

На правах рукописи



Татару Александр Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА
ГОРЯЧЕКАТАНОГО ВЫСОКОПРОЧНОГО АВТОЛИСТОВОГО ПРОКАТА
ИЗ ДВУХФАЗНЫХ ФЕРРИТОМАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ С ЗАДААННЫМИ
ПОКАЗАТЕЛЯМИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре Обработки металлов давлением (ОМД) в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

Научный кандидат технических наук, доцент
руководитель: **Потемкин Валерий Константинович**

Научный доктор-инженер, профессор
консультант: **Кавалла Рудольф**

Официальные **Бельский Сергей Михайлович,**
оппоненты: доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО Липецкий
государственный технический университет,
профессор кафедры «ОМД»

Чашин Валерий Васильевич,
кандидат технических наук, ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П.
Бардина», ведущий научный сотрудник Центра новых
металлургических технологий

Ведущая организация: **ФГБОУ «Московский политехнический университет»**

Защита состоится 14 июня 2018 года в 15 ч 30 мин. на заседании диссертационного совета Д212.132.09 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИТУ «МИСиС» и на сайте <http://www.misis.ru>.

Автореферат разослан _____ мая 2018 года

Справки по телефону: 8-925-074-70-00,

e-mail: vachiyan@yandex.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета



С.М. Ионов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Экономия топлива и повышение безопасности являются основополагающими факторами в развитии современного автомобилестроения. С точки зрения снижения массы деталей автомобилей, высокопрочные стали имеют значительное преимущество перед другими материалами, такими как алюминий, магний, пластики и композитные материалы. Процесс обработки таких сталей по простоте сравним с процессом обработки мягких сталей. В связи с этим себестоимость производства не возрастает, а преимущества, связанные с низким весом деталей из высокопрочной стали, приводят к общему снижению затрат.

Наиболее широкое распространение получило производство высокопрочного листового проката из двухфазных ферритомартенситных сталей (ДФМС). Настоящая работа направлена на решение проблемы разработки новых энергосберегающих технологий при производстве высокопрочного и экономнолегированного автолистового проката. Проблема решается без привлечения средств, на реконструкцию имеющегося или покупку нового оборудования.

Таким образом, для повышения конкурентоспособности отечественного автомобилестроения актуально создание эффективных технологий производства полосового проката из ДФМС, обладающих комплексом механических свойств, на уровне современных мировых стандартов.

Цель и задачи работы

Целью диссертационной работы является разработка научно-технических основ технологии производства автолистового горячекатаного проката из двухфазной ферритно-мартенситной стали на непрерывном широкополосовом стане.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Разработка методики исследования процессов формирования структуры, механических свойств с использованием комплекса «Gleeble 3800» и деформационно-закалочного дилатометра «DIL 805 A-D» для физического моделирования термомеханических процессов проходящих при горячей деформации.
2. Экспериментальное исследование влияния деформации и последующего охлаждения на протекание фазовых и структурных превращений в исследуемых составах ДФМС с построением термокинетических диаграмм (ТКД).
3. Разработка нового экономнолегированного химического состава на основе анализа экспериментально полученных термокинетических диаграмм ДФМС.
4. Экспериментальные пластометрические исследования изменения сопротивления деформации базового и нового экономнолегированного составов ДФМС с изучением влияния многократной деформации и степени деформации в последнем проходе чистовой группы непрерывного широкополосового стана (НШПС).
5. Разработка математической модели теплового состояния металла на промежуточном рольганге, в чистовой группе клетей и на отводящем рольганге НШПС и её адаптация к производственным условиям.
6. Исследование влияния параметров ступенчатого охлаждения на отводящем рольганге (температура конца прокатки, температура начала ускоренного охлаждения и температура смотки) на закономерности формирования структуры и механических свойств по выработанной методике.

7. Разработка рекомендаций по температурно-скоростным параметрам охлаждения на отводящем рольганге НШПС и их реализация в командных терминах (порядок и количество включенных секций) системы управления установкой душирования.

8. Опробование разработанной математической модели и усовершенствованной технологии с использованием последеформационного одноступенчатого охлаждения на отводящем рольганге в опытно-промышленном эксперименте по производству горячекатаной ДФМС класса прочности DP600 на полупромышленном стане 140 и промышленном стане 2000.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. Установлены деформационно-скоростные, температурные и временные параметры горячей прокатки и последеформационного ускоренного охлаждения, обеспечивающие заданную структуру и требуемый комплекс механических свойств экономнолегированной двухфазной стали разработанного химического состава класса прочности DP600 в условиях широкополосового стана горячей прокатки (ШСП).

2. Установлены зависимости изменения сопротивления деформации ДФМС для базового и нового химического составов, от температуры, степени и скорости деформации.

3. Определены закономерности влияния температуры, степени деформации в последнем проходе чистовой группы клетей горячей прокатки и длительности последеформационной воздушной паузы перед ускоренным охлаждением на отводящем рольганге НШПС на формирование конечной структуры и механических свойств для ряда исследованных составов ДФМС.

4. Разработана комплексная математическая модель для описания теплового состояния ДФМС, учитывающая тепловой вклад от протекающего полиморфного превращения (исходя из параметров термокинетических диаграмм), с учётом тепловыделения при деформационном воздействии, зависящем от степени деформации и действующим сопротивлением деформации, уровень которого в свою очередь зависит от мгновенного значения температуры, скорости и степени пластической деформации.

5. Разработана и реализована методика корректировки параметров охлаждения с использованием термокинетических диаграмм и модели теплового состояния, описывающих процессы структурообразования после горячей прокатки, для обеспечения требуемой конечной структуры и однородности свойств проката по длине.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Усовершенствована и опробована в промышленных условиях технология производства высококачественного полосового проката из стали класса прочности DP600 типоразмером 4x1250 мм, отличительной особенностью которой является применение последеформационного одноступенчатого охлаждения на отводящем рольганге НШПС.

2. Повышена точность расчета температурных параметров процесса горячей прокатки и последующего ступенчатого охлаждения на отводящем рольганге НШПС при применении разработанной математической модели теплового состояния металла, реализованной на ЭВМ.

3. Разработан алгоритм ввода управляющих параметров работы установки ускоренного охлаждения при реализации заданных режимов в терминах количества и номеров включенных и выключенных секций отводящего рольганга стана 2000.

4. Результаты теоретических и экспериментальных исследований находят отражение при чтении лекций, проведении практических и семинарских занятий по курсам «Совмещенные процессы в производстве проката», «Проектирование технологических процессов ОМД и управление качеством продукции», а также в КНИР, курсовом проектировании и при выполнении выпускных работ студентов бакалавриата и магистрантов на кафедре ОМД НИТУ «МИСиС».

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Термокинетические диаграммы (ТКД) распада аустенита для 4-х исследованных химических составов ДФМС в литом и деформированном состоянии.
2. На основе анализа экспериментально построенных ТКД для 4-х вариантов химического состава двухфазной стали разработан новый экономнолегированный химический состав. Полученные результаты реализованы при техническом опробовании в промышленных условиях НШПС 2000 ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат (НЛМК)».
3. Установленные параметры аналитических уравнений использованных для расчета сопротивления деформации при изменении температуры, скорости и степени деформации для нового и базового химических составов.
4. Комплексная математическая модель теплового состояния металла, учитывающая естественный и принудительный теплообмен, тепловой вклад от полиморфного превращения и тепловыделения при деформационном воздействии.
5. Усовершенствование технологии производства полосового проката высокопрочной стали класса прочности DP600 типоразмером 4x1250 мм для реализации на НШПС горячей прокатки 2000 ПАО «НЛМК», с целью обеспечения требуемого комплекса и однородности механических свойств в результате получения оптимального соотношения структурных составляющих.

Апробация результатов работы

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих конференциях и семинарах:

1. 66-е дни науки студентов МИСиС: международные, межвузовские и институтские научно-технические конференции, 2011, Москва.
2. Шестая международная молодежная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Уральская научно-педагогическая школа по обработке металлов давлением имени профессора А.Ф. Головина», 30.10-01.11.2012, Екатеринбург.
3. Международный научно-технический конгресс «Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии», ОМД 2014, 14-17.04.2014, Москва.
4. Международная научно-практическая конференция «Современная металлургия начала нового тысячелетия» к 80-летию НЛМК ЛГТУ, 17-21 ноября 2014, Липецк.
5. Международный научный семинар «Проблемы Черной металлургии – 2014» (в рамках Всероссийской научно-практической конференции «Череповецкие научные чтения-2014») ЧГУ 11.12.2014, Череповец.
6. Межзаводская школа руководителей и специалистов производства горячекатаного проката 13-21.11.2017, НИТУ «МИСИС», Москва.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 10 печатных работ, в том числе 5 в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованных источников и приложений. Работа изложена на 278 страницах машинописного текста, содержит 147 рисунков, 32 таблицы, 10 приложений. Список использованных источников включает 170 наименований отечественных и зарубежных авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулирована цель и задачи исследования, ее научная новизна и практическая значимость.

