

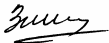
ЗИНЯГИН АЛЕКСЕЙ ГЕННАДИЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОКАТКИ И ОХЛАЖДЕНИЯ
ЛИСТОВ ИЗ ТРУБНЫХ МАРОК СТАЛЕЙ 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
им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель -

Никитин Георгий Семенович
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Московский
государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана», кафедра
«Оборудование и технологии прокатки»

Официальные оппоненты:

Зиновьев Александр Васильевич,
доктор технических наук, профессор, НИТУ
«МИСиС», кафедра «Пластической
деформации специальных сплавов»

Матросов Максим Юрьевич,
кандидат технических наук,
директор Центра сталей для труб и сварных
конструкций ФГУП «ЦНИИчермет им.
И.П.Бардина»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВПО Магнитогорский
Государственный Технический Университет
им. Г.И. Носова.

Защита диссертации состоится 27 01 2015 г. в 16 ч. 00 мин. на
заседании диссертационного совета Д 212.141.04 при Московском
государственном техническом университете им. 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
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.



Актуальность работы. Энергетика – один из фундаментов современной цивилизации. Глобальное энергопотребление в мире постоянно растёт. На сегодняшний день альтернатив углеводородным составляющим в энергетическом балансе практически не существует. В связи с этим на протяжении многих лет наблюдается неуклонный рост добычи нефти и газа.

С истощением запасов в открытых ранее месторождениях существует постоянная потребность в открытии новых. При этом многие вновь разведываемые месторождения эксплуатируются в сложных условиях. Например, среди перспективных проектов ОАО «Газпром» – мегапроект «Ямал» и Штокмановский проект, реализация которых будет проходить не только в условиях арктических климатических зон, но и в условиях влияния агрессивных сред (морская вода). Поэтому необходимо использовать средства доставки углеводородов, которые способны работать в подобных условиях. Для этих целей используются магистральные нефте- и газопроводы, выполненные из стальных труб большого диаметра (ТБД).

Исходной заготовкой для ТБД является лист, материал которого должен соответствовать требованиям эксплуатации. В большинстве случаев листы производятся на толстолистовых станах 5000 из микролегированных сталей по технологии контролируемой прокатки (КП). Данная технология разрабатывается с 1960-х годов, но до сих пор остается много недостаточно хорошо изученных вопросов в связи с различиями и индивидуальными особенностями технологий производства листов, а также сложностью и многофакторностью проблемы. В частности, из-за небольших отличий в композиции химического состава могут возникать значительные различия в структуре материала, меняться его свойства (сопротивление деформации, теплопроводность и т.д.). Кроме того, на различных станах используются разные модели управления технологическими переделами, различные длины роллангов, разное оборудование и т.д. Следовательно, отсутствует шаблонный подход в разработке технологии производства листа для ТБД. Именно поэтому при запуске нового производства существует необходимость разработки новой технологии.

Цель диссертационной работы – совершенствование процессов прокатки и охлаждения на стане-5000 путем снижения неравномерности деформаций в листе и повышения эффективности использования установки охлаждения с целью обеспечения заданных механических свойств.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. На основе литературного обзора проанализировать технологии производства трубных сталей, определить пути снижения неравномерности деформации во время черновой стадии прокатки, изучить существующие способы охлаждения листов;

2. Определить зависимость сопротивления деформации стали класса прочности К60 от деформационных параметров (степень обжатия, скорость

деформации, температура) двумя методами - на установке Gleeble и методом базисных давлений на лабораторном стане ДУО-300;

3. Изучить степень влияния различных факторов при черновой прокатке на неравномерность распределения накопленной деформации по толщине раската путем моделирования процесса в среде DEFORM 3D и на основе проведенных исследований выдать рекомендации по оптимизации существующих режимов прокатки;

4. Изучить возможности повышения эффективности использования установки охлаждения прокатного комплекса стан-5000 путем создания математической модели установки и анализа различных режимов охлаждения на ее основе. Разработать новые режимы охлаждения, которые обеспечат требования по температуре конца охлаждения и скорости охлаждения с целью получения заданной структуры;

5. Внедрить разработанные режимы прокатки и охлаждения на стане-5000 в г. Выкса.

Научная новизна. Получены следующие результаты, обладающие научной новизной:

1. Определена зависимость величины сопротивления деформации от температуры, степени и скорости обжатий для стали класса прочности K60 указанного химического состава;

2. Приводится способ уменьшения погрешности аппроксимации экспериментальных данных с установки Gleeble во всем диапазоне параметров деформации (по величине максимальной ошибки – на 40%, по средней – на 4%) за счет использования новой функциональной зависимости;

3. На основе моделирования показано, что оптимальной стратегией обжатий в черновой стадии прокатки является применение больших обжатий в первых проходах и нарастающих обжатий в последних, за счет чего достигается лучшая проработка середины полосы и обеспечивается более однородное распределение размеров аустенитных зерен;

4. Разработана математическая модель установки контролируемого охлаждения, не имеющей аналогов в мире;

5. На основе промышленного эксперимента показано, что для толстых листов верной стратегией охлаждения является включение коллекторов через один, что обеспечивает выравнивание температуры по сечению полосы и, соответственно, более равномерную структуру и конечные свойства металла.

