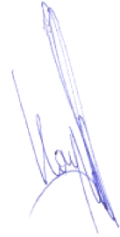


На правах рукописи



**Наумов Антон Алексеевич**

**«РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ  
ЛИСТА ИЗ ТРУБНЫХ И АВТОМОБИЛЬНЫХ СТАЛЕЙ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ФИЗИЧЕСКОГО И  
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ»**

Специальность 05.16.05 - Обработка металлов давлением

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Колбасников Николай Георгиевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук  
Юсупов Владимир Сабитович,  
  
кандидат технических наук  
Орлов Виктор Валерьевич

Ведущая организация – ОАО "Северсталь"

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.03 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, СПб, ул. Политехническая, д. 29, химический корпус, ауд. 51.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 212.229.03,  
доктор технических наук



Кондратьев С.Ю.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Насущной проблемой российских производителей проката является выход на мировой уровень качества производимого листа. Одной из основных задач повышения качества проката при сохранении или понижении его себестоимости является обеспечение заданного комплекса механических и эксплуатационных свойств, а также стабильность заданных свойств.

В настоящее время при разработке технологий передовые мировые производители проката используют компьютерные программы, позволяющие рассчитывать механические свойства и параметры структуры сталей. Основой подобных программ являются базы данных "химический состав – параметры обработки – структура – свойства", которые составляются при помощи методов физического моделирования термомеханических воздействий на металл. Одна из таких программ - лицензионная программа *Hot Strip Mill Model (HSMM)*, разработанная по инициативе Американского института чугуна и стали. В базу данных этой программы входят 10 базовых марок, в том числе низколегированные углеродистые и микрелегированные стали, для которых выполнен весь комплекс структурных исследований и механических испытаний. В программу заложены математические модели процессов структурообразования и формирования механических свойств металла при пластической деформации и фазовых превращениях. Ее адаптация к реальным промышленным прокатным станам позволяет усовершенствовать существующие и создавать новые технологии производства листовой продукции.

С учетом параметров горячей прокатки и режимов охлаждения подобные программы позволяют рассчитывать такие параметры структуры и свойства металла, как размеры зерна аустенита и феррита, содержание феррита и перлита, упрочнение от выделения карбонитридов микрелегирующих элементов, пределы текучести и прочности, удлинение при растяжении. Кроме того, программы типа *HSMM* выполняют расчеты энергосиловых параметров прокатки, выполняют проверку элементов оборудования на перегрузки, рассчитывают формирование профиля полосы, температуру проката по ходу технологического процесса обработки по длине и толщине проката, включая ускоренное или естественное охлаждение.

Нельзя считать, что программы типа *HSMM* являются всеобъемлющими и могут рассчитать любое структурное состояние, напротив, они требуют постоянного совершенствования и обновления в связи с формированием новых представлений и знаний в материаловедении, в частности, о бейнитных превращениях. Но, тем не менее, подобные модели начинают приносить положительные эффекты, в том числе экономические, при разработке новых технологий, новых материалов, при оптимизации технологий прокатки по комплексу механических свойств сталей.

С использованием программы *HSMM* в данной работе были предложены первые в России модели прокатных станов, в том числе непрерывного широкополосного стана 2000 и реверсивного толстолистого стана 5000 ОАО "Северсталь". При помощи этих моделей были рассчитаны параметры структуры и механические свойства сталей в результате многопроходной деформации при переменных температуре, степени и скорости деформации, учитывая фазовые превращения при охлаждении. Информацию об этих физических процессах, протекающих в металле, можно получить с помощью физического моделирования на специальных комплексах.

Возможности физического моделирования процессов горячей прокатки с использованием комплекса *Gleeble-3800* и последующим исследованием структуры и свойств обработанного металла позволяют определить термомеханические параметры прокатки сталей с заданной структурой и механическими свойствами, а применение виртуальных моделей прокатных станов дает возможность анализа путей реализации этих параметров на промышленных прокатных станах. Таким образом обеспечивается возможность разработки прокатных технологий производства сталей с заданной структурой и механическими свойствами.

В силу многих причин в России до настоящего времени не использовались компьютерные технологии управления свойствами проката, основанные на физически обоснованных интегральных математических моделях, описывающих формирование структуры и свойств сталей в процессах их обработки. На многих предприятиях используются статистические модели, имеющие ограниченные возможности при разработке новых технологий и материалов.

Таким образом, совершенствование и разработка новых технологий горячей прокатки листа с использованием методов физического и математического моделирования процессов формирования структуры и

механических свойств сталей в зависимости от режимов обработки является *актуальной задачей*.

### **Цель работы и задачи исследования**

**Целью работы является: совершенствование и разработка новых технологий горячей прокатки листа из трубных и автомобильных сталей с использованием методов физического и математического моделирования процессов формирования структуры и механических свойств материалов.**

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- создание виртуальных компьютерных моделей прокатных станов 2000 и 5000 ОАО "Северсталь" и адаптация программы *HSMM* к условиям прокатки на данных станах;
- оптимизация технологии прокатки трубной микролегированной стали марки 10Г2ФБ на толстолистовом стане 5000 для получения однородной структуры листа при сохранении заданного уровня механических и ударных свойств;
- разработка технологии горячей прокатки двухфазной ферритно-мартенситной стали на непрерывном широкополосном стане 2000;
- разработка технологии горячей прокатки *TRIP*-стали на непрерывном широкополосном стане 2000.

