На правах рукописи

ШАБАЛОВ ИВАН ПАВЛОВИЧ

РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ ОСНОВ,

СОЗДАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ

ПРОИЗВОДСТВА ТОЛСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТА

С ПОВЫШЕННЫМИ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИМИ СВОЙСТВАМИ

ДЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Специальности:

05.16.05 - «Обработка металлов давлением»;

05.16.01 - «Металловедение и термическая

обработка металлов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

МОСКВА-2005

доктора технических наук

2

Работа выполнена

в Федеральном государственном унитарном предприятии

«Центральный научно-исследовательский институт

черной металлургии им. И.П. Бардина»

Научный консультант: доктор технических наук

ЭФРОН Леонид Иосифович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор

СЕМЕНОВ Иван Евгеньевич

доктор технических наук ФИЛАТОВ Александр Андреевич

доктор технических наук, профессор КУДРЯ Александр Викторович

Ведущая организация: ОАО «Новокузнецкий металлургический комбинат»

Защита состоится «29» декабря 2005 г. в 15 часов на заседании диссертацион-ногосоветаД217.035.02 в Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина» по адресу: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 9/23, ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина».

Автореферат разослан « 25 » ноября 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного

совета кандидат технических наук,

старший научный сотрудник ^^у^^^^^'Г^уч 7.П. Москвина

M£J£ 114W 79

3 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Толстолистовой прокат является одним из основных видов продукции черной металлургии, он изготавливается в объеме десятков миллионов тонн ежегодно и используется при изготовлении металлических конструкций, как массового производства, так и уникальных, как правило, сварных. Это конструкции промышленных и гражданских зданий, башни, мачты, резервуары, мосты, трубопроводы, в том числе магистральные, конструкции кранов, рам и кузовов большегрузных автомобилей, горнодобывающей техники и др. Толстолистовой прокат совершенствуется в силу усложняющихся требований конструкторов и изготовителей конструкций, а его качество определяется экономическими и техническими возможностями индустрии.

Важной характеристикой металлопроката на рынке является его конкурентоспособность, которая определяется в основном соотношением его потребительских свойств и цены. К началу 90-х годов рынок показал, что потребительские свойства производимого в России проката в большинстве случаев недостаточны, а стоимость излишне высока из-за увеличения цен на сырье, материалы, энергоносители, транспортные расходы, несовершенной технологии.

В связи с изложенным возникла проблема создания проката повышенной и высокой прочности с высоким сопротивлением хрупким разрушениям, что, в частности, позволяет безаварийно эксплуатировать машины и конструкции в районах с температурой ниже -40°С и в других экстремальных условиях. Такой металлопрокат во многих случаях должен обладать и совершенно новыми эксплуатационными свойствами; в частности, огнестойкостью, коррозионной стойкостью в различных рабочих средах и др. С другой стороны новые материалы должны сочетать высокий уровень рабочих свойств с минимальной себестоимостью.

Анализ показал два основных пути решения этой проблемы: совершенствование технологии производства металлопроката и создание экономнолегированных сталей нового поколения. Важнейшим инструментом получения высоких свойств металла при снижении его себестоимости является совершенствование процессов прокатки толстых листов. Здесь имеется ввиду: во-первых, прокатка как важнейший этап производства толстолистового проката с требуемыми геометрическим характеристиками и минимальным расходом металла, во-вторых - прокатка как основной элемент новейших технологий формирования оптимальной структуры и заданного комплекса свойств сталей при исключении или минимальном использовании термической обработки, существенно повышающей себестоимость металла. Большинство производимых к моменту постановки настоящей работы сталей было разработано в середине 60-х годов XX века в соответствии с существовавшими экономическими и техническими возможностями металлургической промышленности, и к началу 90-х годов они уже не обеспечивали ни требуемых эксплуатационных свойств,

ни возможности эффективного проюн&ї^аК^ріМйЛМЙшїпсурентоспособной металлопродукции. Поэтому актуальш йявл1$Мт8Ж1дяссертации, посвященной

4 разработке научно-обоснованных решений в области прокатки толстых листов на существующих и перспективных станах и их внедрению в производство при одновременной разработке принципов создания сталей нового поколения.