В первой главе представлен аналитический обзор литературы по различным аспектам применения и производства горячекатаного проката из ДФМС в условиях НШПС. Для получения необходимого уровня свойств в настоящее время разработано множество программ легирования, однако любой предлагаемый в литературе химический состав для получения ДФМС, необходимо корректировать с учетом технологических и конструктивных особенностей отечественных НШПС, используя термокинетические диаграммы распада аустенита. Современные разработки в области производства горячекатаных двухфазных автолистовых сталей основаны в первую очередь на использовании возможностей существующего оборудования. Однако при производстве высокопрочных ДФМС возникают высокие усилия прокатки, и как следствие повышенная опасность перегрузки клеток в линии стана. Этим обстоятельством обусловлена необходимость проведения исследований сопротивления металла деформации ДФМС, предлагаемого химического состава, в диапазоне температурных, скоростных и деформационных параметров. В ходе экспериментальных исследований реологии свойств ДФМС следует учитывать влияние целого ряда факторов на вид диаграммы деформации. Рассмотрены основные принципы и особенности управления и оптимизации механических свойств горячекатаных ДФМС за счет ступенчатого охлаждения на отводящем рольганге отечественных НШПС, в том числе с использованием математической модели структурообразования разработанной в НИТУ «МИСиС». Предложена одноступенчатая схема охлаждения для дальнейшего исследования и разработки технологии производства горячекатаной ДФМС в условиях НШПС 2000 ПАО «НЛМК». Сделано заключение о современном состоянии вопроса исследования, обоснованы основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе представлены методики исследований при проведении испытаний и измерений в лабораторных условиях, промышленных и полупромышленных экспериментов. В качестве базового химического состава выбран состав который используется для производства холоднокатаных ДФМС. На его основе предложено три опытных состава с варьированием алюминия и хрома. При проведении дилатометрических исследований с построением ТКД из трех предложенных составов выбирался новый экономнолегированный химический состав для последующих экспериментальных исследований, полупромышленной и промышленной апробации.

Исследования выполнялись в двух направлениях: первое это корректировка базового химического состава, и разработка нового экономнолегированного химического состава

ДФМС; второе – исследование, разработка и совершенствование технологических параметров горячей прокатки и ускоренного охлаждения на отводящем рольганге НШПС 2000 (см. Рисунок 1).

Разработаны методики исследования процессов формирования структуры, и механических свойств с использованием установки Hydrowedge II комплекса «Gleeble 3800» и деформационно-закалочного дилатометра «DIL 805 A-D» для физического моделирования термомеханических процессов проходящих при горячей деформации.



Рисунок 1 – Блок-схема процесса разработки нового химического состава ДФМС и основных видов экспериментальных исследований

Для построения ТКД распада аустенита для 4-х исследованных химических составов ДФМС применяли деформационно-закалочный дилатометр DIL 805 A-D. На деформационном модуле дилатометра осуществляли моделирование наиболее важных этапов деформационного режима на стадиях черновой и чистовой прокатки. После заключительного обжата образцы непрерывно охлаждали (в широком диапазоне скоростей) до комнатной температуры.

Пластометрические исследования базового и нового химического состава ДФМС при однократном и дробном нагружении выполняли на установке Hydrowedge II. В ходе эксперимента (при однократной деформации) варьировалась температура (800, 900, 1000, 1100 °C) и скорость деформации (0,5; 5; 50 с⁻¹), при этом степень деформации оставалась постоянной (0,7 ед. истинной или 50% относительной деформации). В процессе каждого последующего испытания при многократном нагружении изменяли условия моделирования деформационного режима в последней клетке стана 2000 (5, 10, 15, 20%). Полученные экспериментальные кривые текучести корректировали с учетом колебаний фактической температуры деформации и контактного трения образцов с рабочими бойками.

Также данная установка задействована при моделировании последеформационного ступенчатого охлаждения на отводящем рольганге стана 2000. Температуру конца прокатки и время паузы перед включением секций душирования на отводящем рольганге реального НШПС варьировали путем изменения температуры (T_3) перед началом охлаждения и воздушной паузы (τ_n) после заключительного обжатия.

Промышленный эксперимент на НШПС 2000 для апробации технологии производства горячекатаной ДФМС на базовом и новом составе ДФМС проведен в условиях цеха «Производство горячего проката» ПАО «НЛМК». Основное внимание в процессе проведения теоретических и экспериментальных исследований уделено участку стана от момента выхода раската из 5-ой клетки черновой группы до момента смотки полосы в рулон. Перед опытно-промышленной прокаткой нового химического состава ДФМС проведен эксперимент на полунепрерывном стане (ПНС) 140 Института ОМД (Institute of Metal Forming) Фрайбергской горной академии (Bergakademie Freiberg) для отработки ряда режимов ступенчатого охлаждения в приближенных к реальным промышленным условиям НШПС 2000. Производили измерение температуры в печном пространстве, температуры заготовки с помощью пирометров непосредственно перед входом в валки и во время последующего контролируемого охлаждения до температуры смотки с записью данных компьютером.

Разработана и реализована в ходе опытно-промышленной прокатки методика экспериментальных исследований, процессов формирования структуры и механических свойств с использованием ТКД и математической модели теплового состояния. Данная методика позволила разработать алгоритм ввода управляющих параметров при работе установки ускоренного охлаждения в терминах количества и номеров включенных и выключенных секций отводящего рольганга стана 2000.

При выполнении металлографических исследований использованы стандартные методики, приведенные в технической документации и открытой литературе, а также современные приборы и входящее в их состав программное обеспечение. Металлографические исследования включали измерение размера зерна феррита, объемной доли ферритной матрицы и мартенситных островков, бейнита и перлита. На образцах после испытаний на установках DIL 805 A-D и Hydrowedge II проводили сравнительные измерения твердости по Викерсу с усилием индентора твердомера 1 кН. Механические свойства промышленного и полупромышленного металла оценивали при испытании на растяжение плоских образцов при комнатной температуре по стандартной методике.

В третьей главе разработана расчетная математическая модель теплового состояния металла на промежуточном рольганге, в чистовой группе клетей и на отводящем рольганге НШПС 2000 ПАО «НЛМК». Два блока: «Моделирование охлаждения полосы на промежуточном рольганге и в чистовой группе» и «Моделирование охлаждения полосы на отводящем рольганге» – являются вполне независимыми и допускают отдельную отладку, проверку и адаптацию.

Математическая модель основывается на расчете пространственно-временного температурного поля полосы, которое определяется путем решения одномерного уравнения нестационарной теплопроводности численным методом – методом конечных разностей:

$$\rho(T)c(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda(T)\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q_v, \quad (1)$$

где ρ – плотность металла, кг/м³; c – удельная теплоемкость металла, Дж/кг · К; T – температура металла, К; τ – время, с; x – координата по толщине полосы, м; q_V – удельная мощность тепловых источников, Вт/м³.

Вся линия НШПС представлена в виде последовательности зон, где на рассматриваемое сечение полосы действуют неизменные граничные тепловые условия. При расчете теплового состояния металла на промежуточном рольганге использовали граничные условия, учитывающие потери тепла за счет излучения и конвективного теплообмена полосы с окружающим воздухом. Начальным условием для расчета выбранного сечения является контролируемая температура раската. При расчете температурного поля по толщине полосы в чистовой группе клетей НШПС использовали граничные условия, учитывающие потери тепла полосой за счет излучения, конвективного теплообмена с окружающим воздухом и охлаждающей водой и теплоотдачи рабочим валкам.

Математическая модель для описания теплового состояния ДФМС учитывает тепловыделение при деформационном воздействии, зависящем от степени деформации и от величины сопротивления деформации. Уровень последнего определяется путем расчетов с использованием аналитического уравнения полученного по методике В.И. Зюзина, которое имеет следующий вид:

$$\sigma_s = K_0 \cdot (U)^{K_u} \cdot (\varepsilon)^{K_{\varepsilon 1}} \exp(K_{\varepsilon 2} \cdot \varepsilon) \cdot \exp(K_t \cdot t) \quad (2)$$

где K_0 , K_u , $K_{\varepsilon 1}$, $K_{\varepsilon 2}$, K_t – термомеханические коэффициенты, которые характеризуют индивидуальные свойства стали (определяются в ходе пластометрических исследований); U – скорость деформации, с⁻¹; ε – истинная степень деформации, ед.; t – температура деформации, °С.