Практическая ценность и реализация работы в промышленности. Данные, полученные по результатам экспериментов по определению сопротивления деформации стали класса прочности K60, используются для определения режимов горячей правки на стане-5000 ОАО "ВМЗ", а также для вычисления энергосиловых параметров прокатки. Кроме того, полученные данные позволили создать модель черновой прокатки, точность которой была подтверждена экспериментальным путем.

По результатам анализа глубины проникновения деформации в черновой стадии прокатки были внесены изменения в технологию производства проката класса прочности K60 на стане-5000 ОАО "ВМЗ".

Разработанная модель охлаждения проката используется на производстве для определения режимов охлаждения проката различных классов прочности, что подтверждено актом о внедрении. Разработано более 20 технологических указаний по режимам охлаждения проката толщиной 15,7-52,0 мм классов прочности K52-K65. По результатам использования модели выход годного увеличился на 6,1%.

Методы исследований и достоверность результатов. Достоверность результатов исследований обеспечивалась применением современного оборудования и стандартизированных методик.

Экспериментальные исследования сопротивления деформации стали осуществлялись с помощью имитационного комплекса Gleeble 3800 и прокатного стана ДУО-300. Для теоретического исследования напряженно-деформированного состояния металла применялся программный комплекс для создания конечно-элементных моделей DEFORM 3D. Микроструктура образцов исследовалась при помощи микроскопа Axio Observer.D1m. Механические свойства готового проката исследовались на оборудовании компании Zwick/Roell.

Сделанные теоретические выводы были подтверждены промышленными экспериментами, проведенными на стане-5000 компании ОАО «ВМЗ».

Личный вклад автора. Зинягин А. Г. лично провел анализ существующих методов определения неравномерности деформации по толщине проката, способов моделирования процессов черновой прокатки и охлаждения листов, создал конечно-элементную модель процесса черновой прокатки, точность расчетов по которой была подтверждена экспериментально, проанализировал влияние стратегий обжатий на равномерность распределения размеров аустенитных зерен по толщине раската, разработал конечно-элементную модель процесса охлаждения в установке ускоренного охлаждения на стане 5000, с помощью которой разработал более 20 режимов охлаждения листов из трубных марок сталей различного сортамента.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Российской конференции ИМЕТ РАН (Москва, 2011 г.), конференции «Будущее машиностроения России» (Москва, 2013 г.), конференциях молодых специалистов Объединённой Металлургической Компании (Выкса, 2012 – 2013 гг.), Международной конференции Metal 2014 (Брно, Чехия, 2014 г.).

Публикации. По материалам диссертации было выполнено 8 публикаций общим объемом 0,91 п.л., из которых 5 в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, общих выводов, библиографического списка из 91 наименования; изложена на 158 страницах машинописного текста, содержит 90 рисунков и 25 таблиц.

Автор выражает благодарность научному руководителю Никитину Г.С., сотрудникам ОАО "ВМЗ", Колесникову А.Г., Мунтину А.В., Guagnelli Mauro за ценные советы и помощь в выполнении диссертации.

Во введении и главе 1 обоснована актуальность данной работы на примере проблем и задач, возникающих на производстве, а также на основе анализа существующих работ.

В главе 2 исследовалась величина сопротивления деформации стали класса прочности K60 двумя способами - на установке Gleeble и методом базисных давлений.

Испытания на сжатие на установке Gleeble проводились для трех скоростей деформации - 0,1, 1 и 10 с⁻¹ и для диапазона температур 700-1100 °С. Химический состав образцов приведен в Таблице 1.

Таблица 1.

Химический состав исследуемых образцов

C	Mn	Si	Cr	Ni	Nb	V	Ti
0.06	1.82	0.26	0.17	0.27	0.034	0.031	0.016

Образцы представляли собой цилиндры диаметром 10 мм и высотой 15 мм. Пример кривых, получаемых в результате испытаний, приведен на Рис. 2.1 в диссертационной работе. Получаемые кривые представляют собой зависимость истинные напряжения - истинные деформации.