Целью работы явилось решение крупной народно-хозяйственной проблемы создания научных основ и новых технологий на прокатном переделе, обеспечивающих экономию металла, энергетических и сырьевых ресурсов, а также формирование заданного комплекса свойств материалов, организации на этой основе массового производства конкурентоспособного толстолистового проката из сталей нового поколения и его эффективное применение для создания ответственных металлоконструкций в мостостроении, строительстве, машиностроении.

В рамках рассматриваемой проблемы осуществлена постановка и получено решение следующих задач:

1. Анализ и классификация современных и перспективных требований к прокату для металлических конструкций.

2. Разработка общей классификации процессов упрочнения проката на металлургических предприятиях.

3. Разработка научных основ, создание и реализация металлосберегающих технологий прокатки толстых листов.

4. Установление закономерностей формирования повышенных эксплуа-

тационныхсвойствпрокатазасчетоптимальногосочетаниятермодеформационных

режимов прокатки, термообработки и выбора соответствующего этим режимам

химического состава стали.

5. Использование результатов исследований при создании и внедрении новых

ресурсосберегающих технологий производства толстых листов с повышенными

потребительскими свойствами из сталей нового поколения.

6. Освоение производства новых видов конкурентоспособного проката с уникальным сочетанием служебных свойств из сталей нового поколения и их широкое применение в машиностроении, строительстве, мостостроении.

7. Разработка перспективных направлений реконструкции реверсивных толстолистовых станов для производства конкурентоспособного проката.

8. Разработка научных основ перспективной ресурсосберегающей технологии

производства проката по схеме: «слябовая МНЛЗ - планетарный стан горячей

прокатки».

Научная новизна работы

1. Создана концепция производства конкурентоспособного проката для мостостроения, строительства, машиностроения и трубопроводного транспорта, включающая научные основы разработки новых технологий прокатки: металлосберегающих за счет рационального формоизменения металла; энергосберегающих за счет отказа от дополнительной термообработки; материалосберегатощих, позволяющих за счет формирования оптимальной структуры и заданного комплекса высоких эксплуатационных свойств толстолистовой стали экономить легирующие элементы.

5

2. Разработана и реализована на ЭВМ математическая модель деформирования металла в системе «вертикальные - горизонтальные валки». Впервые установлена закономерность изменения коэффициента эффективности обжатия вертикальными валками по длине зон неустановившегося процесса прокатки. Впервые исследована эффективность обжатия сляба вертикальными валками при последующей прокатке в горизонтальных валках в поперечном направлении. Введено новое понятие «поперечного» коэффициента эффективности обжатия вертикальными валками как способа выравнивания концов раската припоперечной схеме прокатки. Установлено, что эффективность обжатия полосы в вертикальных валках при последующей продольной прокатке в горизонтальных валках в 1,5-2,5 раза больше, чем при поперечной прокатке.

3. Разработан и обоснован метод расчета режима переменного обжатия сляба в клети с вертикальными валками, обеспечивающего выравнивание ширины по длине полосы при продольной схеме прокатки и концов полосы при поперечной схеме прокатки.

4. На базе экспериментально установленных закономерностей разработаны научные основы улучшения качества поверхности проката и снижения расхода металла за счет уменьшения перехода металла с боковых граней заготовки на основные поверхности листа. Разработана методика оптимизации массы сляба (с целью экономии металла) при прокатке толстых листов с учетом дефектов поверхности листов и колебаний параметров прокатки.

5 На основе анализа и классификации схем горячей прокатки, термомеханической и термической обработки разработан дифференцированный подход к технологии производства проката в зависимости от его назначения, требований к нему и сортамента. Разработаны новые технологические схемы, включающие термомеханическую прокатку, термическую обработку или их комбинации, обеспечивающие формирование мелкодисперсных структур и уникальные сочетания рабочих свойств.

