукции и повысить производительность, что благоприятно сказывается на себестоимости. Однако применение длинных слябов с большой начальной толщиной (340-355 мм) приводит к снижению единичных обжатый в черной стадии прокатки с 10-12% до 4-7% в первых проходах.

Расчёт целевого химического состава осуществляется на основе эмпирических уравнений по определению прочностных и вязких свойств проката, а также опыта производства близких по требованиям марок сталей. На основе химического состава осуществляется расчёт основных технологических параметров, основанный на принципах контролируемой прокатки.

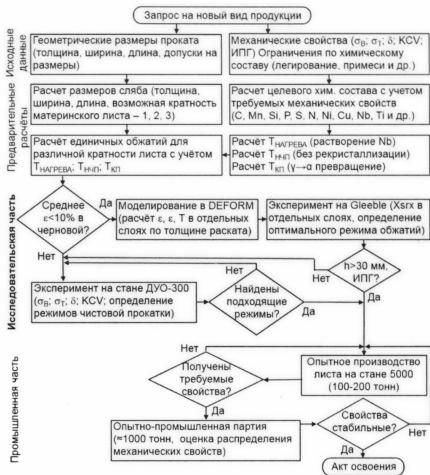


Рис. 6. Укрупнённая схема освоения нового вида продукции с применением комплексной методики предварительных исследований

Обладая исчерпывающими данными по химическому составу, геометрическим размерам слэба и температурным интервалам прокатки проводится расчёт частных обжатий. Так как при среднем обжатии в черновой стадии менее 10% за проход ожидается недостаточная степень рекристаллизации во всём сечении слэба, то при подобных условиях требуется оценить степень разнородности на основе комплексного исследования моделированием и экспериментами на Gleeble. Как правило, такие обжатия имеют место при прокатке двукратного листа толщиной свыше 30 мм. Используемые элементы методики позволяют установить возможность производства листов повышенной кратности. При среднем обжатии в черновой стадии свыше 10% риск получения разнородности снижается и в большинстве случаев моделирование нецелесообразно.

Целью экспериментальных прокаток на лабораторном стане является определение влияния режимов прокатки на механические свойства готового листа. При этом с точки зрения исследования механических свойств важным является соизмеримость толщины прокатываемой полосы в лабораторных и промышленных условиях. В связи с этим в рамках используемого лабораторного стана дуо 300 целесообразно проводить исследования для промышленного листа толщиной до 25-30 мм. При этом ширина полосы составляет около 100 мм, что не позволяет изготовить из неё образцы для испытания падающим грузом (ИПГ). При использовании лабораторного стана с толщиной готового проката до 30 мм и шириной от 300 мм возможна корректировка блок-схемы методики.

После определения допустимого размера сляба и рекомендуемых режимов прокатки необходимо опытное производство листа на стане 5000. Эффект от использования исследовательской части заключается в снижении количества циклов опытных прокаток на стане 5000 с 3-4 до 1-2 для новых видов продукции «средней» сложности. С учётом того, что в год на стане 5000 осваивается около 10 новых видов продукции, годовой экономический эффект от снижения количества опытных прокаток может составить около 15 млн. рублей.

Опытно-промышленная партия (1000 тонн листа) по выбранной технологии позволяет проверить правомерность режимов прокатки на большом массиве данных, после чего продукция может быть переведена в разряд освоенной.

Рассмотрим случай прокатки на стане 5000 ОАО «Выксунский металлургический завод» листа класса прочности K60 с заданной толщиной 30,5 мм, шириной 3700 мм из слябов толщиной 355 мм и шириной 2200 мм. Для прокатки однократного листа длина сляба должна составлять 2600 мм, а среднее обжатие в черновой стадии прокатки – 10%. Для прокатки двукратного листа требуется сляб длиной 4700 мм, среднее обжатие при этом составит 6,5%. Важной задачей при разработке технологии производства подобного сортамента является определение минимально допустимого уровня частных обжатий исходя из степени рекристаллизации стали без проведения дополнительных опытных прокаток на стане 5000. Решить эту задачу возможно с применением предложенной комплексной методики предварительных исследований.