Для расчёта сопротивления деформации при прокатке, используя стандартные модели поведения материала (Целиков А. И., Никитин Г. С., Симс О. и т. д.), необходимо сделать пересчет данных кривых и использовать среднее напряжение течения. Полученные данные представляют собой совокупность множества графиков зависимостей $\sigma(\varepsilon)$, использование которых неудобно и зачастую невозможно вследствие отсутствия полного набора данных у исследователя. Кроме того, в случаях, когда необходимо максимальное быстроедействие (например, в системах автоматизации станков), использование большого массива данных невозможно. Поэтому необходима их аппроксимация одной или несколькими формулами.

Учесть влияние скорости, температуры и степени деформации на величину среднего напряжения течения удобнее всего при использовании наиболее распространенной формулы (термомеханических коэффициентов):

$$\sigma = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot \varepsilon^{m_1} \cdot u^{m_2} \cdot e^{-m_3 T} \cdot \sigma_0, \quad (1)$$

где $A_1, A_2, A_3, m_1, m_2, m_3$ – эмпирические коэффициенты, ε – степень деформации и – скорость деформации, T – температура образца, σ_0 – значение среднего напряжения течения при базовых значениях параметров испытаний.

Данная формула дает хорошие результаты при определении среднего напряжения течения в диапазоне температур 700 - 950°C, однако при повышенных температурах ошибка начинает расти вследствие нарушения степенного закона зависимости среднего напряжения течения от степени

деформации. Наибольшая ошибка наблюдается при температуре 1100°C и скорости деформации 0,1 с⁻¹. Также значительная ошибка наблюдается при температуре 700°C и скорости деформации 10 с⁻¹. В первом случае такое расхождение результатов объясняется протеканием динамической рекристаллизации, а во втором – завершением $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения. Максимальная ошибка составляет 61,9%. Средняя по всем точкам – 8,4%

С целью повышения точности расчетов было предложено использовать следующий вид зависимости, подобранной автором для описания кривых зависимости величины среднего напряжения течения от степени деформации:

$$\sigma = A \cdot \dot{\epsilon}^{k_1} \cdot e^{-k_2 \cdot T} \cdot \sqrt{1 - e^{-k_3(T)}}, \quad (2)$$

где A , k_1 , k_2 – постоянные.

После проведения регрессионного анализа, получена следующая зависимость:

$$\sigma = 5263 \cdot \dot{\epsilon}^{0.0936 \cdot \frac{T}{1000}} \cdot e^{-3.7412 \cdot \frac{T}{1000}} \cdot \sqrt{1 - e^{23.271 \cdot (\frac{T}{1000})^2 - 29.812 \cdot \frac{T}{1000} + 10.71}} \quad (3)$$

При использовании предложенной формулы максимальная ошибка уменьшается до 17,7%. Средняя – до 5,5%.

Для подтверждения полученных данных следующим этапом определения сопротивления деформации стали класса прочности К60 было проведение эксперимента на лабораторном стане методом базисных давлений.

Для проведения экспериментальных исследований прокаткой, от промышленного сляба с химическим составом, соответствующим марке стали класса прочности К60 и приведенным в Таблице 1, были отобраны образцы с размерами $\approx 30 \times 180 \times 200$ в количестве 30 штук. Первая серия экспериментов проводилась с обжатием 17,5%, вторая серия экспериментов проводилась из уже прокатанных образцов, предварительно очищенных от окалины с обжатием 13,3%.

Вид кривых сопротивления деформации для обжатий в 17,5% и 13,3% представлен на Рис. 1. На них же нанесены данные, взятые из результатов испытаний на установке Gleeble для данной скорости и степени деформации (с учетом различного напряженного состояния при сжатии и прокатке). Наблюдается практически одинаковая зависимость $\sigma(\epsilon)$, при исследованных величинах обжатия, что означает, во-первых, достоверность полученных результатов и, во-вторых, возможность использования данных для расчетов процессов прокатки.

Далее было произведено сравнение расчетов силы прокатки с использованием полученных данных с промышленными данными. Для этого из проходов на стане-5000 выбирались те, которые соответствовали (приблизительно) эталонным условиям для метода базисных давлений. Было проанализировано более 100 проходов. В среднем, погрешность расчета составила 4,2%.

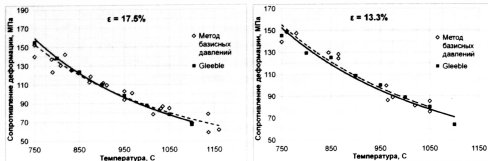


Рис. 1.

Сравнение результатов экспериментов на установке Gleeble с методом базисных давлений $\epsilon = 17,5\%$, $\dot{\epsilon} = 1,4 \text{ с}^{-1}$ и $\epsilon = 13,3\%$, $\dot{\epsilon} = 1,3 \text{ с}^{-1}$

В третьей главе приводится исследование неравномерности деформации по толщине раската во время черновой стадии прокатки и ее влияние на неравномерность распределения размеров аустенитного зерна.