Впервые разработан и внедрен режим термомеханической прокатки с мелкодробными частными обжатиями в области остановки рекристаллизации аустенита на стане 2800, который обеспечивает получение в листовом прокате толщиной до 16 мм все требования ОАО «Газпром» для труб диаметром до 1420 мм.

Разработаны рекомендации для реконструкции толстолистовых цехов с целью реализации современных технологий производства проката, в том числе впервые разработаны технические требования к установке ускоренного охлаждения проката.

6. Разработаны принципы создания сталей нового поколения, сформулированы их отличительные признаки по составу, чистоте, структуре, стандартным и специальным свойствам и технологии производства. В том числе впервые в России разработаны концепции легирования сталей с особыми свойствами: огнестойких (до 700°С) строительных, высокопрочных (с пределом текучести до 1000 Н/мм2) свариваемых хладостойких, для труб с повышенным ресурсом эксплуатации (уменьшение скорости коррозии в 1,5-2 раза).

6

7. Разработана математическая модель деформирования металла в планетарном стане с двумя и более числом пар валков, реализованы на ЭВМ алгоритмы расчета частных абсолютных и относительных обжатий, коэффициента напряженного состояния и контактных нормальных напряжений. Получены зависимости для расчета коэффициента напряженного состояния, учитывающие влияние внешних осевых сил переднего подпора, заднего натяжения и угла наклона рабочего инструмента, а также с учетом влияния угла наклона контактной поверхности без учёта влияния внешних осевых сил.

Впервые в отечественной металлургии установлены закономерности влияния технологических параметров планетарной прокатки на ее силовые параметры и механические свойства углеродистых, низколегированных и легированных конструкционных сталей, что является основой для создания перспективных схем ТМО.

Практическая ценность и реализация работы в промышленности

1. На основании результатов широкомасштабных исследований

усовершенствован процесс горячей прокатки листов на стане 2800 путем

внедрения новых технологий прокатки по продольной и поперечной схемам с

переменным боковым обжатием сляба, новых режимов нагрева металла, новых

калибровок вертикальных валков и расчета оптимальных значений массы сляба и

условно-номинальной толщины листа, что позволило улучшить форму раскатов,

качество поверхности листов и снизить расход металла на 10% (абс.)

2. Разработаны и внедрены в производство оптимальные схемы производства

проката, обеспечивающие формирование благоприятной структуры и комплекса

высоких эксплуатационных свойств, в том числе: термомеханическая прокатка

(впервые в России на стане типа 2800), термомеханическая прокатка с

форсированным нагревом для получения наследственной мелкозернистой

структуры, закалка на воздухе, ускоренное охлаждение, закалка с форсированным

отпуском с предварительной гомогенизацией.

3. На ООО «Уральская Сталь» освоено производство толстолистового

проката из 19 марок сталей нового поколения. Изготовлено более 630000

тонн высококачественного проката. Прокат превосходит российские аналоги:

по ударной вязкости - в 2-5 раз; по коррозионной стойкости - в 2 раза; по

огнестойкости - в 2-3 раза; по порогу хладноломкости - ниже на 20-40°С; по

прочности - на 25%; по свариваемости - в 4 раза.

4. Из нового проката изготовлены мосты, газо-нефтепроводы, большегрузные

автомобили БелАЗ, путепроводы, производственные и гражданские здания и

сооружения, в том числе уникальные сооружения: мосты через реки Обь. Каму,

Дон, Волгу, Амур, канал им. Москвы, мостовые сооружения МКАД и на третьем

транспортном кольце Москвы, покрытие старого Гостиного Двора, надтрибунное

покрытие стадиона «Локомотив», опоры конструкций конькобежного центра в

Крылатском, фермы многофункциональных комплексов «Арбат-центр» и др.