### **Научная новизна**

При выполнении работы получены результаты, отличающиеся *научной новизной*, в том числе:

- разработаны температурные режимы прокатки и контролируемого охлаждения толстого листа на стане 5000 ОАО «Северсталь», обеспечивающие получение однородной структуры проката без перлитной полосчатости, предусматривающие:
  - прокатку без подстуживания ("покачивания") между черновой и чистовой прокатками;
  - регулировку температуры конца прокатки при помощи охлаждения гидросбивом, установленным в клетки стана;
  - выбор температуры конца прокатки приблизительно равной температуре начала ферритного превращения в соответствии с термokinетической диаграммой распада аустенита;
  - ускоренное охлаждение от температуры конца прокатки до тем-

ператур 550÷600 °С при помощи установки ускоренного охлаждения; предложенный режим обеспечивает следующие преимущества:

- 1) значительное снижение структурной неоднородности и устранение перлитной полосчатости металла;
- 2) обеспечение заданного уровня механических свойств;
- 3) высокое значение ударной вязкости вплоть до значений  $KCU^{-60} = 420 \div 430 \text{ Дж/см}^2$ ;

4) повышение производительности стана минимум на 10÷15 % по сравнению с контролируемой tandemной прокаткой 2 или 3 полос с подстуживанием на рольганге между черновой и чистовой прокатками;

- на основании выполненного статистического анализа зависимостей доли вязкой составляющей при испытаниях падающим грузом (ДВС при ИПГ) от многих параметров по 2000 прокатанным полосам был устранен недостаток предложенной технологии, а именно - низкая ДВС при ИПГ; за счет корректировки химического состава этот недостаток был устранен;

- с помощью физического моделирования на комплексе *Gleeble-3800*, установлено, что температура ферритного превращения, во многом определяющая свойства горячекатаного толстого листа, существенно зависит как от степени растворения микролегирующих элементов, так и от температуры окончания прокатки:

- при  $T_{к.п.} > T_{прец.}$  ( $T_{к.п.}$  – температура конца прокатки,  $T_{прец.}$  – температура выделения карбонитридов микролегирующих элементов) температура начала ферритного превращения  $T_{ф.п.}$  повышается на 20÷30 °С;

- при  $T_{ф.п.} < T_{к.п.} < T_{прец.}$  температура начала ферритного превращения  $T_{ф.п.}$  понижается на 5÷40 °С;

- с помощью физического моделирования на комплексе *Gleeble-3800* выявлено, что для получения двухфазной ферритно-мартенситной структуры проката из стали *DP-Mo-600* необходимо обеспечить требуемое время выдержки для полного протекания ферритного превращения и обогащения углеродом аустенита с последующим быстрым охлаждением на мартенсит. При помощи программы *HSM*, адаптированной к условиям прокатки на непрерывном широкополосном стане 2000, показана возможность реализации температурно-скоростных режимов прокатки автомобильной двухфазной ферритно-мартенситной стали на этом стане;

- при помощи методов физического и математического моделирования установлены деформационные и температурно-временные параметры прокатки, обеспечивающие возможность изготовления автомо-

бильной *TRIP*-стали на непрерывном широкополосном стане 2000 ОАО "Северсталь". Определены режимы обработки, обеспечивающие получение наибольшего количества остаточного аустенита (до 15 %) для стали исследованного химического состава;

- для анализа существующих и разработки новых технологий прокатки созданы виртуальные модели прокатных станов – реверсивного толстолистого стана 5000 и непрерывного широкополосного стана 2000 Череповецкого металлургического комбината ОАО "Северсталь", включающие все единицы оборудования, непосредственно участвующие в нагреве, транспортировке, пластической деформации, подстуживании, охлаждении металла и учитывающие все возможные изменения параметров горячей прокатки. Созданные виртуальные модели использованы для расчета влияния режимов горячей прокатки и контролируемого охлаждения на механические свойства и структуру сталей, а также для расчета и перераспределения по проходам энергосиловых параметров прокатки.

### **Практическая ценность и реализация работы**

В результате проведенных в диссертационной работе исследований с использованием методов физического и математического моделирования разработаны технологии горячей прокатки для станов 5000 и 2000 ОАО «Северсталь»:

- толстого листа из трубной стали 10Г2ФБ с однородной структурой без перлитной полосчатости;
- листа толщиной 3÷4 мм из высокопрочной автомобильной ферритно-мартенситной стали *DP-Mn-600*;
- листа толщиной 3÷4 мм из высокопрочной автомобильной *TRIP*-стали.

На стане 5000 ОАО «Северсталь» проведено пять опытных прокаток толстого листа из трубной стали 10Г2ФБ, в результате которых получен прокат с однородной структурой и требуемым комплексом механических свойств.

В результате большого количества расчетов при помощи программы *HSM* (температура прокатки по проходам, энергосиловые параметры прокатки, параметры структуры и механические свойства проката) и сравнения расчетных параметров с фактическими данными, определенными в заводской лаборатории ОАО "Северсталь", компьютерная программа *HSM* адаптирована к условиям горячей прокатки на станах 2000 и 5000, откалибрована по температуре и механическим свойствам; в ре-

зультате выполненных исследований погрешности расчетов механических свойств для исследованных марок сталей не превышают 5%.

Важным результатом выполненной работы является внедрение программы *HSMM* в технологические заводские разработки ОАО "Северсталь". Ведутся работы по более широкому внедрению программы *HSMM* в листопрокатном производстве на стане 2000. Выполняются совместные работы по совершенствованию программы *HSMM* для расчетов параметров структуры и механических свойств сталей всего сортамента сталей листовых станов ЧерМК.

### **Основные научные положения, выносимые на защиту**

1. Виртуальные модели реверсивного толстолистого стана 5000 и непрерывного широкополосного стана 2000, адаптированные к производственным условиям прокатки и предназначенные для совершенствования существующих и разработки новых технологий горячей прокатки.

2. Термокинетические диаграммы распада аустенита для стали марки 10Г2ФБ в литом и деформированном состоянии.

3. Результаты анализа способов повышения доли вязкой составляющей при испытаниях падающим грузом.

4. Условия получения однородной структуры трубной стали 10Г2ФБ и технология прокатки толстого листа на стане 5000 ОАО «Северсталь», которая обеспечивает отсутствие перлитной полосчатости, высокую ударную вязкость, сохранение заданного уровня механических свойств при повышении производительности стана, а также результаты ее опробования в промышленных условиях.

5. Технология горячей прокатки, позволяющая получить двухфазную ферритно-мартенситную сталь на непрерывном широкополосном стане 2000 ОАО «Северсталь».

6. Технология горячей прокатки, позволяющая получить высокопрочную автомобильную *TRIP*-сталь с остаточным аустенитом на непрерывном широкополосном стане 2000 ОАО «Северсталь».