Расчет теплового состояния металла на отводящем рольганге осуществляли аналогично расчету на промежуточном рольганге и в чистовой группе клетей. Учитывали естественный и принудительный теплоотвод при взаимодействии с окружающим воздухом и водой при включении коллекторов ламинарной установки ускоренного охлаждения (УУО), а также тепловой вклад от полиморфного превращения, исходя из параметров (температуры A_{r1} и A_{r3}) разработанных термокинетических диаграмм в ходе дилатометрических исследований для ряда исследованных составов ДФМС.

В ходе опытно-промышленной прокатки на НШПС 2000 ПАО «НЛМК» для базового и нового состава ДФМС проведена адаптация двух блоков математической модели теплового состояния по толщине металла. В качестве исходных данных при адаптации математической модели служат технологические параметры прокатки, а также геометрические параметры полосы ДФМС, записанные автоматической системой управления технологическим процессом на стане 2000. Шесть прокатанных полос вошли в состав адаптационной выборки, по длине каждой из которых выполнен расчет для 4-5 сечений по толщине. Адаптация математической модели сводится к определению поправочных коэффициентов модели с целью минимизации погрешности между расчетной и измеренной радиационным пирометром температуры металла, которая вычисляется по формуле:

$$\Delta_k = \frac{t_k^{\text{изм}} - t_k^{\text{рч}}}{t_k^{\text{изм}}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где $t_k^{\text{изм}}$, $t_k^{\text{рч}}$ – измеренная и расчетная температура металла соответственно, °С; k – номер расчетного сечения по длине полосы.

Погрешность расчета температуры конца прокатки ($t_{кп}$) и температуры смотки ($t_{см}$) в модели для описания теплового состояния ДФМС не превышает 5 % или 25 °С (см. Рисунок 2). Однако при температуре смотки ниже 400 °С погрешность может возрастать вплоть до 11%, что вызвано увеличением погрешности в работе пирометра при пониженных температурах.

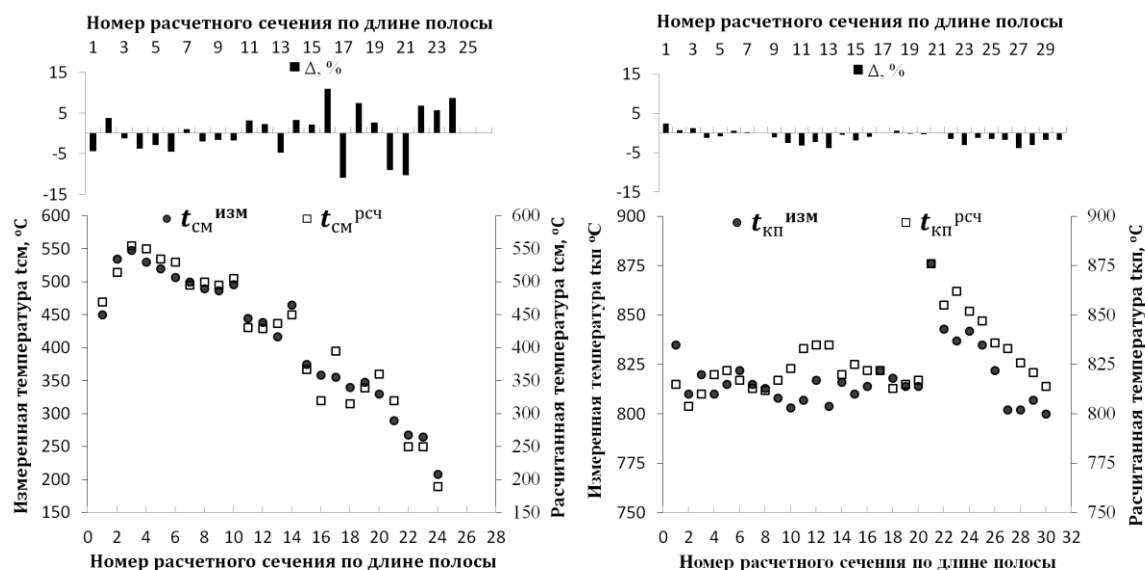


Рисунок 2 – Результаты адаптации математической модели для описания теплового состояния ДФМС к условиям стана 2000 ПАО «НЛМК»

В четвертой главе представлены результаты физического моделирования процессов горячей деформации и последующего ускоренного охлаждения для исследованных химических составов ДФМС. На основе анализа дилатометрических кривых, микроструктуры и измеренной твердости, построены ТКД распада аустенита для 4-х химических составов ДФМС в литом и деформированном состоянии. Полученные ТКД показали, что именно алюминий (Al) позволил в значительной степени увеличить влияние ферритного и мартенситного превращения на формирование конечной двухфазной микроструктуры в оптимальном соотношении (80-65 % феррита и 20-35 % бейнито-мартенситной составляющей), обеспечивающим заданный комплекс механических свойств двухфазной стали класса прочности DP600.

По результатам анализа экспериментально построенных ТКД для 4-х вариантов химического состава двухфазной стали разработан новый экономнолегированный химический состав. Добавка Al в новый состав ДФМС позволяет, при прочих равных условиях конца горячей прокатки (по сравнению с базовым составом), обеспечить на отводящем рольганге реального НШПС увеличение длительности воздушной паузы перед последующим ускоренным охлаждением, и повышение температуры смотки ($t_{см}$), за счет изменения параметров ТКД в новом составе ДФМС (см. Рисунок 3). Построены регрессионные зависимости для ряда параметров ТКД ($A_{г3}$, $A_{г1}$), с использованием которых в математической модели учитывается тепловой вклад от полиморфного превращения переохлажденного аустенита для базового и нового состава ДФМС.

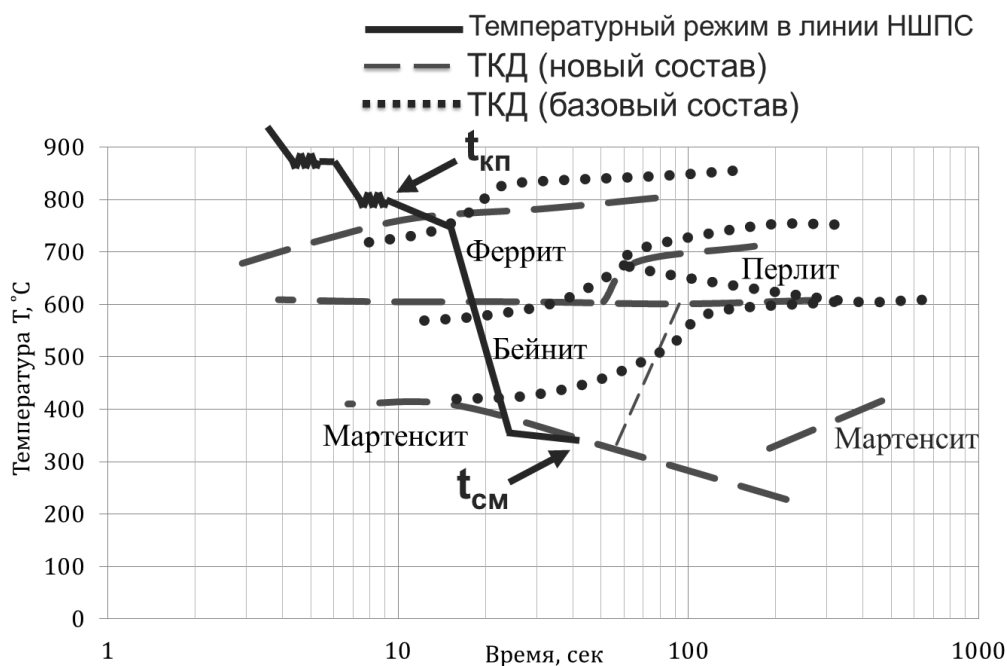


Рисунок 3 – Анализ последеформационного ступенчатого охлаждения на отводящем рольганге с использованием построенных ТКД

Физическое моделирование (с использованием установки Hydrowedge II) ступенчатого охлаждения на отводящем рольганге стана 2000 показало, что варьирование температуры конца деформации (T_3) фактически определяет изменение длительности охлаждения в температурном диапазоне протекания ферритного превращения и тем самым позволяет дополнительно воздействовать на количество образовавшегося феррита. Увеличение времени последеформационного воздушного охлаждения (τ_n) обеспечивает более полное протекание ферритного превращения (см. Рисунок 4).