Распределение накопленной эквивалентной деформации, скорости деформации и температуры по слоям раската для случая однократного и двукратного листа рассчитаны с помощью разработанной в DEFORM модели черновой прокатки. Далее в соответствии с методикой проводилась оценка доли статически рекристаллизованного зерна по толщине раската после каждого прохода и в конце черновой стадии. При определении доли рекристаллизованного зерна учитывали междеформационную паузу при прокатке на стане 5000 (в среднем 7 секунд). После последнего прохода определяли степень рекристаллизации через 1 секунду и 60 секунд после деформации. На Рис.7 показано изменение доли статически рекристаллизованного зерна для двух наиболее показательных слоёв – слой с максимальной деформацией и середина раската.

При прокатке однократного сляба рекристаллизация проходит полностью по всем слоям по толщине раската. При прокатке двукратного сляба обжатия в черновой стадии недостаточно для полной рекристаллизации в середине раската. Однако слой с максимальной деформацией, а следовательно и соседние слои, находящиеся на $\frac{1}{4}$ толщины, рекристаллизовались полностью.

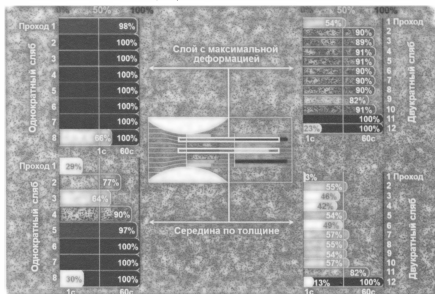


Рис.7. Доли статически рекристаллизованного зерна (в %) по проходам при черновой прокатке за 8 и 12 проходов

Правомерность принятия решения о возможности производства листового проката с подобными режимами проверена экспериментально. Проведены опытные прокатки однократных и двукратных листов толщиной 30,5. Режимы чистовой стадии – одинаковые для обоих случаев. По результатам прокатки оценены механические свойства и микроструктура готовых листов.

Следует отметить небольшое снижение для двукратных раскатов временного сопротивления на 15 МПа (610-620 МПа вместо 625-635 МПа для однократных), предела текучести на 5 МПа (540-560 МПа вместо 545-565 МПа), ударной вязкости при температурах -40°C и ниже на 10-30 Дж/см², что может быть связано с менее интенсивной рекристаллизацией. При этом ударная вязкость и доля вязкой составляющей на образцах после ИПГ одинаковы при температуре -20°C и составляют 380 Дж/см² и 97% соответственно, а доля вязкой составляющей при температурах -40°C и -60°C на двукратных листах даже немного выше. Микроструктура исследованных листов аналогична, представлена ферритом полигональным в количестве до 40%, квазиполигональным ферритом (до 30%) и бейнитом.

Таким образом, высокая степень рекристаллизации на $\frac{1}{4}$ толщины раската в черновой стадии прокатки позволяет достигать требований по механическим

свойствам даже с учётом недостаточной рекристаллизации в середине раската. При этом необходимо учитывать небольшое снижение прочностных свойств.

Другим примером применения методики предварительных исследований для нужд стана 5000 является разработка и внедрение технологии производства листового проката классов прочности K52-K56 толщиной 10-16 мм. В рамках диссертационной работы предложен химический состав со сниженным по сравнению с ранее применяемым легированием (экономия в среднем 429 руб./т). При этом опробование нового химического состава в условиях стана 5000 было сопряжено с риском получения некачественной продукции вследствие отсутствия гарантии достижения механических свойств. Поэтому в соответствии с предложенной методикой и с учётом технологических особенностей производства данного сортамента (использование сляба толщиной 250 мм, высокие частные обжаты при черновой прокатке и небольшая толщина готового листа) проводили прокатки в условиях лабораторного стана дуо 300.