Экономический эффект работы обусловлен снижением себестоимости стали и

проката за счет уменьшения расхода ферросплавов и энергоносителей, снижением

расхода металла на прокатном переделе, сокращением сроков ввода в строй

7 крупных сооружений, исключением защитных покрытий, повышенным ресурсом эксплуатации и составляет 5, 2 млрд руб.

5. Результаты проведенной работы открывают перспективы для создания новых металлургических технологий, получения материалов с новым сочетанием свойств, расширения марочного сортамента сталей и областей их применения в промышленности. Разработана программа развития ООО «Уральская Сталь», предусматривающая дальнейший ввод в эксплуатацию и реконструкцию основного металлургического оборудования, а также разработку новых материалов и технологий в рамках разработанной концепции.

На защиту выносится:

Предложенная концепция производства конкурентоспособного проката, включающая научные основы разработки новых технологий прокатки: металлосберегающих, энергосберегающих, и материалосберегающих.

Разработанная математическая модель деформирования металла в системе «вертикальные - горизонтальные валки», установленные закономерности деформирования в этой системе, разработанный метод расчета режима переменного обжатия сляба в клети с вертикальными валками.

Разработанные научные основы улучшения качества поверхности проката и снижения расхода металла за счет уменьшения перехода металла с боковых граней заготовки на основные поверхности листа. Разработанная методика оптимизации массы сляба с учетом дефектов поверхности листов и колебаний параметров прокатки.

Результаты внедрения новых технологий прокатки по продольной и поперечной схемам с переменным боковым обжатием сляба, режимов нагрева металла, калибровок вертикальных валков для улучшения формы раскатов, качества поверхности и снижения расхода металла.

Разработанная математическая модель деформирования металла в планетарном стане, алгоритмы расчета ее параметров, установленные закономерности влияния технологических параметров на ее силовые параметры и механические свойства сталей.

Разработанные принципы создания сталей нового поколения, в том числе с особыми свойствами: огнестойких (до 700°С) строительных, высокопрочных (с пределом текучести до 1000 Н/мм2) свариваемых хладостойких, для труб с повышенным ресурсом эксплуатации.

Разработанные и внедренные технологии производства проката, обеспечивающие формирование благоприятной структуры и комплекса высоких эксплуатационных свойств сталей различного назначения, рекомендации по реконструкции прокатных станов.

Результаты освоения производства проката из сталей нового поколения, установленные преимущества над российскими аналогами, а также результаты его массового применения в конструкциях, зданиях и сооружениях.

Апробация работы. Основные положения работы доложены и обсуждены на: Всесоюзной научно-технической конференции «Проблемы повышения уровня

8

производствачерныхметалловисплавовиулучшениякачестваметаллопродукции» (Москва, 1985), ІУВсесоюзнойнаучно-техническойконференции«Теоретические проблемы прокатного производства» (Днепропетровск, 1988), Всесоюзной научно-технической конференции «Непрерывные металлургические процессы (Москва, 1989), конференции "Повышение прочности и хладостойкости массовых видов проката из конструкционных сталей" (Москва, 1992), семинаре по разработке и применению микролегированной горячекатаной листовой и полосовой стали (Москва, 1996), Седьмой межотраслевой научно-практической конференции по проблемам производства и потребления трубной продукции (Челябинск, 1999), 6-международной конференции «Российский рынок металлов» (Москва, 2003), П-ой Евразийской научно-практической конференции (Москва, 2004), XVII Уральской школе металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов» (Киров, 2004), X научно-технической конференции «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов» (С.-Петербург, 2004), Международной научно-технической конференции «Теория и технология процессов пластической деформации - 2004» (Москва, 2004).

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 42 печатных работах, в том числе 3 монографиях, 2-х брошюрах и 6 патентах на изобретения.