В данной работе анализ выполнялся при помощи программного комплекса DEFORM-3D, предназначенного для создания конечно-элементных моделей. Рассматривалась задача симметричного тела, так как отсутствовала необходимость моделирования различных условий на верхней и нижней частях листа.

Клеть моделировалась в виде одного рабочего вала. Валок диаметром 1200 мм разбивался на 2000 четырехузловых элементов с меньшим размером у поверхности и большим в центре. Начальное поле температур задавалось равным 70°C .

Раскат моделировался путем разбиения прямоугольника размерами $156 \times 2000 \text{ мм}$ на 7000 прямоугольных элементов. Так как для данной модели важным являлось определение распределения деформаций по толщине листа в его центральной части, то длину сляба можно выбирать намного меньшей, чем в реальности. Начальная температура сляба была равной 1150°C . Исходное состояние сляба перед прокаткой получалось путем выдержки на воздухе в течение 80 секунд, что соответствует времени транспортировки от печей до клетки и прохождением сляба через печной гидросбив. Коэффициент теплопередачи между водой гидросбива и слябом принимался равным $21000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{K}$.

Свойства материала раската задавались при помощи кривых, полученных в главе 2. Связь напряжений и деформаций материала раската задавалась при помощи вязко-пластической модели поведения материала. Подтверждением верности задания модели материала является сравнение результатов при моделировании установки Gleeble в Deform 3D и результатов эксперимента. На Рис. 3.2 в диссертации приведено данное сравнение. Результаты хорошо согласуются между собой, максимальное отличие - 9%.

Коэффициент трения для задачи граничных условий находился при помощи анализа промышленных данных по методике А.И. Целикова. Полученная зависимость хорошо согласуется с данными, приводимыми в литературе.

Теплообмен между раскатом и валком задавался с использованием граничных условий третьего рода. Коэффициент теплопередачи от раската к валкам также выбирался исходя из промышленных данных, путем его подбора до совпадения температуры в модели с данными со стана. В итоге, его величина была принята равной $20000 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$, что соответствует данным, встречающимся в литературе.

Для определения характера накопления деформаций и распределения напряжений по сечению проката выполнялось моделирование для различных характеристик очага деформации. Для этого были составлены три различные стратегии обжатия заготовки до конечной толщины во время черновой стадии прокатки - с большими обжатиями в первых проходах, с большими обжатиями в последних проходах и с равномерными обжатиями.

Первая стратегия является оптимальной с точки зрения получения мелкого аустенитного зерна, вторая стратегия соответствует прокатке однократных слэбов, так как в данном случае в первых проходах (до поворота) ширина слэба мала, что позволяет осуществлять большие обжатия (до 20% за проход), наконец, третья стратегия аналогична типичному режиму прокатки на стане-5000 ОАО «ВМЗ», где распределение обжатий практически равномерно по всем проходам (вследствие ограничений по усилию и моменту прокатки).

Параметры деформации, такие как скорость прокатки, время выдержки и применение гидросбива задавались в соответствии с режимами прокатки на стане-5000. Начальная толщина слэба во всех случаях принималась равной 312 мм, конечная - 112 мм, что соответствует толщине раската при прокатке листа толщиной 25 мм.

После моделирования всех стратегий была проанализирована величина накопленной деформации после всех проходов для трех стратегий. Сравнение распределения накопленной эквивалентной деформации по толщине раската приведено на Рис. 3.10 диссертационной работы.

Для всех стратегий закон распределения деформаций одинаков - с наименьшими значениями у поверхности и центра раската и максимальными в глубине примерно $1/8$ толщины. Для стратегий с большими обжатиями в первых проходах и равномерными обжатиями максимальное значение находится на одной и той же глубине (толщина раската 112 мм) - 17,8 мм от поверхности (значения 1,76 и 1,78 мм/мм соответственно), для стратегии с большими обжатиями в последних проходах, глубина меньше - 15,2 мм, значение - 1,76 мм/мм. При этом проработка середины раската лучше при акценте на первые проходы, хотя отличие от стратегии с равномерными обжатиями небольшое - 1,32 и 1,31 мм/мм соответственно.

С целью верификации модели и проверки распределения деформаций по толщине раската проводился эксперимент с зачеканенными в сляб штифтами, выполненными из того же материала, что и сам сляб - стали класса прочности К60. Схема расположения штифтов показана на Рис. 3.11 в диссертационной работе.

Сляб размерами 140x2500x4000 мм прокатывался на стане-5000 по режиму, указанному в Таблице 20 диссертационной работы, с постоянной скоростью прокатки 2 м/с. Температура нагрева равнялась 1000°C.

После прокатки недокат снимался с рольганга и от него отрезался темплет, который затем разрезался по ширине на отдельные пластины. Результат эксперимента представлен на Рис. 2.