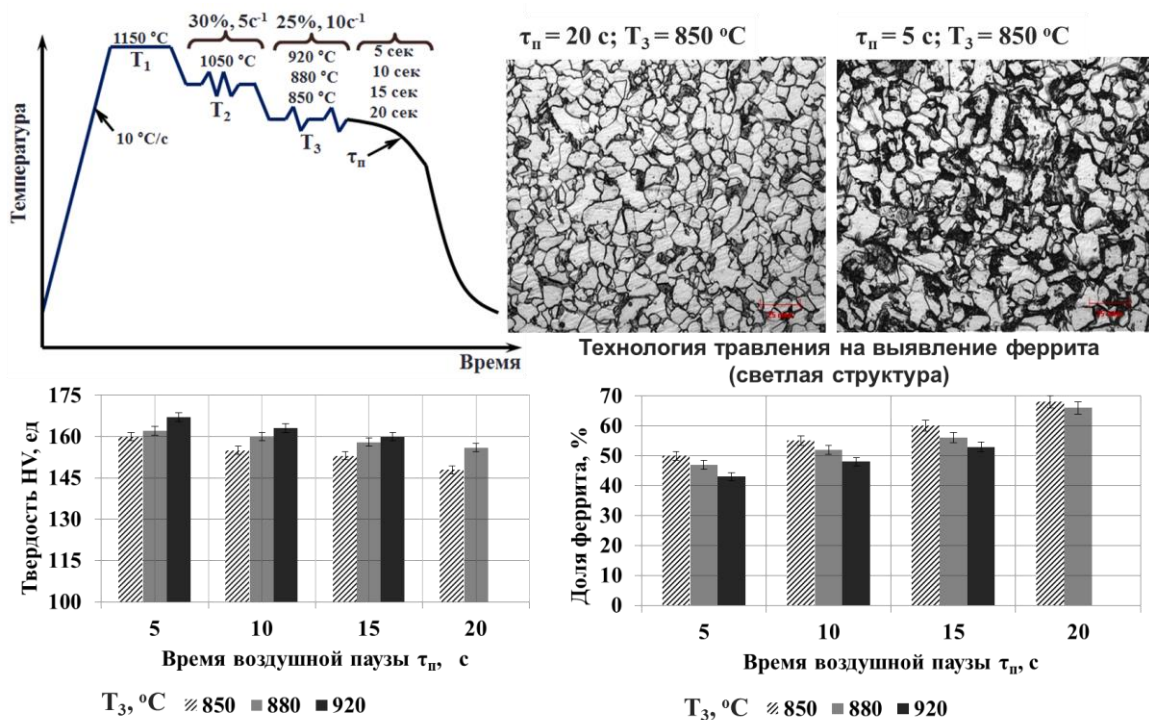


Рисунок 4 – Исследование влияния параметров одноступенчатого охлаждения на структуру и свойства двухфазной стали

В результате проведенного комплекса статистической обработки экспериментальных кривых текучести, полученных в ходе пластометрических исследований, установлены параметры уравнения (2), использованного для расчета сопротивления металла деформации при изменении температуры, скорости и степени деформации для базового (4) и нового (5) химических составов ДФМС:

$$\sigma_s^{BC} = 2539,69 \cdot U^{0,0855} \varepsilon^{0,405} \exp^{-0,8664 \cdot \varepsilon} \exp^{-0,0023 \cdot t}, F_R(4,3595) = 11122,72; R^2 = 0,925; (4)$$

$$\sigma_s^{HC} = 22926,02 \cdot U^{0,0864} \varepsilon^{0,438} \exp^{-0,9463 \cdot \varepsilon} \exp^{-0,0023 \cdot t}, F_R(4,1207) = 3610,92; R^2 = 0,923. (5)$$

Полученные зависимости позволяют вести расчет энергосиловых параметров горячей прокатки двухфазных сталей в математической модели, а также учитывать тепловыделение при пластической деформации.

Исследование влияния многократной деформации на величину сопротивления металла деформации выполняли путем физического моделирования деформационных и температурно-скоростных условий, протекающих при горячей прокатке в последних клетях стана 2000. Четыре серии кривых текучести, полученные в результате многократного процесса нагружения на установке Hydrowedge II для нового химического состава ДФМС, представлены на Рисунке 5. Отличительной особенностью каждой из построенных серий являлась величина степени деформации на заключительной ступени ε_4 (20, 15, 10, 5 %).

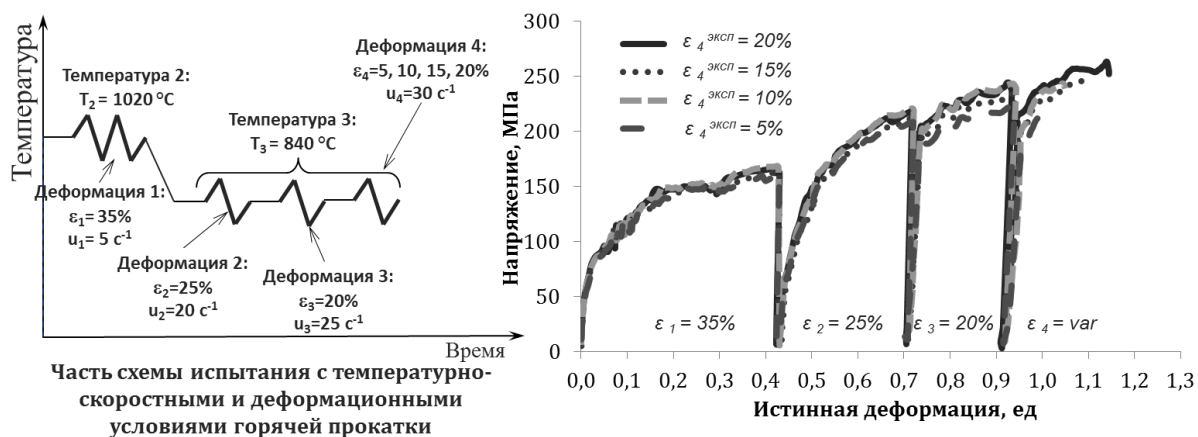


Рисунок 5 – Экспериментальные кривые текучести, полученные в ходе многократной деформации для нового состава ДФМС

В ходе сравнительного анализа экспериментальных диаграмм деформации с модельными диаграммами (с учетом и без учета неполного разупрочнения) определены значения поправочного коэффициента φ , в зависимости учитывающей «накопление» деформации для исследуемых составов ДФМС, при которых разработанные уравнения (4), (5) наиболее точно описывают траекторию кривых текучести с учетом неполного разупрочнения (см. Рисунок 6):

$$\varepsilon_i^* = \varepsilon_i + \varepsilon_{i-1}^* \cdot (1 - X_{\text{stat}}) \cdot \varphi; \quad (6)$$

где ε_i^* – «накопленная» деформация на входе в i -ую клеть, ед.; φ – поправочный коэффициент, который для базового и нового составов ДФМС составил 0,55 и 0,65

соответственно; X_{stat} – доля рекристаллизованного объема аустенита при статической рекристаллизации.

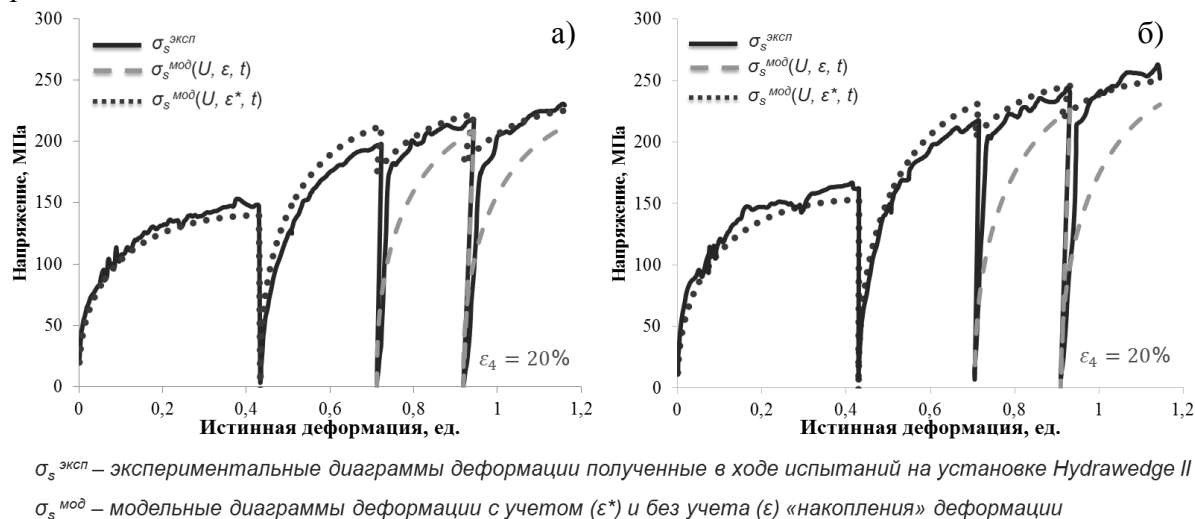


Рисунок 6 – Сравнительный анализ модельных диаграмм деформации с экспериментальными диаграммами базового (а) и нового (б) составов ДФМС

Результаты пластометрических исследований свидетельствуют, во-первых, о возможности использования полученных регрессионных уравнений (3, 4) для оценки энергосиловых параметров горячей прокатки в математической модели теплового состояния по толщине металла; во-вторых, об обязательном учете неполного разупрочнения в последних проходах чистового стана при расчете сопротивления металла деформации для двух исследованных вариантов химического состава ДФМС.