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве, состоит в постановке задач исследований, выработке направлений и способов решения прдблем, в равной степени участия в получении результатов, в организации промышленного опробования и освоения новых видов металлопродукции, анализе и обобщении полученных результатов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, б глав, общих выводов, списка использованной литературы из 447 наименований и приложений, содержит 427 страниц машинописного текста, 169 рисунков и 84 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Перспективные требования к прокату для металлических конструкций

Одним из основных видов продукции черной металлургии является прокат из сталей с пределом текучести 230-1000 И/ми2 для металлических конструкций, в первую очередь сварных. Современный уровень развития техники предъявляет к листовому прокату одновременно высокие требования по прочности, низкотемпературной вязкости, хладостойкости и свариваемости. В то же время требования к прокату различных отраслей промышленности имеют свою специфику.

Надежность магистральных трубопроводов зависит от многих факторов, связанных со структурным состоянием металла, состоянием поверхности и внешних условий эксплуатации. Учет всего многообразия этих факторов является необходимым условием повышения надежности трубопроводов как конструкций.

I

9

Основными потребителями труб - предприятиями газовой и нефтяной отраслей сформированы новые технические требования к трубным сталям. К числу наиболее важных из них относятся: повышенная прочность (класс прочности К56-К60 и выше); хладостойкость (гарантия доли вязкой составляющей в изломе образцов для ИПГ при -20°С); повышенная ударная вязкость (KCV-20 > 90 Дж/см2); улучшенная свариваемость (углеродный эквивалент не более 0,43%); повышенная коррозионная стойкость и др.

Ужесточение условий эксплуатации мостов (увеличение интенсивности движения и массы составов, строительство мостов в районах с более жестким климатом), усложнение их конструкций, технологии изготовления (в первую очередь широкое применение различных видов сварки), привело к ужесточению ряда показателей, характеризующих качество проката, а также введению новых показателей качества проката, направленных на повышение надежности конструкций. К числу новых требований следует отнести:

• обеспечение гарантий от хрупких разрушений: нормирование ударной вязкости на образцах с острым надрезом при температурах до минус 40°С;

• гарантия сплошности проката, соответствующей 0,1,2 классам ГОСТ 22727;

• гарантированное сопротивление образованию ламеллярных трещин

при производстве и эксплуатации металлоконструкций, путем нормирования

прочностных и пластических свойств в направлении толщины проката см > 0,5сгш;

«Р>15%;

• гарантия свариваемости проката за счет нормирования величины углеродного

эквивалента С <0,42%.

С развитием рыночных отношений в России производство проката из стали марок (10-15ХСНД) оказалось нерентабельным. Объемы их выпуска существенно сократились; мостостроение столкнулось с проблемой дефицита качественного проката, производимого на отечественных металлургических комбинатах. Анализ показал, что высокая себестоимость и низкая рентабельность производимого по ГОСТ 6713 проката были связаны, в основном, с наличием в составе стали повышенного количества дорогостоящих легирующих элементов.

Снижение собственной массы высоконагруженных конструкций в транспортном машиностроении, необходимое для обеспечения высокой экономической эффективности изделий, достигается путем применения проката из высокопрочных свариваемых сталей (ВСС). Для новых моделей большегрузной техники заказчиками выставлены повышенные требования по хладостойкости, ударной вязкости при низких климатических температурах и свариваемости проката, а для платформ самосвалов - также по износостойкости (твердости).

Участившиеся в последнее время случаи техногенных катастроф и связанных с ними крупных пожаров на объектах промышленного и гражданского назначения выдвигают к сталям совершенно новые требования по огнестойкости. Эти же требования следует предъявлять к сталям для конструкций, эксплуатирующихся в сейсмоактивных районах, поскольку при землетрясениях вероятность пожаров существенно возрастает.