### **Апробация работы**

Основные положения работы доложены и обсуждены на международных научно-технических конференциях «Современные металлические материалы и технологии» (СММТ) Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, СПб, 2007-2009 гг.; всерос-

сийских межвузовских научно-технических конференциях студентов и аспирантов в рамках XXXVI - XXXVIII Недель науки СПбГПУ в 2007-2009 гг.; политехническом симпозиуме «Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона» СПбГПУ, 2007 г.; XVI Международной научно-методической конференции «Высокие интеллектуальные технологии и инновации в образовании и науке» СПбГПУ, 2009 г.; XIII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах» СПбГПУ, 2009 г.; международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов», Москва, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, 2009 г..

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 12 печатных работ, из них 2 – в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы из 165 наименований. Работа изложена на 209 страницах машинописного текста, содержит 99 рисунков и 54 таблицы.

Автор выражает глубокую благодарность сотрудникам кафедры «Пластическая обработка металлов» СПбГПУ и лаборатории «Исследование и моделирование структуры и свойств металлических материалов» НИИ Материалов и технологий СПбГПУ.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** раскрыта актуальность и обоснована цель проведенных исследований, сформулированы задачи, научная новизна и практическое значение диссертационной работы.

В **первой главе** дано описание методов математического и физического моделирования процессов формирования структуры и механических свойств сталей. При анализе методов прогнозирования свойств горячекатаного металла подробно рассмотрена структура компьютерных программ, в основу которых заложены физические модели внутренних процессов, происходящих в аустените при деформационном упрочнении и термическом разупрочнении, во время выпадения упрочняющих фаз, при фазовых превращениях. Рассмотрена программа *VAI-Q-Strip*, разработанная фирмой *VOEST-ALPINE STAHL* (Австрия) и программа *HSMM*

(*Hot Strip Mill Model*), разработанная фирмой *INTEG process group., inc.* по инициативе Американского института чугуна и стали.

При анализе методов физического моделирования рассмотрены устройство и возможности современного комплекса *Gleeble-3800*, предназначенного для имитации процессов термомеханической обработки металлов и сварки. Рассмотрены методики, использованные при проведении экспериментальных работ.

Во **второй главе** диссертации поставлена задача разработки технологии прокатки толстого листа из трубной стали марки 10Г2ФБ, обладающего однородной структурой без перлитной полосчатости при сохранении уровня механических и ударных свойств. Показаны негативное влияние перлитной полосчатости на свойства трубных сталей и выполнен анализ причин ее формирования, из которых основными являются:

- 1) неравномерное распределение углерода в литой структуре сляба;
- 2) торможение или полное блокирование процессов рекристаллизации аустенита после выделения карбонитридов микролегирующих элементов, что приводит к вытягиванию зерен аустенита вдоль направления прокатки;
- 3) неравномерное перераспределение углерода при ферритном превращении, что связано с оттоком атомов углерода к обогащенным углеродом аустенитным областям;
- 4) вытягивание областей, обогащенных углеродом, вдоль направления прокатки и образование в них перлита, что окончательно формирует перлитную полосчатость.

Анализ причин появления полосчатости позволил выбрать метод снижения структурной неоднородности, состоящий из последовательности действий: *прокатка без паузы до достижения требуемой толщины с регулированием температуры проката при помощи гидросбива в клетке прокатного стана → окончание прокатки перед началом ферритного превращения → ускоренное охлаждение в установке контролируемого охлаждения до температуры 550÷600 °С → естественное охлаждение.* Использование гидросбива в клетке стана необходимо для обеспечения назначенной температуры окончания прокатки. Завершение прокатки при более высоких температурах может привести к росту размера зерна аустенита.

Рассчитанные при помощи программы *HSMM* температурные режимы прокатки по предлагаемой и используемой на стане 5000 технологии контролируемой прокатки представлены на рис. 1, 2.

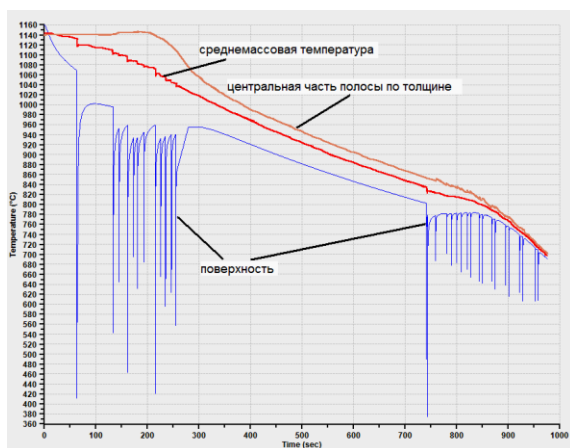


Рис. 1. Температурный режим технологии контролируемой прокатки, используемой на стане 5000

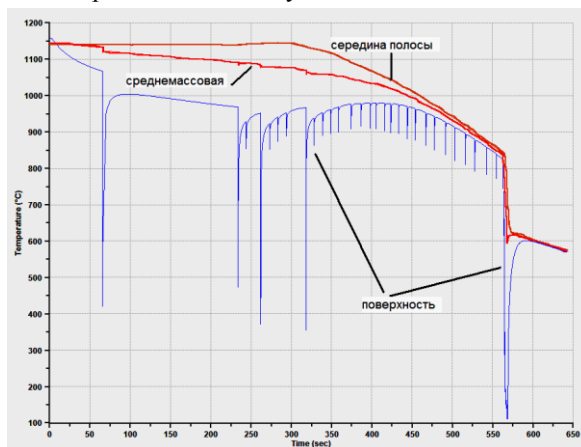


Рис. 2. Температурный режим предлагаемой технологии прокатки

Для определения границ существования однофазной аустенитной области было выполнено дилатометрическое исследование и построена термокинетическая диаграмма распада аустенита стали 10Г2ФБ в диапазоне скоростей охлаждения  $0,1 \div 30$  °C/с на комплексе *Gleeble-3800*. Была выполнена оценка влияния деформации в аустенитной области на температуру начала ферритного превращения, рис. 3.