Далее проводилось моделирование данного случая. Раскат разбивался на 12000 элементов со сгущением сетки в районе штифтов. Каждый штифт разбивался на 700 элементов. Поскольку штифты были плотно зачеканены в сляб и так как их поверхность не была обработана, то между телом сляба и поверхностью штифтов было выбрано состояние прилипания, коэффициент теплопередачи - 40000 Вт/м²*К. Остальные параметры модели соответствовали описанным выше значениям. Результаты моделирования также приведены на Рис. 2.

Как видно из Рис. 2, результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментом. Максимальное отличие в суммарном обжатии по высоте составляет 4,2% (высота/ширина) - 9,04/13,68 мм (модель) и 9,4/12,4 мм (эксперимент) для среднего по глубине штифта. Полости вокруг данного штифта получились несколько меньше, чем в эксперименте. Размеры остальных штифтов также показали хорошее совпадение - 8,45/13,9 и 8,8/13 мм для штифта у поверхности; 9,24/12,45 (учитывая зависимость изменения размеров штифтов при увеличении глубины, можно предположить, что размеры штифта в середине раската были бы 9,8/11,9 мм) и 10,4/11,4 мм. Форма и размеры полости вокруг третьего штифта сходны с полученными в результате эксперимента.

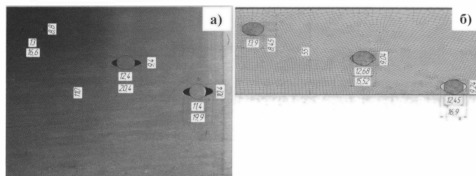


Рис. 2.

Конечные размеры штифтов - эксперимент а) и моделирование б)

Поскольку прокатка сляба со штифтами является сложным случаем для моделирования, и при этом было получено хорошее совпадение результатов, то можно сделать вывод об адекватности данных, получаемых при помощи созданной модели.

Известно, что с точки зрения получения мелкозернистой структуры оптимальной стратегией является большие обжатия в последних проходах. Однако, как показали результаты моделирования, при прокатке по данной стратегии, проработка середины раската является наихудшей из трех рассмотренных. Очевидно, что лучшей стратегией прокатки является совмещение двух – т.е. одновременно большие обжатия в первых проходах и последних.

Для анализа было проведено моделирование двух случаев – прокатки за 8 проходов, (стратегия со стана-5000 с большими обжатиями в последних проходах / оптимизированная стратегия) и прокатка за 10 проходов (стратегия со стана-5000 с равномерными обжатиями / оптимизированная стратегия). Оптимизация заключалась в выполнении больших обжатий в первых проходах.

В Таблицах 22 и 23 диссертационной работы представлены режимы прокатки, а на Рис. 3 и 4 представлено сравнение распределения накопленной деформации по толщине раската за все проходы, сравнение распределения накопленной деформации после последнего прохода для двух стратегий, а также распределение размера аустенитного зерна по толщине раската. Точки, в которых фиксировались значения, находились на одинаковой относительной глубине во всех проходах.

Расчет размера рекристаллизованного аустенитного зерна выполнялся по известной формуле:

$$D_r = 1.1 \cdot D_0^{0.67} \cdot \varepsilon^{-0.67}, \quad (4)$$

где D_r - рекристаллизованный размер зерна, D_0 - начальный размер зерна, ε - эквивалентная деформация, полученная за проход.

В результате видно, что обеспечивая большие обжатия в первых проходах, наблюдается более равномерное распределения размеров зерен по толщине раската, однако средний размер зерна больше (для восьми проходов по режиму на стане 5000 - 31,3 мкм, против 35 мкм для оптимизированной стратегии; для десяти проходов - 43,7 против 50,6 мкм). Для восьми проходов разность между максимальным и минимальным размерами зерен по толщине раската по режиму стана-5000 составила 15,5 мкм, для оптимизированной стратегии - 11,3 мкм. Для десяти проходов - 15,9 и 10,7 мкм соответственно.

Следует отметить, что для корректного сравнения обеспечивался одинаковый конечный размер раската (одинаковое суммарное обжатие), однако на практике всегда есть возможность варьировать конечную толщину промежуточного раската, поэтому разницу в размере зерна можно нивелировать путем задания больших и нарастающих обжатий в последних проходах.

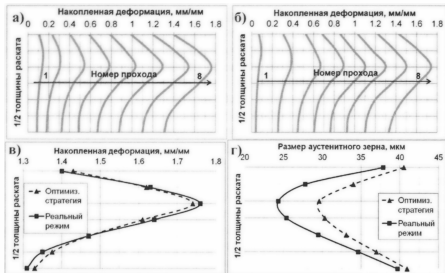


Рис. 3.