10

Металлические конструкции изготавливаются с применением сварки, поэтому среди требований к прокату необходимо особо выделить возможность обеспечения хорошей свариваемости. Ужесточениеусловийсваркитребуетсниженияуглеродного эквивалента и в первую очередь - содержания углерода в стали. Снижение содержания углерода благоприятно и для повышения пластичности, вязкости, а также хладостойкости, в связи с этим это является основным направлением развития сталей нового поколения. В этом случае термическая обработка в виде нормализации, а во многих случаях и закалки с отпуском, неэффективна. Требуемый комплекс свойств проката из низкоуглеродистых сталей может быть достигнут при использовании термомеханической обработки и оптимальном микролегировании стали. Только такие экономнолегированные стали, произведенные с применением ресурсосберегающих технологий, могут быть конкурентоспособны.

Повышенные требования вызывают необходимость разработки новых технологий прокатки, направленных на решение двух основных задач: увеличение экономичности производства толстолистовой стали и повышение потребительских свойств проката в потоке листопрокатного стана.

2. Разработка научных основ и реализация металлосберегающих технологий прокатки толстых листов

Особенно сть производства толстых листов на реверсивных станах заключается в том, что ширина исходных слябов в 2-2,5 раза меньше ширины готовых листов. При прокатке, как по продольной так и поперечной схемам, форма раската сильно отличается от прямоугольной, что приводит к увеличению обрези на 20-25% (отн ). По этой и по ряду других причин, прокатка толстых листов характеризуется более высоким удельным расходом металла по сравнению с производством листов на широкополосных станах (при работе на слябах 1,18-1,26). К числу основных факторов, оказывающих влияние на расход металла, относятся: форма раскатов, масса исходной заготовки, качество поверхности проката, точность прокатки и др. Несмотря на большое количество проведенных в этом направлении работ, вопрос снижения расхода металла при прокатке не исчерпан и приобретает особую актуальность при решении проблемы производства конкурентоспособной толстолистовой стали нового поколения.

Известный ранее способ компенсации разноширинности раскатов, предусматривающий перед прокаткой слябов в черновой клети их переменное боковое обжатие по длине в клети вертикальными валками, не нашел эффективного применения на толстолистовом стане 2800 ОАО «НОСТА» (ОХМК) (в настоящее время ООО «Уральская Сталь»). Низкая эффективность предложенного способа объясняется недостаточным уровнем научных основ уменьшения расхода металла за счет формоизменения раскатов при обжатии слябов в вертикальных валках и последующей их прокатке в горизонтальных валках и отсутствием научно-обоснованной методики расчета режимов переменного бокового обжатия слябов. В настоящей работе для эффективного применения этого способа провели систематические исследования закономерностей формообразования раскатов при прокатке толстых листов, а также формоизменения сляба при прокатке в вертикальных и горизонтальных валках.

и

Взаимозависимость факторов, влияющих на формоизменение раската, и их естественный разброс не позволяют строить аналитические связи между характеристиками формоизменения раската (уширением, вытяжкой в функции длины или ширины раската) и отдельными параметрами деформации (размеры слябов, их обжатие по высоте, ширине и др.). В этом случае для установления количественных зависимостей эффективен многофакторный корреляционно-регрессионный анализ, позволяющий с фиксированной достоверностью устанавливать искомые связи. На стане 2800 провели натурное исследование с использованием метода планирования эксперимента, включающее по 36 вариантов прокатки по продольной и поперечной схемам (всего 432 сляба). В результате статистической обработки данных получили следующие закономерности и взаимосвязи технологических параметров прокатки:

Ь^О^ЗбН^В0497/0215; (1)

т)"У= 0,239 Н0-203 В^581/0-798; (2)

пЗ„ = 7,422 Н0765В-1'890 / '■167; (3)

5° = 0,0171 Н0273 В-М83 /2834; (4)

5ПР =0,б50Н°-8|2В-2-789/зш, (5)

ООП ' ' ^ '