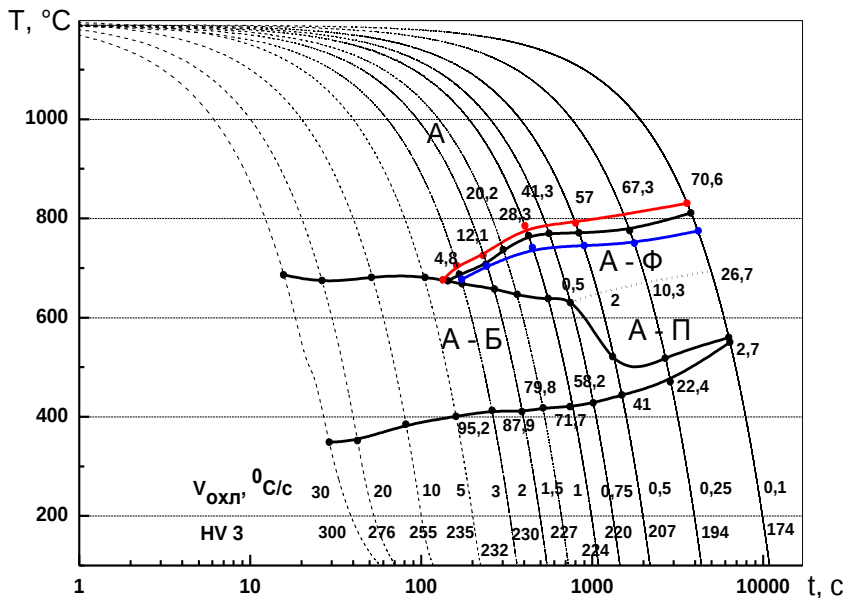


Рис. 3. Термокинетическая диаграмма распада аустенита стали 10Г2ФБ для литого материала (черная линия), для деформированного и рекристаллизованного аустенита (красная линия), для деформированного нерекристаллизованного (синяя линия)

Предварительную деформацию перед охлаждением осуществляли по двум режимам:

1) в три этапа при температурах 1100, 1040 и 980 °C со степенями деформации  $\varepsilon_1 = 0,2$ ;  $\varepsilon_2 = 0,2$  и  $\varepsilon_3 = 0,1$  (красная кривая на рис. 3);

2) в четыре этапа при температурах 1100, 1040, 980 °C и на 10÷20 °C выше температуры начала ферритного превращения для каждой скорости охлаждения после деформации со степенью деформации  $\varepsilon_1 = 0,2$ ;  $\varepsilon_2 = 0,2$ ;  $\varepsilon_3 = 0,1$  и  $\varepsilon_4 = 0,2$  (синяя кривая на рис. 3).

Повышение температуры начала ферритного превращения в первом случае обусловлено повышением движущих сил превращения за счет увеличения энергии аустенита в связи с измельчением зерна при рекристаллизации. Понижение температуры превращения во втором

случае вызвано преобладающим эффектом торможения диффузии углерода за счет дополнительной энергии связи углерода с дислокациями, которые имеют повышенную плотность в нерекристаллизованном состоянии. По литературным данным энергия связи атома углерода с ядром дислокации составляет  $0,7 \div 0,75$  эВ.

На рис. 3 видно, что предварительная деформация образцов в аустенитной области при температурах выше температуры выпадения карбидов и карбонитридов микролегирующих элементов повышает температуру ферритного превращения на  $20 \div 25$  °С. Деформация образцов при температурах ниже температур преципитации и накопление упрочнения при прокатке понижает температуру ферритного превращения на  $5 \div 40$  °С. Скорость охлаждения толстого листа конечной толщины ~20 мм на стане 5000, согласно рис. 1, 2, составляет приблизительно  $1 \div 2$  °С/с в области температур начала ферритного превращения. Для этих условий температура начала ферритного превращения предварительно деформированного металла составляет  $740 \div 770$  °С/с. С увеличением скорости охлаждения после деформации отклонение температуры от литого состояния возрастает.

***Согласно построенным термокинетическим кривым распада аустенита для завершения прокатки стали 10Г2ФБ в однофазной области на стане 5000, необходимо прокатывать полосу в последних пропусках при температуре не ниже  $740 \div 770$  °С в зависимости от скорости охлаждения листа в рассматриваемом температурном диапазоне.*** При этом следует заметить, что скорость охлаждения зависит от толщины проката. При помощи пирометров, установленных на прокатном стане, фиксируется температура поверхности раската, а средне-массовая температура металла всегда несколько выше, чем температура поверхности.

Для анализа возможности реализации выбранных режимов горячей прокатки толстого листа из стали 10Г2ФБ на стане 5000 было решено использовать компьютерную программу *HSMM*, одно из назначений которой состоит в расчете параметров структуры и механических свойств проката. Для этого была создана виртуальная модель стана, учитывающая характеристики оборудования и особенности технологии прокатки.

Расчет тепловых потерь прокатываемого металла, заложенный в программу *HSMM*, не учитывает отток тепла от металла в ролики рольгангов. Поскольку время подстуживания раската между черновой и чистой прокатками достаточно велико, то отсутствие учета этих потерь

приводило к значительным различиям расчетных и фактических (определенных по пирометру) температур начала чистовой прокатки. Для устранения этого недостатка была создана виртуальная модель стана с двумя идентичными клетями (рис. 4), удаленными друг от друга. Потери тепла на контакт с роликами рольганга обеспечивают виртуальные установки водяного охлаждения, расположенные между клетями. Согласно этой модели стана черновая стадия прокатки осуществляется в первой клетке, а чистовая – во второй. Распределение времени прокатки по отдельным операциям соответствует реальному процессу.