Распределение накопленной деформации по проходам (режим стан-5000 - а), оптимизированный - б), сравнение распределения накопленной деформации после последнего прохода в) и сравнения размеров зерен по толщине раската для 8 проходов г)

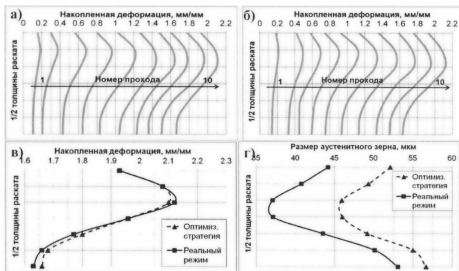


Рис. 4.

Распределение накопленной деформации по проходам (режим стан-5000 а), оптимизированный - б), сравнение распределения накопленной деформации после последнего прохода в) и сравнения размеров зерен по толщине раската для 10 проходов г)

В четвертой главе приводится разработка модели установки охлаждения на стане-5000 в г. Выкса и оптимизация на ее основе режимов охлаждения.

Охлаждение листа в такой установке происходит при помощи ламинарных струй, которые эффективно пробивают паровую подушку над листом и обеспечивают интенсивный теплообмен. Установка состоит из 36 коллекторов сверху и 36 коллекторов снизу, расположенных друг над другом. Длина каждого коллектора составляет 1 метр.

Поскольку физическая природа процессов, происходящих на поверхности раската, во время охлаждения сложна, то задание тепловых потоков на границе раздела сред в данном случае затруднительно, поэтому оптимальным подходом будет использование граничных условий третьего рода, где коэффициент теплоотдачи будет выступать как комплексный показатель, учитывающий все процессы одновременно.

Для определения температуры в любой точке листа необходимо решить нестационарное уравнение теплопроводности с граничными условиями третьего рода. Задача решалась с применением метода взвешенных невязок для билинейных четырехугольных элементов (МКЭ). Алгоритм решения был выполнен в программном комплексе Delphi, в результате чего была создана специализированная программа для расчета режимов охлаждения.

Значительное отношение ширины проката к его толщине позволяет перейти к рассмотрению двумерной задачи, а прямоугольное продольное сечение листа обуславливает выбор прямоугольных элементов, как наиболее качественно описывающих его форму. В пользу выбора двумерной задачи относительно одномерной говорит необходимость расчёта охлаждения для средней и крайних частей листа по длине, температура которых после прокатки может отличаться на величину до 30-40°C в зависимости от длины листа.

При этом основным направлением теплового потока внутри листа является вертикальное направление (от поверхности к середине листа), поэтому наименьший размера элемента необходимо обеспечить именно в этом направлении. Размер элемента выбирался на основе параметра Фурье. Чтобы уменьшить компьютерное время, необходимое на решение задачи, использовался неравномерный шаг сетки с увеличением шага по вертикальной оси в арифметической прогрессии.

На основе литературного анализа для модели принято изменение эффективности коэффициента теплопередачи в зависимости от температуры поверхности, показанное на Рис. 5.

Кроме того, для повышения точности расчета в модели задавалось начальное распределение температур в листе согласно расчетам при помощи модели, приведенной в Главе 3. Для этого была рассчитана температура после чистовой прокатки для листов различной толщины, после чего, путем аппроксимации кривых, полученные данные заносились в модель охлаждения.

Во время ускоренного охлаждения происходит окончательное формирование структуры, при этом, поскольку при превращении из аустенита в

феррит или другую фазу выделяется значительное количество тепла, необходимо учитывать данное явление при расчете температуры листа.

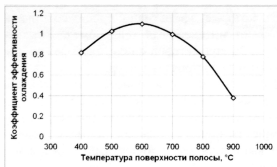


Рис. 5.

Поправка на эффективность охлаждения в зависимости от температуры поверхности листа

Помимо выделения тепла, данное превращение влияет и на физические свойства металла, в особенности на теплоемкость и теплопроводность. Поскольку величина теплового потока не известна до расчета температуры на данном шаге, необходимо реализовать итерационный процесс, пока разница в определении температур не будет меньше $0,001^{\circ}\text{C}$. В этой же процедуре можно также учесть изменение теплоемкости и теплопроводности.

Для проведения корректных расчетов необходимо произвести адаптацию модели под существующую установку охлаждения. В описываемой задаче под адаптацией подразумевается выбор коэффициентов теплопередачи, входящих в граничные условия третьего рода.

Адаптация модели осуществлялась на металле текущего производства в широком диапазоне размеров проката и технологических параметров охлаждения. Поскольку известны средние значения показаний пирометров по длине листа, можно подобрать такой коэффициент теплопередачи, при котором расчётные и измеренные температуры начала и окончания охлаждения совпадают.