Анализ результатов проведенных металлографических исследований размера зерна феррита (для базового и нового состава ДФМС) при 4-х вариантах моделируемой степени деформации (ε_4) в последнем проходе чистовой группы стана (20, 15, 10, 5 %) выявил следующие зависимости (см. Рисунок 7):

- увеличение степени деформации с 5 до 20 % измельчает размер зерна на 12 % и 16 % для базового и нового состава ДФМС соответственно;
- дополнительное легирование алюминием способствует измельчению размера зерна феррита на 25-30%.

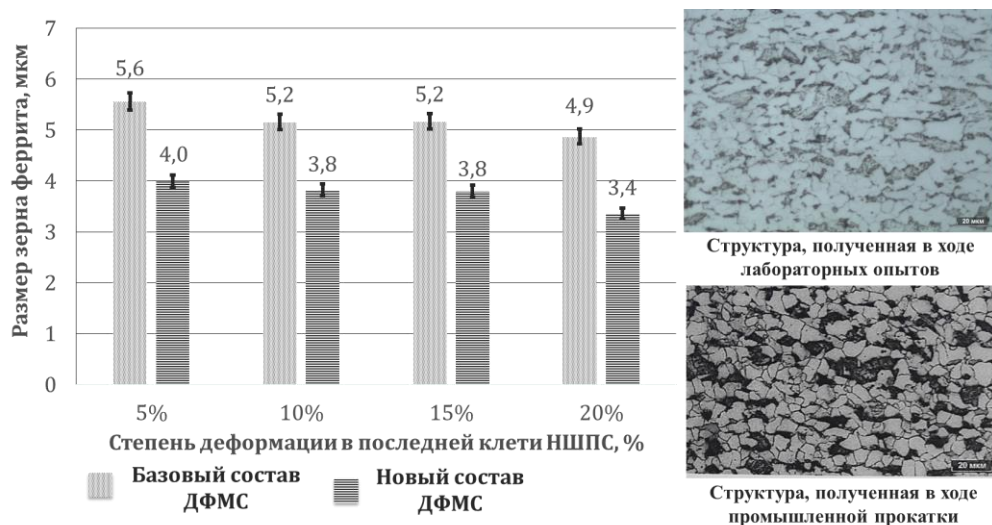


Рисунок 7 – Результаты металлографического анализа размера зерна феррита для исследуемых составов ДФМС

В пятой главе представлены результаты разработки и совершенствования технологии производства горячекатаного проката из стали класса прочности DP600 в ходе проведения опытно-промышленных экспериментов на НШПС 2000 и ПНС 140 с базовым и новым экономнолегированным химическим составом ДФМС.

Предварительная опытно-промышленная прокатка стали с базовым химическим составом ДФМС на НШПС 2000 ПАО «НЛМК»

Для обеспечения заданной температуры конца прокатки ($t_{\text{кп}}^1 = 840 \pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$ и $t_{\text{кп}}^2 = 820 \pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$), межклетьеовое охлаждение и все дополнительные системы охлаждения чистовой группы выводились из работы, при этом скорость прокатки за 12 клетью следовало обеспечить в диапазоне 4,1-4,3 м/с, при минимальном ускорении стана. Алгоритм ввода управляющих параметров УУО задавался согласно рекомендованной длительности воздушного охлаждения ($\tau_{\text{п}}^1 = 5-10$ и $\tau_{\text{п}}^2 = 15-20$ с) и температуры смотки ($t_{\text{см}}^1 = 400-450 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{\text{см}}^2 = 200-250 \text{ }^\circ\text{C}$) на отводящем рольганге.

Результаты предварительного опытно-промышленного эксперимента, показали корректность выбранной стратегии одноступенчатого охлаждения применительно к базовому химическому составу. Были получены механические свойства, близкие классу прочности DP600 в средней части полосы при $t_{\text{кп}}^2 = 810 \text{ }^\circ\text{C}$ и $t_{\text{см}}^2 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$.

Для получения двухфазной структуры необходимо, во-первых, увеличить $\tau_{\text{п}}$ и снизить $t_{\text{кп}}$ для образования нужного количества феррита, а во-вторых, снизить температуру смотки ($t_{\text{см}}$), то есть увеличить число включенных секций для получения нужного объема бейнитно-мартенситной структуры. Однако, существует проблема, обусловленная нестабильной работой пирометра при низких $t_{\text{см}}$. Кроме того, первая и вторая рекомендации противоречат одна другой, то есть увеличение $\tau_{\text{п}}$ снижает количество включенных секций ($N_{\text{сек}}$), тем самым повышая $t_{\text{см}}$. Выявленные технологические особенности позволили выработать следующие необходимые требования, чтобы разрешить противоречие между параметрами ускоренного охлаждения и в целом стабилизировать процесс охлаждения горячекатаной полосы:

- повышение $t_{\text{см}}$, создает условия для увеличения воздушной паузы ($\tau_{\text{п}}$) перед началом ускоренного охлаждения полосы на отводящем рольганге и стабилизирует работу УУО;

- снижение скорости прокатки обеспечивает получение заданной температуры конца прокатки и улучшает условия для маневрирования параметрами охлаждения на отводящем рольганге.

Проведение полупромышленного эксперимента при горячей прокатке для нового состава ДФМС на ПНС 140¹

Исследование на ПНС 140 проводили с использованием ДФМС нового химического состава, разработанного в процессе проведения дилатометрических исследований. В ходе полупромышленного эксперимента реализовано пять лент, с учетом температурно-скоростных и энергосиловых условий горячей прокатки на стане 2000 НЛМК. Непрерывная прокатка в трех клетях чистовой группы обеспечивала конечную толщину ленты равную $4 \pm 0,1$ мм, при температуре конца прокатки $805 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$. Отличительной особенностью каждой из прокатанных лент являлось различие условий последеформационного

¹ Исследования выполнены под руководством научного консультанта – доктора-инженера, профессора Р. Каваллы

принудительного охлаждения (PO_1 – умеренный режим, PO_2 – интенсивный режим) и уровня температуры смотки ($t_{см}$) на отводящем рольганге ПНС 140 (см. Рисунок 8).