Рис. 4. Схема расположения оборудования стана 5000, представленная в программе *HSMM*, со второй виртуальной клетью для чистовой прокатки; *RF1* – печь; *DB* – отдельно стоящий гидросбив; *RR* – черновая клеть; *IC* – установка для водяного охлаждения; *PY* – пирометр; *RF* – чистовая клеть; *SP* – спрейерная установка; *CT* – стол для охлаждения

Расчетная программа была откалибрована по температуре, подобрана базовая марка стали, наиболее подходящая к стали 10Г2ФБ по химическому составу. После калибровки расчетов программы *HSMM* по фактическим механическим свойствам 26 прокатанным полосам различной толщины программа *HSMM* должна выполнять расчеты механических свойств после горячей прокатки и охлаждения с заданной скоростью с точностью по пределу прочности:  $\pm 2,3 \%$ , по пределу текучести:  $\pm 3,5 \%$ , по относительному удлинению:  $\pm 4,8 \%$ .

При помощи программы *HSMM* были рассчитаны режимы прокатки и охлаждения толстого листа без перлитной полосчатости согласно предлагаемой технологии при сохранении заданного уровня механических свойств толстого листа.

Три опытные прокатки на стане по получению однородной структуры толстого листа без перлитной полосчатости показали следующее:

- технология, выбранная для получения однородной структуры листа, при выполнении заданных режимов прокатки обеспечивает отсутствие перлитной полосчатости;
- программа *HSMM* хорошо рассчитывает свойства металла, средняя относительная погрешность при моделировании опытных прокаток по сравнению с фактическими заводскими данными не

превышает по пределу текучести 20,8 МПа (6,7 %), по пределу прочности 5,4 МПа (2,3 %), по относительному удлинению 0,86 %;

- механические свойства трех прокатанных полос находятся на заданном уровне, ударная вязкость превышает его.

Однако, в первых трех прокатанных полосах неудовлетворительной оказалась доля вязкой составляющей при испытании падающим грузом (ДВС при ИПГ): при заданной ДВС = 90 % прокатанные образцы показали ДВС = 15÷85 %. Отметим, что программа *HSMM* рассчитывает  $\sigma_T$ ,  $\sigma_B$ ,  $\delta$ , размер зерна аустенита, феррита, содержание феррита и перлита, но расчеты ударной вязкости и ДВС в программу не заложены.

Для повышения ДВС был выполнен статистический анализ влияния химического состава и механических свойств стали, а также технологических параметров прокатки на ДВС почти для 2000 прокатанных полос из стали 10Г2ФБ. Однако ДВС оказалась сложной для статистического анализа величиной, на значение которой влияет множество, зачастую взаимообусловленных, факторов.

Удалось выявить негативное влияние на ДВС содержания углерода и, в меньшей степени, ванадия и меди. Выполнив прокатку опытной партии металла из двух полос с пониженным содержанием углерода, ванадия и меди (химический состав

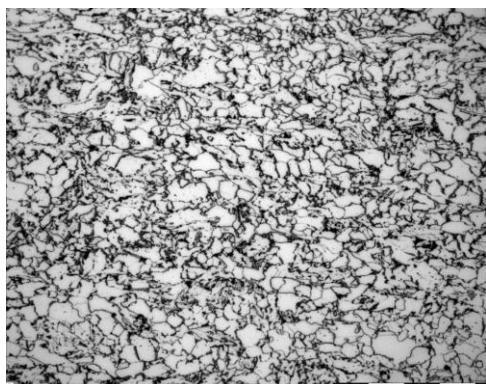


Рис. 5. Микроструктура полосы после пятой опытной прокатки,  $\times 500$

представлен в табл. 1) было получено значение ДВС от 95 до 100 % для всех участков (переднего, среднего и заднего) полос. При этом механические свойства находились в заданных пределах, а ударная вязкость  $KCU^{-60}$  составила 420÷430 Дж/см<sup>2</sup> при требуемых 70÷90 Дж/см<sup>2</sup>. Перлитная полосчатость в структуре прокатанных полос отсутствовала (рис. 5). Таким образом, поставленная задача была реше-

на.

Т а б л и ц а 1

**Химический состав экспериментальной стали**

| Содержание элементов, масс. % |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| C                             | Mn   | Si   | Cr   | Ni   | Cu   | Al   | Ti   | Mo    | Nb    | V     |
| 0,05                          | 1,60 | 0,25 | 0,22 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,003 | 0,071 | 0,004 |

**Третья глава** посвящена расчету режимов горячей прокатки двухфазной ферритно-мартенситной автомобильной стали *DP-Mo 600* (см. табл. 2), обладающей высоким комплексом свойств, на непрерывном широкополосном стане 2000 ЧерМК ОАО "Северсталь".

Т а б л и ц а 2

**Химический состав базовой марки стали *DP-Mo 600***

| C    | Si    | Mn   | P     | S     | Al    | N     | Ti    | Mo   |
|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 0,06 | 0,077 | 1,85 | 0,015 | 0,004 | 0,043 | 0,007 | 0,011 | 0,15 |

Для этого в работе составлена виртуальная модель стана, включающая все элементы оборудования, их технические характеристики, геометрические размеры, особенности технологии прокатки (рис. 6).

С использованием комплекса *Gleeble-3800* были воспроизведены условия получения двухфазной ферритно-мартенситной стали и определены термомеханические параметры (температуры деформации, время выдержки металла для полного протекания ферритного превращения) получения заданной структуры проката. Несоблюдение этих параметров приводит к частичной или полной замене мартенсита бейнитом. При помощи виртуальной модели стана 2000 выполнен большой объем расчетов с целью определения возможностей реализации режимов горячей прокатки листа толщиной 3÷4 мм из стали *DP-Mo-600* с ферритно-мартенситной структурой.

Показано, что прокатка стали с ферритно-мартенситной структурой на стане 2000 возможна при обеспечении условий:

- выдержка на выходном рольганге должна составлять не менее 12 с для протекания ферритного превращения перед ускоренным охлаждением и закалкой на мартенсит; это возможно при скорости транспортировки полосы не более 10 м/с;
- ускоренное охлаждение для закалки на мартенсит выполняется на третьей секции ламинарной установки;

- смотка полосы на дальнюю группу моталок, обычно используемую для толстого листа.