Лабораторные прокатки позволили подтвердить возможность производства из предложенного химического состава листа классов прочности K52-K56, а также определить температурные режимы прокатки на стане 5000. По разработанной технологии произведено 213 тыс. тонн листа. Годовой экономический эффект от внедрения технологии составляет 84 405 946 рублей.

Описанная технология зарегистрирована в виде заявки на изобретение как способ производства толстолистого проката для изготовления электросварных труб магистральных трубопроводов (№2013154377 от 06.12.2013).

Основные выводы

1. Проведённый анализ современных технологий и подходов к разработке показал, что в условиях повышения требуемых толщины и механических свойств листового проката происходит увеличение размеров слябов, а следовательно, уменьшение частных обжатий, особенно в первых проходах. Снижение обжатий в свою очередь может усложнить достижение требуемых механических свойств. В этих условиях приобретает важность применение методов математического и физического моделирования, позволяющих на этапе предварительных исследований определить оптимальные режимы формирования структуры и механических свойств с учётом основных параметров прокатки, таких как степень деформации, температура, скорость и междеформационные паузы.

2. При помощи разработанной в программном комплексе DEFORM математической модели горячей прокатки проведён анализ черновой стадии контролируемой прокатки на стане 5000, который позволил установить, что:

- При прокатке сляба толщиной 300 мм с обжатием 10% в первом проходе минимальная накопленная эквивалентная деформация формируется в середине раската (0,13 мм/мм), максимальная на расстоянии 1/8 толщины от поверхности (0,21 мм/мм);
- При прокатке сляба толщиной 355 мм на толщину 160 мм за 6, 8, 10 или 12 проходов наблюдается увеличение неравномерности накопленной эквивалентной деформации при увеличении количества проходов, при этом

вне зависимости от количества проходов накопленная эквивалентная деформация в центре раската после последнего прохода составляет ≈ 1 мм/мм, максимальная накопленная эквивалентная деформация для 6-ти проходов составляет 1,5 мм/мм, для 12 – 1,8 мм/мм;

- Температура поверхности после последнего прохода практически не зависит от количества проходов ($\approx 1000^\circ\text{C}$), температура середины раската увеличивается на $3-5^\circ\text{C}$ за проход за счёт деформационного разогрева, снижение температуры наблюдается в слоях, находящихся между поверхностью и слоем с максимальной деформацией.

3. На основе результатов математического моделирования в условиях комплекса Gleeble 3800 экспериментально установлено распределение доли статически рекристаллизованного зерна при прокатке в черновой стадии в девяти слоях по всей толщине прокатываемого металла. Доля статически рекристаллизованного зерна стали К60 через 1 секунду после первого прохода с обжатием 10% равна на поверхности – 2%, на $\approx 1/4$ толщины раската – 32%. Также установлено, что при прокатке сляба толщиной 355 мм на лист толщиной 30,5 мм максимально возможные единичные деформации в черновой стадии (от $\approx 6\%$ до 13 % при производстве однократного листа и от $\approx 4\%$ до 11% – двукратного) формируют среднюю долю статически рекристаллизованного зерна на расстоянии $1/4$ от поверхности раската более 90% в обоих случаях, в середине раската – 82% для однократного сляба и 55% для двукратного сляба.

4. Экспериментальным путём подтверждена правомерность применения критериев и допущений, предложенных для физического моделирования контролируемой прокатки, а также возможность применения лабораторного стана дуо 300 для моделирования прокатки в условиях стана 5000, среднее расхождение в результатах лабораторного и промышленного эксперимента при испытаниях на растяжение составило 5%. Установлено, что для предложенного химического состава с окончанием прокатки в интервале $700-800^\circ\text{C}$ возможно достижение предела текучести 410-510 МПа (классов прочности К52-К56).