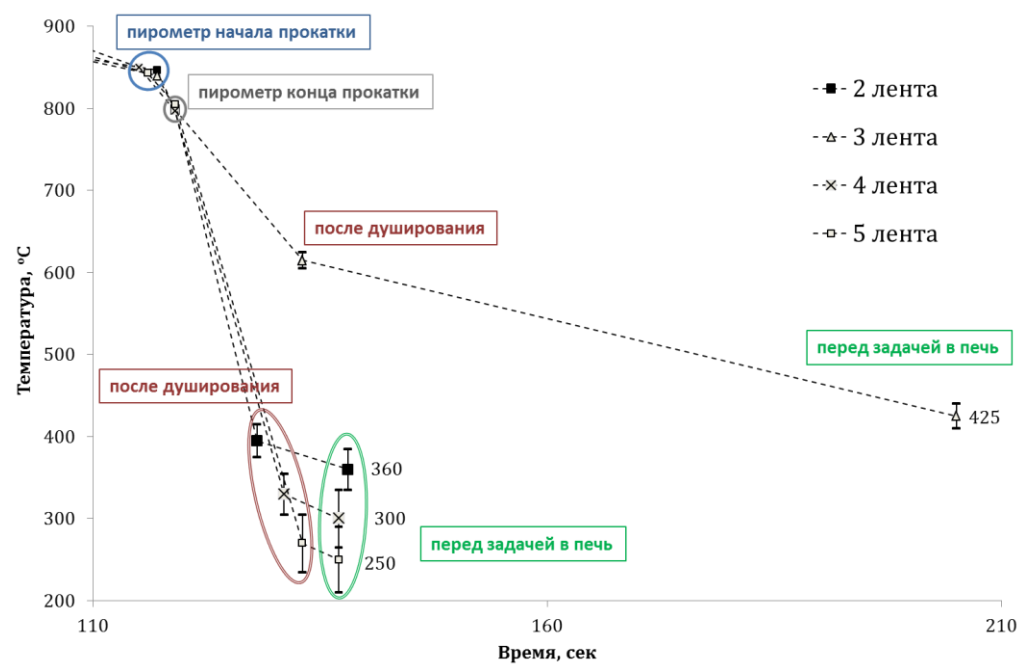
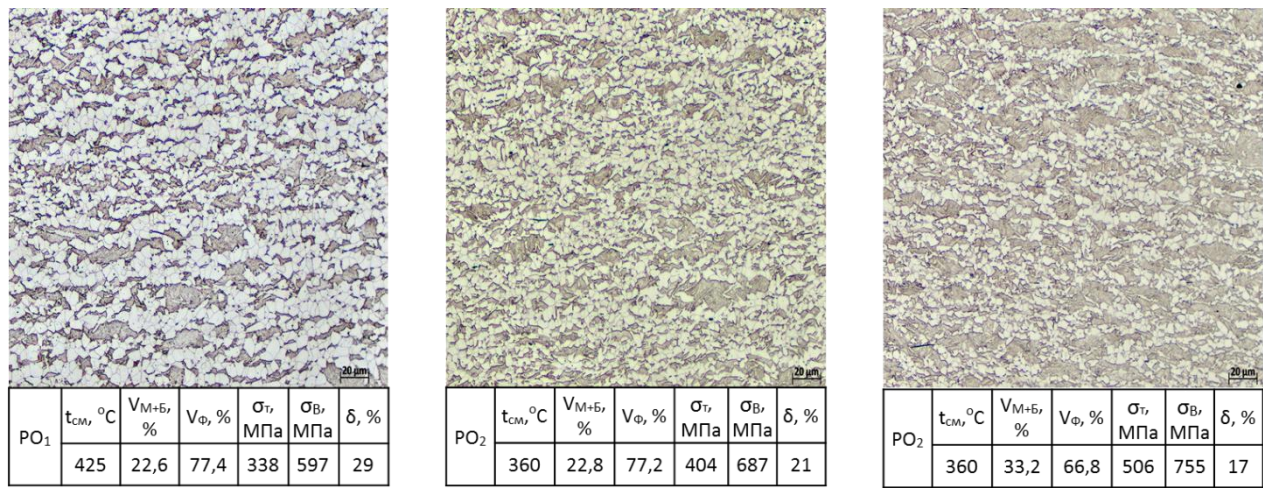


Рисунок 8 – Температурно-скоростные условия горячей прокатки и последующего ступенчатого охлаждения 4-х лент на ПНС 140

Процессы формирования структуры и механических свойств были исследованы по анализу результатов проведенной серии опытных прокаток. Показано, что интенсивный режим душирования (35–40 °C/сек) и температура перед задачей в печь ($t_{см}$) ниже 400 °C не позволяют обеспечить равномерное распределение механических свойств по длине прокатанных лент (см. Рисунок 9), напротив, стабильный комплекс механических свойств двухфазной стали нового химического состава ДФМС может быть получен по умеренному режиму душирования (15–20 °C/сек) и имитируемой температуре смотки 425 ± 15 °C.



PO_1, PO_2 – режимы принудительного охлаждения; $t_{см}$ - имитированная температура смотки; V_{M+B} – количество упрочняющей структуры; V_ϕ – количество феррита; σ_T – предел текучести; σ_B – временное сопротивление разрыву; δ – относительное удлинение

Рисунок 9 – Структура и механическая свойства, полученная по двум режимам принудительного охлаждения (PO_1 и PO_2) и $t_{см}$ 425 °C и 360 °C

Анализ влияния содержания упрочняющей структуры ($V_{Б+М}$) в двухфазной стали на механические свойства (см. Рисунок 10, а), выявил следующие зависимости:

- с понижением содержания $V_{Б+М}$ увеличивается разность между временным сопротивлением разрыву и пределом текучести в основном за счет большей чувствительности предела текучести к содержанию $V_{Б+М}$;
- комплекс механических свойств удовлетворяет требованиям, предъявляемым для класса прочности DP600 при содержании структуры ($V_{Б+М}$) в диапазоне 19-33 %;
- за пределами указанного выше диапазона ($V_{Б+М}$), основные показатели механических свойств находятся за пределами нижнего ($V_{Б+М} < 19\%$), либо верхнего ($V_{Б+М} > 33\%$) допуска, прописанного в технической документации для класса прочности DP600.

Анализ влияния температуры смотки ($t_{см}$) на формирование конечной структуры и механических свойств нового состава ДФМС (см. Рисунок 10, б) показал, что:

- увеличение $t_{см}$ позволяет уменьшить содержание $V_{Б+М}$, снижая, таким образом, прочностные свойства, но при этом, расширяя область равномерной пластической деформации на диаграмме растяжения (тем самым, уменьшая соотношение σ_T/σ_B), которое регламентируется требованиями технической документации;
- в интервале $t_{см}$ (360-420) °С образуется такое количество $V_{Б+М}$ $(22-30) \pm 3$ %, при котором, обеспечивается требуемый комплекс механических свойств двухфазной стали класса прочности DP600.

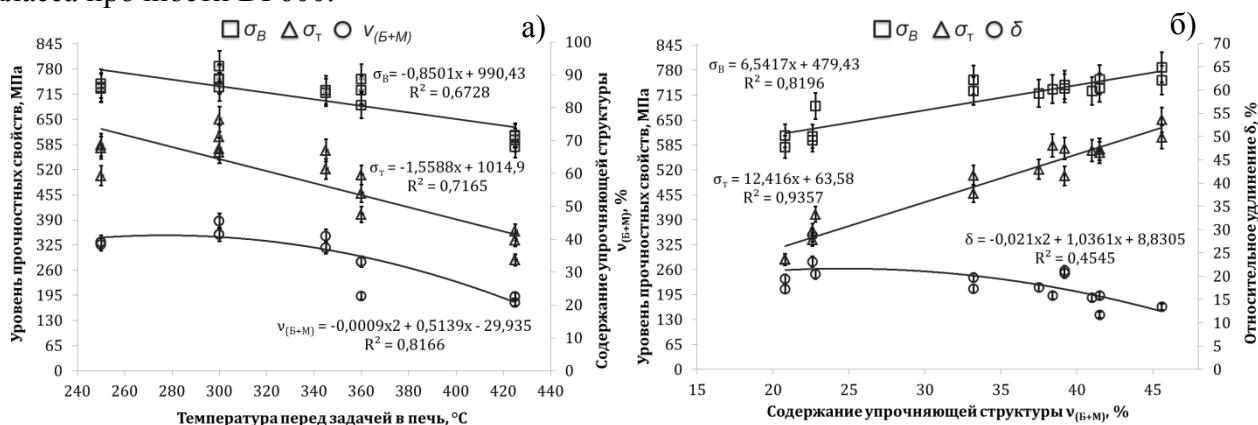


Рисунок 10 – Совместный анализ влияния имитируемой температуры смотки (а) и структуры (б) на конечные механические свойства

Согласно проведенным исследованиям предложены следующие рекомендации по одноступенчатой стратегии ускоренного охлаждения при последующем проведении опытно-промышленного эксперимента на стане 2000 ПАО «НЛМК»:

- прокатку следует заканчивать при температуре 815 ± 15 °С;
- температура начала ускоренного охлаждения: 745 ± 15 °С;
- интенсивность ускоренного охлаждения должна составлять: 20 ± 5 °С/сек;
- температура смотки должна быть в интервале от 370 ± 15 °С до 450 ± 15 °С.

Опытно-промышленная прокатка на НШПС 2000 ПАО «НЛМК» и разработка технологии производства горячекатаной ДФМС класса прочности DP600

Промышленный эксперимент на стане 2000 для нового состава ДФМС предусматривал нагрев сляба при температуре 1280 ± 30 °С, конец черновой и чистовой прокатки при температуре 1000 ± 20 °С и 815 ± 15 °С. Деформационный режим горячей прокатки в чистовой группе клетей для получения конечного типоразмера полосы 3,9x1250 мм показан на Рисунке 11. Рекомендованный режим одноступенчатого охлаждения на отводящем рольганге реализован согласно разработанному алгоритму ввода управляющих параметров работы установки ускоренного охлаждения в терминах количества и номеров включенных и выключенных секций отводящего рольганга ШСГП 2000, с использованием разработанной математической модели теплового состояния.