В результате адаптации установлено, что зависимость коэффициента теплопередачи от расходов воды носит линейный характер. При этом изменение удельного расхода воды на $2 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{мин}$ вызывает изменение коэффициента теплопередачи на $250 \text{ Вт}/\text{м}^2\cdot\text{K}$ (Рис. 6).

Для модели входными данными являются: скорость охлаждения, температуры начала и конца охлаждения, скорость транспортировки листа, длина задействованного участка охлаждения и схема включения коллекторов (все подряд, через один, через два и т.д.). Все эти данные, а также схема работы коллекторов задаются в окне программы. Результатом расчёта являются температуры верхней поверхности, середины и нижней поверхности листа в течение всего процесса охлаждения и после него.

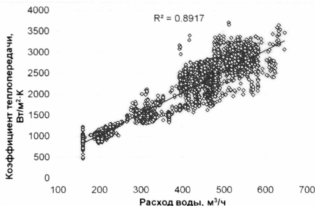


Рис. 6.

Зависимость коэффициента теплопередачи от удельного расхода воды

Благодаря большой длине установки охлаждения на стане-5000, охлаждение можно выполнять по двум стратегиям - с включением всех коллекторов подряд и с включением коллекторов через один. Теоретически, оба режима позволяют достигать одинаковой температуры конца охлаждения и одинаковой средней скорости охлаждения. Однако, при включении коллекторов подряд, происходит быстрое охлаждение поверхности, вследствие чего возникает большой температурный градиент по толщине листа. При включении коллекторов через один данное обстоятельство смягчается наличием воздушного участка между двумя включенными коллекторами, в результате чего температура по толщине выравнивается. Поэтому было решено исследовать распределение свойств и микроструктуры по толщине листа для двух стратегий. Для этого на стане 5000 проводился эксперимент по охлаждению листов толщиной 39 мм из стали класса прочности K60.

При помощи созданной модели рассчитывались режимы охлаждения, обеспечивающие одинаковую конечную температуру и среднюю скорость охлаждения. Расчеты температуры раската показаны на Рис. 7. После прокатки от листов отрезались темплеты, которые затем разрезались по толщине. Полученные образцы испытывали на растяжение и исследовали их микроструктуру.

При использовании стратегии с включением коллекторов через один (стратегия 2) микроструктура получилась более крупнозернистая и с большим содержанием феррита относительно бейнита, однако более равномерная по толщине, чем при стратегии 1 (включение коллекторов подряд), что отразилось и на равномерности механических свойств по толщине. Максимальный разброс значений временного сопротивления для стратегии 1 - 70 МПа, для стратегии 2 - 45 МПа, по напряжению течения - 78/51 МПа, по относительному удлинению - 4,7/3,8% (см. Табл. 25 диссертационной работы).

По результатам проведенного эксперимента можно сделать вывод, что включение коллекторов через один способствует повышению равномерности распределения механических свойств по толщине листа.

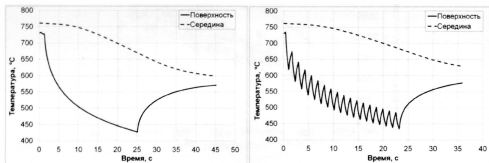


Рис. 7.

Кривая охлаждения листового проката толщиной 39 мм при охлаждении по стратегии 1 слева и 2 - справа

Успешная адаптация разработанной модели позволила проводить расчеты режимов охлаждения для всего сортамента, производимого на стане 5000 ОАО «Выксунский металлургический завод». Режимы охлаждения, рассчитанные с применением модели, обеспечивают минимальный разброс скоростей и температур окончания ускоренного охлаждения. Отклонения скорости охлаждения составили не более $0,5-1^{\circ}\text{C}/\text{с}$, а температуры окончания охлаждения – не более 10°C .

При помощи разработанной модели были рассчитаны режимы охлаждения для более чем 20 различных марок сталей и размеров конечной продукции. Повышение выхода годного, с точки зрения соблюдения требований по механическим свойствам, после начала использования модели составило 6,1%. По результатам работы автором получен акт о внедрении, подтверждающий эффективность модели и ее реальное применение на действующем производстве.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Определена зависимость величины сопротивления деформации от температуры и степени обжатия для стали класса прочности K60, проведено сравнение двух методик определения величины сопротивления деформации - на установке Gleeble и на прокатном стане. Обе методики показали практически одинаковые результаты, что говорит о точности полученных данных.

Предложена новая формула для аппроксимации данных с установки Gleeble, что по сравнению с традиционной формулой позволило уменьшить максимальную ошибку аппроксимации с 61,9% до 17,7% и среднюю по всем точкам с 8,4% до 5,5%.

2. В программном комплексе Deform-3D разработана модель черновой прокатки стана-5000, которая позволяет определять температуры, величины деформаций и напряжений по толщине проката.