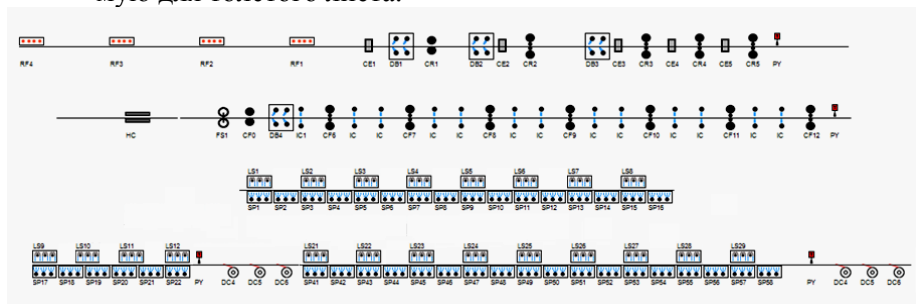


Рис. 6. Схема расположения оборудования стана 2000

RF1-RF4 – нагревательные печи с шагающими балками; CE1 – вертикальный окалиноломатель; CE2-CE5 – вертикальные клетки; DB1-DB4 – гидросбивы; CR1 – горизонтальная двухвалковая клеть; CR2-CR5 – черновые клетки; HC – теплосберегающие экраны; FS1 – летучие ножницы; CF0 – чистовой окалиноломатель; CF5-CF12 – чистовая группа клеток; LS1-LS12 – первая группа ламинарных установок; SP1-SP22 – первая группа спрейерных установок; LS21-LS29 – вторая группа ламинарных установок; SP41-SP58 – вторая группа спрейерных установок; DC4-DC6 – группы моталок для свертывания полос; PY – пирометры; IC – межклетевое охлаждение.

Сравнение расчетных свойств двухфазной ферритно-мартенситной стали с фактическими значениями свойств, определенных после опытной прокатки (выполнена в рамках совместной работы ЧерМК и ЦНИИ ЧМ им. Бардина) показало следующее:

- предложенная технология прокатки со смоткой полосы на дальнюю группу моталок обеспечивает получение ферритно-мартенситной структуры;
- программа *HSMM* правильно прогнозирует прочностные свойства прокатанной стали ( $\sigma_T = 300 \div 310$  МПа,  $\sigma_B = 550 \div 570$  МПа);
- расчет энергосиловых параметров прокатки при помощи *HSMM* позволил перераспределить обжатия по клетям стана и не допустить перегрузок по усилиям и крутящим моментам.

Технология прокатки двухфазной ферритно-мартенситной стали готова к промышленному освоению.

**В четвертой главе** поставлена задача разработки технологии горячей прокатки высокопрочной *TRIP*-стали с остаточным аустенитом на стане 2000.

Литературные данные и лабораторный эксперимент показали, что

получение *TRIP*-стали с остаточным аустенитом возможно, если после горячей прокатки обеспечить ступенчатое охлаждение с выдержками для протекания ферритного, а затем бейнитного превращений, во время которых аустенит обогащается углеродом и становится метастабильным при комнатной температуре. Последующая деформация подобного материала с остаточным аустенитом, например, во время формовки детали автомобиля, приводит к деформационному мартенситному превращению (МП), что обеспечивает дополнительную прочность и пластичность материала, поскольку МП в данном случае выступает в роли дополнительного механизма деформации. В лабораторном эксперименте после горячей прокатки получена *TRIP*-сталь, обладающая высоким комплексом свойств:  $(\sigma_B \times \delta) = 22400 \text{ МПа} \times \%$ ,  $\sigma_B = 690 \div 700 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_T = 490 \div 500 \text{ МПа}$ ,  $\delta = 30 \div 32 \%$ .

Были поставлены задачи:

- определение температуры конца прокатки, обеспечивающей наиболее полное протекание ферритного превращения;
- определение точек фазовых превращений для стали химического состава, представленного в табл. 3;
- определение температур и времени, необходимых для протекания ферритного и бейнитного превращений, обеспечивающих максимальное количество остаточного аустенита;
- определение возможности воспроизведения режимов прокатки *TRIP*-стали на стане 2000 ОАО «Северсталь».

Т а б л и ц а 3

**Химический состав выплавленной стали**

| Массовая доля химических элементов, % |           |           |          |          |           |
|---------------------------------------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|
| <i>C</i>                              | <i>Si</i> | <i>Mn</i> | <i>P</i> | <i>S</i> | <i>Al</i> |
| 0,22                                  | 1,5       | 1,5       | 0,016    | 0,019    | <0,01     |

Выполненные на комплексе *Gleeble-3800* исследования влияния скорости охлаждения и предварительной пластической деформации на температуру фазовых превращений показали следующие результаты:

1. Снижение скорости охлаждения стали от аустенитного состояния значительно (на  $60 \div 80 \text{ }^\circ\text{C}$ ) повышает температуры начала и конца ферритного превращения и практически не влияет на точки бейнитного превращения.

2. Оптимальной начальной скоростью охлаждения, при которой хорошо проявляются как ферритное, так и бейнитное превращения, является скорость  $\sim 7$  °C/с; при меньших скоростях охлаждения бейнитное превращение сменяется перлитным.
3. Пластическая деформация в аустенитном состоянии значительно влияет на характер и кинетику фазовых превращений, в том числе:
  - деформация в аустенитном состоянии повышает температуру начала ферритного превращения на  $60 \div 130$  °C;
  - снижение температуры деформации до 800 °C и приближение ее к температуре начала ферритного превращения приводит к уменьшению доли феррита в структуре при комнатной температуре на  $15 \div 25$  %; при этом бейнитное превращение происходит активно и в полной мере. Структура металла при комнатной температуре в этом случае представляет собой  $30 \div 35$  % феррита,  $65 \div 70$  % бейнита с признаками остаточного аустенита; низкое содержание остаточного аустенита после бейнитного превращения обусловлено недостаточным обогащением аустенита углеродом после ферритного превращения; явление торможения ферритного превращения обусловлено, очевидно, как и для стали 10Г2ФБ, замедлением диффузии углерода за счет дополнительной энергии его связи с дислокациями.
4. Анализ структуры *TRIP*-сталей, обработанных по различным режимам, показал следующее:
  - структуру сталей при комнатной температуре определяют, в основном, условия протекания ферритного превращения;
  - для получения структуры (при комнатной температуре  $\sim 50$  % феррита,  $35 \div 40$  % бейнита и  $10 \div 15$  % остаточного аустенита), обеспечивающей оптимальное сочетание прочностных и пластических свойств, требуются:
    - температура окончания прокатки не ниже 850 °C;
    - охлаждение со скоростью  $40 \div 50$  °C/с до температуры начала ферритного превращения  $T_n^{\Phi} = 750$  °C;
    - охлаждение со скоростью не более 7 °C/с во время ферритного превращения до температуры его окончания  $T_k^{\Phi} = 650$  °C;
    - охлаждение со скоростью  $40 \div 50$  °C/с до температуры начала бейнитного превращения  $T = 420$  °C с последующим охлажде-