5. Предложена комплексная методика предварительных исследований, включающая современные методы математического и физического моделирования горячей прокатки, которая позволяет с меньшими затратами труда и времени и большей точностью описать требуемую технологию, а также сократить количество опытных прокаток на стане 5000 в 2 раза.

6. На основе разработанной методики сформулированы рекомендации по выбору технологических режимов прокатки и освоена технология производства листового проката трубного назначения классов прочности К52-К56 толщиной 10-16 мм, а также разработана технология производства проката класса прочности К60 толщиной 30,5 мм. По разработанной технологии произведено более 213 тыс. тонн листового проката. Экономический эффект от внедрённых технологий составляет более 84 405 946 руб./год.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

1. Мунтин А.В., Зинягин А.Г. МКЭ моделирование и экспериментальное исследование распределения деформации по толщине при горячей прокатки толстого листа: Текст доклада на англ.яз. // Материалы 23-й Международной конференции METAL 2014. Брно (Чехия). 2014. С.154-158. (0,3 п.л./0,15 п.л.)
2. Мунтин А.В. Математическое моделирование и экспериментальное исследование особенностей прокатки на стане 5000: Тезисы доклада // Материалы Конференции молодых специалистов Объединённой Металлургической Компании. Выкса. 2014. С. 15. (0,07 п.л.)
3. Распределение деформации по толщине сляба при прокатке на толстолистовом стане / А.В. Мунтин [и др.] // Заготовительное производство в машиностроении. 2013. №11. С. 32-36. (0,3 п.л./0,1 п.л.)
4. Особенности формирования микроструктуры и механических свойств низколегированной стали при использовании различных технологических схем ТМО / А.В. Мунтин [и др.] // Черные металлы. 2013. №4. С.19-25. (0,3 п.л./0,1 п.л.)
5. Зинягин А.Г., Мунтин А.В. Оптимизация скоростного режима прокатки сталей класса прочности K52-K60 // Проблемы чёрной металлургии и материаловедения. 2013. №4. С. 21-25. (0,3 п.л./0,15 п.л.)
6. Колесников А.Г., Мунтин А.В., Зинягин А.Г. Особенности физического моделирования контролируемой прокатки // Заготовительное производство в машиностроении. 2013. №1. С. 32-35. (0,3 п.л./0,12 п.л.)
7. Математическое моделирование процесса ускоренного охлаждения листа на стане 5000 / А.В. Мунтин [и др.] // Проблемы чёрной металлургии и материаловедения. 2013. №1. С. 20-25. (0,3 п.л./0,1 п.л.)
8. Мунтин А.В. Исследование влияния неравномерности температуры на распределение деформации по толщине сляба при прокатке на толстолистовом стане: Тезисы доклада // Материалы конференции Будущее машиностроения России. Москва. 2013. С. 101. (0,07 п.л.)
9. Освоение и производство высокопрочного листа на стане 5000 ОАО «ВМЗ» для производства труб: Текст доклада / А.В. Мунтин [и др.] // Материалы 9-го Конгресса прокатчиков. Череповец. 2013. С. 104-107. (0,3 п.л./0,1 п.л.)
10. Мунтин А.В. Физическое моделирование контролируемой прокатки: Тезисы доклада // Материалы Российской ежегодной конференция молодых учёных и аспирантов «Физикохимия и технология неорганических материалов». ИМЕТ РАН. Москва. 2012. С. 567. (0,07 п.л.)
11. Мунтин А.В. Исследование распределения деформаций и температур по толщине листа при прокатке на Стане 5000: Тезисы доклада // Материалы Конференции молодых специалистов Объединённой металлургической компании. Выкса. 2012. С. 20. (0,07 п.л.)
12. Мунтин А.В. Моделирование процесса прокатки на стане дуо 300 методом конечных элементов: Тезисы доклада // Материалы Всероссийской научной конференции молодых специалистов. ЦНИИчермет им. И.П. Бардина. Москва. 2010. С. 6. (0,07 п.л.)