При сопоставлении фактического, расчетного и допустимого усилий по проходам в чистовой группе клеток при прокатке рассмотренных 4-х полос была выявлена опасная перегрузка 7-ой клетки (см. Рисунок 12), что незамедлительно требует пересмотреть температурно-скоростные и деформационные условия горячей прокатки полосы.

Согласно первым двум стратегиям душирования на отдельных участках по длине двух полос (№ 1, 2) достигался требуемый комплекс механических свойств двухфазной стали класса прочности DP600, но из-за нестабильной работы пирометра, установленного перед смоткой полосы в рулон, когда температура смотки задавалась на уровне $370 \pm 15^\circ\text{C}$ добиться равномерности механических свойства по длине прокатанных полос не удалось.

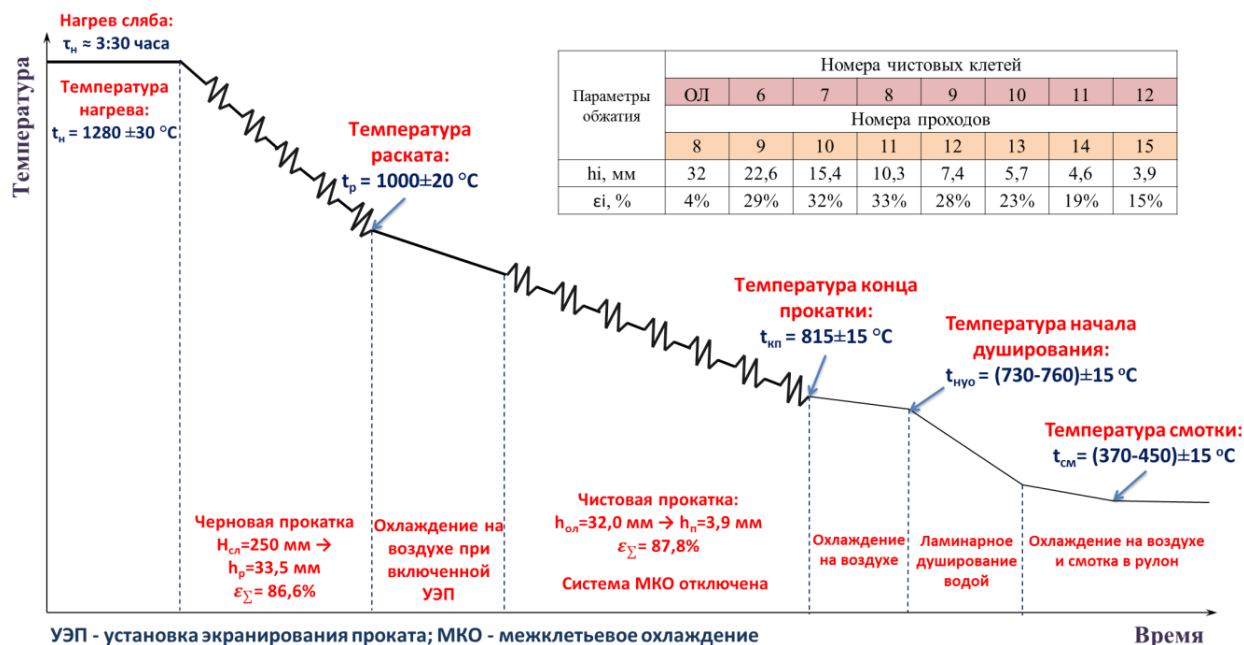


Рисунок 11 – Схема режимов горячей прокатки и последующего душирования УУО при прокатке нового состава ДФМС на стане 2000 ПАО «НЛМК»

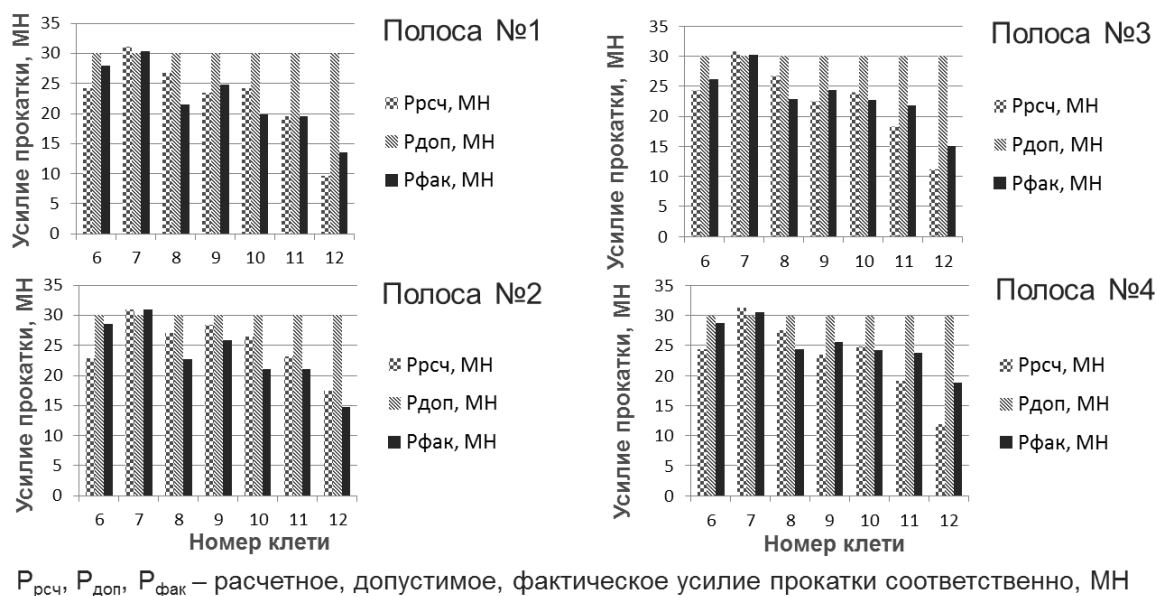
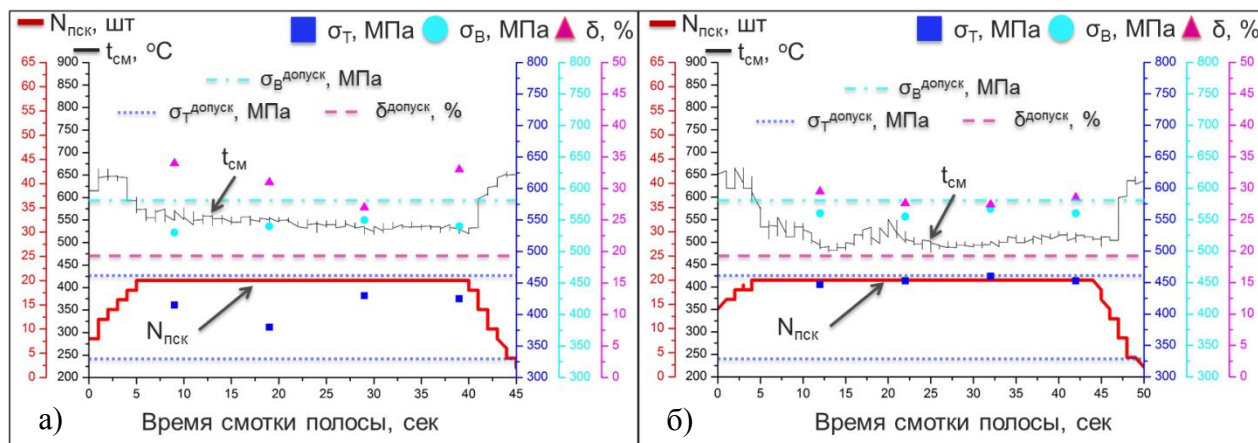


Рисунок 12 – Диаграммы распределения усилия прокатки в чистовой группе клеток стана 2000 для 4-х прокатанных полос

Повышение температуры смотки, благодаря уменьшению количества доступных для включения полусекций в 3-м режиме душирования, позволило стабилизировать процесс

регистрации температуры и, как следствие, равномерность распределения механических свойств по длине полосы № 4. Однако фактическая температура смотки оказалась выше планируемой (450 ± 15 °C), поэтому уровень временного сопротивления разрыву (σ_B) получился ниже требуемого (см. Рисунок 13). Что потребовало последующей корректировки стратегии ускоренного охлаждения на отводящем рольганге для обеспечения не только стабильного, но и заданного уровня механических свойств горячекатаной двухфазной стали.