нием до  $400 \div 380$  °C в течение  $3 \div 5$  мин (скорость охлаждения  $\sim 0,1 \div 0,2$  °C/c);

– ускоренное охлаждение до комнатной температуры.

Обработанная по этим режимам сталь имеет свойства: сопротивление разрушению в шейке достигает  $1400 \div 1550$  МПа при деформации  $32 \div 45$  %, содержание остаточного аустенита  $14 \div 15$  %.

Реализация различных вариантов технологии изготовления *TRIP*-сталей на комплексе *Gleeble-3800* позволило выбрать режим, обеспечивающий наибольшее количество остаточного аустенита в стали заданного химического состава, превращение которого в мартенсит при пластической деформации является дополнительным механизмом повышения пластичности и прочности.

Для решения вопроса о возможности прокатки *TRIP*-стали на стане 2000 ЧерМК использована программа *HSMM* и виртуальная модель стана. С их помощью рассчитан температурно-деформационный режим прокатки на стане и показана возможность осуществления оптимального режима, параметры которого определены в лабораторном эксперименте и на комплексе *Gleeble-3800*. Температурный режим прокатки по агрегатам стана представлен на рис. 7.

Технология прокатки *TRIP*-стали, разработанная при помощи методов физического и математического моделирования, готова к промышленному освоению.

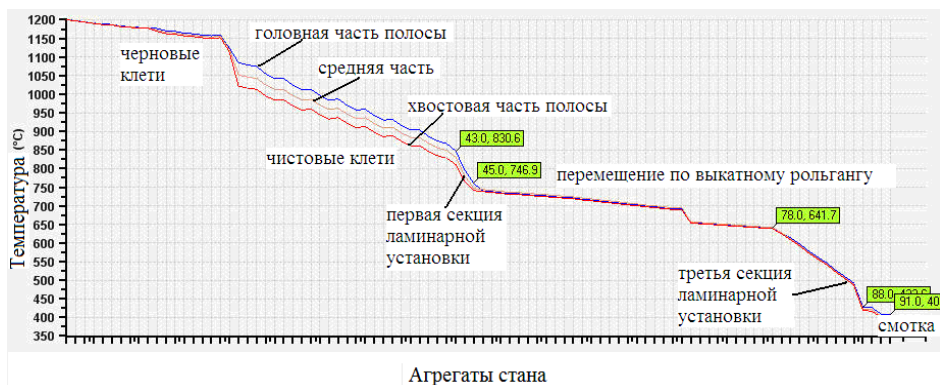


Рис. 7. Температурный режим прокатки *TRIP*-стали по агрегатам стана

## Основные выводы

1. С использованием методов физического и математического моделирования разработаны технологии горячей прокатки для станов 5000 и 2000 ОАО «Северсталь»:

- толстого листа из трубной стали 10Г2ФБ с однородной структурой без перлитной полосчатости;
- листа толщиной  $3\div 4$  мм из высокопрочной автомобильной ферритно-мартенситной стали *DP-Mo-600*;
- листа толщиной  $3\div 4$  мм из высокопрочной автомобильной *TRIP*-стали.

2. Для анализа существующих технологий прокатки и разработки новых компьютерная программа *Hot Strip Mill Model* адаптирована к условиям прокатки на станах 2000 и 5000 ЧерМК ОАО "Северсталь", созданы различные варианты виртуальных моделей стана, позволяющие выполнять комплекс расчетов, в том числе параметров структуры и механических свойств полос из трубных и автомобильных сталей. Расчетные модели, используемые программой *HSMM*, откалиброваны по температуре и механическим свойствам, чем обеспечена возможность оптимизации технологий прокатки по свойствам сталей. Множество выполненных расчетов показало, что программа *HSMM* обеспечивает расчеты механических свойств для микролегированных трубных сталей с относительной ошибкой менее  $\pm 5 \%$ .

3. Исследование причин формирования перлитной полосчатости позволило определить следующие условия получения толстого листа из трубных ферритно-перлитных сталей категории прочности K60 на стане 5000 с однородной структурой без перлитной полосчатости:

- прокатка без паузы между чистой и черновой прокатками;
- завершение прокатки на нижней границе аустенитной однофазной области;
- ускоренное охлаждение до температур  $550\div 600$  °С.

4. Опытные прокатки подтвердили правильность выбранной концепции формирования однородной структуры толстого листа без перлитной полосчатости. Прокатанные на стане 5000 по рекомендованным режимам полосы имеют требуемый комплекс механических свойств и высокую ударную вязкость. Для повышения доли вязкой составляющей в изломе образцов после испытаний падающим грузом на основании статистического анализа предложено скорректировать химический состав стали – понизить содержание углерода, ванадия и меди, а необходимый

уровень свойств обеспечить за счет управления структурой.

Выполненные опытные прокатки полос с откорректированным химическим составом по режимам, рассчитанным при помощи программы *HSMM*, позволили получить практически 100 %-ную вязкую составляющую при требуемом комплексе механических свойств и очень высокой ударной вязкости ( $KCU^{-60} = 420 \div 430$  Дж/см<sup>2</sup>).

5. Внедрение предлагаемой технологии прокатки без паузы с использованием гидросбива в клетки стана для управления температурой раската приводит к повышению производительности стана минимум на 10÷15%.