На основе моделирования показано, что оптимальной стратегией обжатий с точки зрения проработки середины раската является применение больших обжатий в первых проходах ввиду более глубокого (по толщине) положения максимальной накопленной эквивалентной деформации – 17,8 мм против 15,2 мм при толщине раската 112 мм. Кроме того, в середине раската величина накопленной деформации наибольшая для трех стратегий – 1,32 мм/мм против 1,28 для стратегии с большими обжатиями в последних проходах и 1,31 для стратегии с равномерными проходами.

3. Показано, что обеспечивая большие обжатия в первых проходах, наблюдается большая равномерность распределения размеров рекристаллизованных аустенитных зерен по толщине раската, однако средний размер зерна больше. Для восьми проходов по режиму стана-5000 разница между максимальным и минимальным размером зерна составила 15,5 мкм, для оптимизированной стратегии – 11,3 мкм. Для десяти проходов – 15,9 и 10,7 мкм соответственно. Для восьми проходов по режиму на стане-5000 средний размер зерна составил 31,3 мкм против 35 мкм для оптимизированной стратегии; для десяти проходов – 43,7 против 50,6 мкм.

4. Для проверки результатов, получаемых при помощи модели, была смоделирована прокатка сляба с зачеканенными в боковую грань штифтами, расположенными на разной глубине. Результаты моделирования сравнивались с результатами промышленного эксперимента, показана их хорошая сходимость. Максимальное отличие в конечном размере штифтов – 0,6 мм при начальном размере 11 мм.

Описан процесс образования полостей вокруг зачеканенных в сляб штифтов, результаты которого могут быть использованы при анализе образования внутренних дефектов в слябе.

5. Разработана модель установки контролируемого охлаждения (УКО), которая была проверена экспериментальным путем и используется на производстве для определения параметров охлаждения (скорость транспортировки, расходы воды и т.д.).

Установлена зависимость коэффициента теплопередачи от расходов воды с учетом выделения тепла при фазовых превращениях, изменением свойств стали (теплоемкость, теплопроводность), неравномерности начальной температуры раската перед охлаждением, а также с учетом температуры охлаждающей воды.

6. На основе промышленного эксперимента показано, что верной стратегией охлаждения толстых листов является включение коллекторов через один, обеспечивающий выравнивание температуры по сечению листа.

Для проведения данного эксперимента два сляба из стали класса прочности K60 прокатывались до толщины 39 мм по одинаковым режимам.

Затем производилось их охлаждение до одной и той же температуры с одинаковой скоростью охлаждения по режимам, рассчитанным с использованием разработанной модели.

Показано, что для стратегии с включением коллекторов через один микроструктура получилась более крупнозернистая и с большим содержанием феррита относительно бейнита, однако более равномерная по толщине, чем для стратегии с включением коллекторов подряд, что отразилось и на равномерности механических свойств по толщине. Максимальный разброс значений временного сопротивления для стратегии 1 - 70 МПа, для стратегии 2 - 45 МПа, напряжения течения - 78/51 МПа, относительного удлинения - 4,7/3,8%.

7. Использование разработанной модели позволяет повысить точность расчета конечной температуры и скорости охлаждения листа до $\pm 10^{\circ}\text{C}$ и $\pm 1^{\circ}\text{C}/\text{с}$ соответственно. Выход годного, с точки зрения соблюдения требований по механическим свойствам, был увеличен на 6,1%.

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. Распределение деформации по толщине сляба при прокатке на толстолистовом стане / А.Г. Зинягин [и др.] // Заготовительное производство в машиностроении. 2013. № 11. С. 32-36. (0,3 п.л./0,1 п.л.).

3. 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.).

4. 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./0,1 п.л.).

5. Математическое моделирование процесса ускоренного охлаждения листа на Стане-5000 / А.Г. Зинягин [и др.] // Проблемы чёрной металлургии и материаловедения. 2013. № 1. С. 9-15. (0,3 п.л./0,12 п.л.).

6. Зинягин А.Г. Исследование неравномерности деформации в подкате при прокатке с различным распределением обжатий на стане-5000: Тезисы доклада // Материалы конференции Будущее машиностроения России. Москва. 2013. С. 106. (0,07 п.л.).

7. Зинягин А.Г. Модель Установки Охлаждения на Стане-5000: Тезисы доклада // Материалы Российской ежегодной конференция молодых учёных и аспирантов «Физикохимия и технология неорганических материалов». ИМЕТ РАН. Москва. 2012. С. 596. (0,07 п.л.).

8. Голенков М.А., Зинягин А.Г. Методика расчета времени охлаждения проката и размеров холодильников прокатных станов // Заготовительное производство в машиностроении. 2008. № 11. С. 38-43. (0,3 п.л./0,15 п.л.).