$\sigma_T, \sigma_B, \delta$ – параметры механических свойств; $N_{пск}$ – количество включенных полусекций душирования;
 $\sigma_{T-допуск}, \sigma_{B-допуск}, \delta_{допуск}$ – границы допусков согласно требованиям стандарта рг. EN10338 для параметров механических свойств

Требования стандарта рг. EN10338 для класса прочности DP600

$\sigma_T, МПа$	$\sigma_B, МПа$	$\delta, \%$
330-460	≥ 580	≥ 19

Рисунок 13 – Сравнительный анализ параметров ступенчатого охлаждения с результатами механических свойств на 4-х участках по длине полосы №3 (а) и №4 (б)

Совместный анализ влияния температурных параметров ступенчатого охлаждения на механические свойства по результатам исследований, выявил необходимость обеспечить такую длительность воздушного охлаждения, при которой температура начала ускоренного охлаждения не превышала бы 755 °C, а температура смотки полосы в рулон лежала бы в диапазоне 400-465 °C.

В соответствии с этим разработаны рекомендации по режимам горячей прокатки, направленные на снижение нагрузки на первые клетки чистовой группы стана, а так же параметры ступенчатого охлаждения на отводящем рольганге. Отличительной особенностью скорректированной технологии является повышение температуры конца черновой прокатки ($t_5 = 1025 \pm 20$ °C) путем увеличения времени нагрева сляба в печи. Что позволит при последующей чистовой прокатке частично разрешить проблему перегрузки 7-й клетки стана 2000. А за счет дополнительного перераспределения обжатий будет достигнута более равномерная нагрузка 6-9 клеток (без превышения критической нагрузки).

В итоге стратегия последующего ступенчатого охлаждения на отводящем рольганге назначается согласно следующим температурно-временным условиям:

- прокатку следует заканчивать при температуре: 815 ± 15 °C, а режим ускоренного охлаждения полосы осуществлять со скоростью: 20-25 °C/сек, что обеспечит получение ферритного зерна размером 4-6 мкм;

- длительность воздушного охлаждения после конца прокатки и начало ускоренного охлаждения должно обеспечить температуру полосы на уровне 740 ± 15 °C, что обеспечит образование оптимального количества феррита;

- длительность ускоренного охлаждения (со скоростью 20-25 °C/сек) должно обеспечить оптимальную температуру смотки в пределах 430 ± 20 °C.

Для скорректированного режима, произведен расчет на математической модели теплового состояния по толщине металла на участках промежуточного рольганга, чистовой

Основные выводы по работе:

1. Предложены и адаптированы применительно к современным установкам и приборам методики экспериментальных исследований пластических характеристик ДФМС при горячей деформации, а также процессов формирования структуры и механических свойств с использованием ТКД при ступенчатом охлаждении на отводящем рольганге ШСГП.
2. На основе анализа построенных ТКД для 4-х вариантов ДФМС, с учетом условий деформации при горячей прокатки, предложен новый экономнолегированный химический состав для производства двухфазной стали класса прочности DP600
3. Получены регрессионные уравнения, описывающие изменение сопротивления деформации по методике В.И. Зюзина, для сталей исследованных химических составов. Проведена корректировка результатов расчетов сопротивления деформации с учетом неполного разупрочнения за время пауз в последних чистовых проходах ШСГП.
4. Предложенный состав ДФМС (с увеличенным содержанием алюминия вместо других более дорогих элементов) проявляет большую склонность к измельчению размера зерна феррита (примерно, на 20-25 %) по сравнению с базовым составом.
5. Разработана и адаптирована к условиям ШСГП 2000 математическая модель теплового состояния по толщине металла на участке от пятой черновой клетки до моталок. Модель учитывает экранирование раската на промежуточном рольганге, тепловыделение при пластической деформации и изменение теплового баланса, обусловленного протеканием полиморфного превращения. Максимальное расхождение показаний рабочего пирометра (при стабильной его работе) с данными расчета для средней части поверхности полосы в ходе промышленного эксперимента не превышала 25 °С.
6. Установлено, что эффективно регулировать количество ферритной составляющей кроме температуры конца прокатки, позволяет и температура начала ускоренного охлаждения, а интенсивность ускоренного охлаждения – размер зерна феррита. Для получения ферритного зерна размером 4-6 мкм, прокатку следует заканчивать при температуре: 815 ± 15 °С, а режим ускоренного охлаждения полосы осуществлять со скоростью: 20-25 °С/сек. Для образования оптимального количества феррита, время воздушного охлаждения после конца прокатки должно обеспечить температуру начала ускоренного охлаждения на уровне 740 ± 15 °С.
7. Образование оптимального количества бейнитной и мартенситной структурных составляющих, обеспечивается регулированием интенсивности ускоренного охлаждения для достижения оптимальной температуры смотки в пределах 430 ± 20 °С.
8. Полученные выше научные результаты положены в основу технологии производства горячекатаной ДФМС класса прочности DP600 для предложенного нового экономнолегированного химического состава. Использование математической модели теплового состояния по толщине металла позволило определить деформационные и температурно-скоростные параметры прокатки, а также порядок и количество включения полусекций душирования на отводящем рольганге.
9. Разработанная технология опробована на полупромышленном стане 140 Фрайбергской горной академии и промышленном НШПС 2000 ПАО «НЛМК» для толщин 4 и 6 мм. Совокупность разработанных технологических решений позволяет обеспечить получение горячекатаного проката двухфазной стали класса прочности DP600 с уровнем свойств, удовлетворяющим требованиям европейского стандарта pr. EN 10338:2015.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

1. В.К. Потёмкин, А.С. Татару, О.С. Хлыбов. Исследование структуры и свойств двухфазных сталей при ступенчатом охлаждении после горячей прокатки на широкополосовом стане 2000 «Северсталь» // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2011. – № 11. – с. 43-49.
2. Разработка технологии производства горячекатаной двухфазной стали на широкополосовом стане 2000. / А.С. Татару, В.К. Потемкин, Р. Кавалла, и др. // Труды международного научно-технического конгресса «Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии», Ч. I., Москва, 2014. – с. 273.
3. А.С. Татару, В.К. Потемкин, Р. Кавалла, А.С. Лукин, А.В. Долгов. Исследование возможности получения горячекатаной автолистовой двухфазной стали в диапазоне класса прочности DP450-600 в условиях стана горячей прокатки 2000 НЛМК // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2014. – № 7. – с. 26-33.
4. A.S. Tataru, V.K. Potemkin, R. Kawalla, A.S. Lukin, A.V. Dolgov. Production of Auto-Body Dual-Phase Steel with Singl-Step Cooling on the Output Conveyer of the 2000 Continuous Broad-Strip Mill at OAO NLMK // Steel in Translation. – 2014. – Vol. 44. – №7. – p. 491-497.
5. А.С. Лукин, А.В. Долгов, А.С. Татару, В.К. Потемкин, Р. Кавалла, Г. Корпалла. Исследование формирования двухфазной структуры при охлаждении на отводящем рольганге НШПС 2000 ОАО «НЛМК» // Сталь. – 2014. – №10. – с. 54-56.
6. Экспериментальные исследования процессов формирования двухфазной структуры при охлаждении на отводящем рольганге НШПС 2000 НЛМК. / А.С. Татару, В.К. Потемкин, А.С. Лукин, А.В. Долгов, Р. Кавалла, Г. Корпалла. // Сборник научных трудов международной научно-практической конференции (часть 3) «Современная металлургия начала нового тысячелетия», Липецк, 2014. – с. 71-79.
7. Разработка технологии производства горячекатаной двухфазной стали, в линии НШПС горячей прокатки 2000 ОАО «НЛМК» на основе совместного анализа теоретических и экспериментальных исследований / А.С. Татару, В.К. Потемкин, А.С. Лукин, А.В. Долгов, Р. Кавалла, Г. Корпалла // Сборник научных трудов международного научного семинара «Проблемы черной металлургии», Череповец, 2014 – с. 73-80.
8. Rudolf Kawalla, Aleksander S. Tataru, Valery K. Potemkin, Alexander S. Lukin, Alexander V. Dolgov, Gregory Korpalla. Experimental studies of the formation of dual phase structure with cooling on the run-out table at NLMK 2000 continuous hot rolling mill // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2015. – Vol. 50. – №6. p. 617-623.
9. Исследование сопротивления металла деформации для двухфазной автолистовой стали / А.С. Татару, В.К. Потемкин, М.А. Дагман и др. // Сборник трудов конференции «Неделя металлов в Москве» ВНИИМЕТМАШ, Москва, 2016 – с. 341-346.
10. Исследование влияния дробности и степени деформации в последних проходах НШПС на структуру и реологические свойства двухфазных сталей методами физического моделирования / Потемкин В.К., Татару А.С., Дагман М.А., Голубева О.А, Киселев Д.А. // Сборник тезисов VIII конференции молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий», ФГУП «ЦНИИчермет им И.П. Бардина», Москва, 2017 – с. 34-35.