6. Выполненные расчеты формирования структуры и механических свойств с использованием виртуальной модели стана 2000, разработанной с помощью программы *HSMM*, показали возможность производства двухфазной ферритно-мартенситной стали на непрерывном широкополосном стане 2000 ЧерМК ОАО "Северсталь". Требуемую структуру стали *DP-Мо 600*, прокатанной на стане 2000, при толщине полосы 3÷4 мм можно получить при следующих условиях:

- обеспечение выдержки для протекания ферритного превращения на выходном роллганге в течение 12 с при перемещении полосы от последней клетки стана до третьей группы ламинарной охлаждающей установки, что возможно при скорости транспортировки полосы менее 10 м/с;
- закалка на мартенсит, выполняемая на третьей секции ламинарной установки;
- смотка полосы в рулон на второй группе моталок.

7. Физическое моделирование на комплексе *Gleeble-3800* позволило установить термомеханические и временные параметры получения максимального количества остаточного аустенита в *TRIP*-стали заданного химического состава. Математическое моделирование температурного режима прокатки показало возможность осуществления на стане 2000 режимов прокатки и охлаждения стали заданного химического состава, обеспечивающих получение необходимой ферритно-бейнитной структуры с остаточным аустенитом.

Анализ структуры *TRIP*-сталей, обработанных по различным режимам на комплексе *Gleeble-3800*, показал следующее:

- конечную структуру сталей, в основном, температура последней деформации и условия протекания ферритного превращения;

- для исследованного состава *TRIP*-стали наилучшее сочетание прочностных и пластических свойств имеет металл со структурой, состоящей при комнатной температуре из ~50 % феррита, 35÷40 % бейнита и 10÷15 % остаточного аустенита:  $\sigma_T = 550 \div 650$  МПа,  $\sigma_B = 1050 \div 1200$  МПа,  $\delta = 30 \div 32$  %.

**Основное содержание диссертационной работы изложено  
в следующих публикациях:**

1. **Внедрение компьютерной программы *HOT STRIP MILL MODEL (HSMM)* в прокатное производство для управления структурой и свойствами сталей [Текст] / Н.Г. Колбасников [и др.] // «Научно-технические ведомости СПбГПУ». – 2007. - №3. - С. 38-47.**
2. Результаты адаптации компьютерной программы *HOT STRIP MILL MODEL (HSMM)* к условиям стана 2000 ОАО "Северсталь" [Текст] / Н.Г. Колбасников [и др.] // Современные достижения в теории технологии пластической обработки металлов. Санкт-Петербург, СПбГПУ, 2007. - С. 213-218.
3. Наумов А.А., Козлов А.И., Колбасников Н.Г. Результаты адаптации компьютерной программы *HOT STRIP MILL MODEL (HSMM)* к условиям стана 5000 ОАО «Северсталь» / А.А. Наумов, А.И. Козлов, Н.Г. Колбасников // Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона: Материалы конференций политехнического симпозиума. СПб, 2007. – С. 18-19.
4. Наумов А.А., Козлов А.И., Колбасников Н.Г. Управление структурой и свойствами сталей, прокатанных на стане 5000 ОАО «Северсталь» с использованием программы «*HOT MILL STRIP MODEL*» (*HSMM*) / А.А. Наумов, А.И. Козлов, Н.Г. Колбасников // XXXVI Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. Ч. III. СПб, 2008. – С. 138-139.
5. Колбасников Н.Г., Наумов А.А. Использование компьютерной модели горячей прокатки *Hot Strip Mill Model (HSMM)* в процессе обучения студентов старших курсов кафедры «Пластическая обработка металлов» / Н.Г. Колбасников, А.А. Наумов // Высокие интеллектуальные технологии и инновации в образовании и науке.: Материалы XVI Международной научно-методической конференции. 13-14 февраля 2009 года, Санкт-Петербург. - СПб, 2009. – С. 318-319.
6. Колбасников Н.Г., Наумов А.А. Создание научно-исследовательской лаборатории «Пластометрия, механические свойства и структура материалов» в СПбГПУ для обучения студентов старших курсов и научных работ / Н.Г. Колбасников, А.А. Наумов // Высокие интеллектуальные технологии и инновации в образовании и науке.: Материалы XVI Международной научно-методической конференции. 13-14 февраля 2009 года, Санкт-Петербург. - СПб, 2009. – С. 320-321.

7. Колбасников Н.Г., Наумов А.А. Физическое моделирование температурно-деформационных режимов обработки металлов на универсальном комплексе *Gleeble 3800* / Н.Г. Колбасников, А.А. Наумов // *Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах: Материалы XIII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. 18 мая 2009 года, Санкт-Петербург, Том 2.* - СПб, 2009. – С. 30.

8. Исследование формирования структуры и свойств стали 10Г2ФБ с использованием комплекса *Gleeble-3800* [Текст] / Н.Г. Колбасников [и др.] *Современные металлические материалы и технологии (СММТ`2009): Труды международной научно-технической конференции.* – СПб, 2009. *Advanced Metal Materials and Technologies (АММТ`2009).* – С. 508 – 515.

9. Колбасников Н.Г., Наумов А.А. Анализ технологий прокатки толстого листа с использованием методов компьютерного моделирования [Текст] / Н.Г. Колбасников, А.А. Наумов // «*Научно-технические ведомости СПбГПУ*». – 2009. - №2. - С. 139-145.

10. Влияние больших деформаций в горячем состоянии на структуру и свойства низкоуглеродистой стали [Текст] / Н.Г. Колбасников [и др.] // «*Металлообработка*». - 2009. - №4. - С. 25-31.

11. Исследование закономерностей формирования структуры и наноструктуры сталей с использованием комплекса *Gleeble-3800* / Н.Г. Колбасников [и др.] // Сборник материалов Третьей международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов», Москва, 12-15 октября 2009. Под общей редакцией академика О.А. Банных. – М: Интерконтакт Наука. – 2009. - том 1. - С. 228.

12. Яровицын И.А., Наумов А.А. Анализ возможности повышения свойств сталей, используемых для производства труб / И.А. Яровицын, А.А. Наумов // XXXVIII Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. - Ч. VI. - СПб, 2009. – С. 35-36.