где Н и В - толщина и ширина исходного сляба, мм; / - длина дуги контакта металла с вертикальными валками, мм; Ья - длина зон неустановившегося процесса прокатки в вертикальных валках, мм; т|п = (В-В^ДВ^/ХВ-В^) - коэффициент эффективности регулирования ширины полосы в зоне установившегося процесса прокатки в вертикальных валках и последующей продольной прокатке в горизонтальных валках. Здесь Ъв, В, - ширина полосы соответственно после обжатия только вертикальными и вертикальными затем горизонтальными валками в продольном направлении, мм; ДВе - «естественное» уширение полосы при продольном обжатии только в горизонтальньіхвалках,мм;тіііоіі=(В-Ьгіоп/цпоіі)/(В-В^-козффициентзффективности регулирования длины полосы при установившемся процессе прокатки в вертикальных валках и последующей поперечной прокатке в горизонтальных валках («поперечный» коэффициент эффективности). Здесь L0M и unoo - длина раската после обжатия в горизонтальных валках в поперечном направлении, мм, и соответствующий коэффициент вытяжки; 8,5 - относительное удлинение центральных слоев полосы в зоне установившегося процесса, обусловленное обжатием вертикальными валками при последующем обжатии в горизонтальных валках в продольном и поперечном направлениях соответственно, %.

Установлено, что коэффициент эффективности обжатия вертикальными валками и удлинение центральных слоев полосы при прокатке ее в горизонтальных валках в продольном направлении (пп, 5n) в 1,5-2,5 раза больше (в зависимости от параметров прокатки), чем при прокатке полосы в горизонтальных валках в поперечном направлении {\оп, &п(Ш). Это обусловлено тем, что в первом случае за счет деформации утолщенных кромок раскат получает дополнительное удлинение, а во втором случае утолщенные кромки обжимаются при заполнении и освобождении очага деформации металлом, при этом дополнительнойдеформации в направлении длины сляба (ширины раската) не получается.

12

Коэффициент эффективности обжатия вертикальными валками от границ установившегося процесса прокатки в этих валках к концам полосы возрастает, достигая максимального значения у ее торцов Изменение коэффициента г) по длине зон неустановившегося процесса с точностью до 12 % нами описано уравнениями:

i, = V+A,i.: (6)

О 96

А^=(Л„„-^„)(—~7 0,2), (7)

0,2+ -V, /ь»> где г] - значение коэффициента эффективности обжатия вертикальными валками

в любом сечении зоны неустановившегося процесса прокатки; т) сг - значение

коэффициента эффективности в зоне установившегося процесса прокатки; ATJX

- изменение коэффициента эффективности по длине зоны неустановившегося

процесса прокатки; переменная х отсчитывается от торцов сляба и изменяется

в пределах 0 < х < LH ; л,^" ' .0 ~ значение коэффициента эффективности для

концевых сечений.

Анализ полученных зависимостей показал, что выбранные независимые переменные - Н, В, 1 учитывают в изменении функций LH Tjnon, 8пші, т)п, 6n соответственно 99,2; 77,5; 83,1; 90,1 и 99,0% общей вариации. Практически это означает, что лишь для зависимостей г|поя в <р (Н, В, /) и 5поп в ф (Н, В, /) возможно допущение о не включении в анализ какого-либо показателя, оказывающего существенное влияние на л. и 5 .В связи с тем, что при поперечной прокатке длина сляба становится шириной раската, одним из неучтенных факторов может быть величина естественного уширения, зависящая от таких факторов, как режим обжатий в горизонтальных валках, ширина раската (длина сляба) и т.д.

Для зависимостей л ,6 , л и 5 характерно, что с увеличением ширины

г^ 'поп1 поп' >пр пр г г ' J г

сляба уменьшаются значения коэффициентов эффективности обжатия сляба вертикальными валками и вытяжки центральных слоев при обеих схемах прокатки. Увеличение толщины сляба и длины дуги касания металла с валками вызывает возрастание этих величин. Влияние ширины сляба на изменение исследуемых величин больше, чем влияние толщины, и меньше, чем влияние длины дуги касания металла с валками при прокатке в вертикальных валках. В исследованном интервале определяющим является изменение длины дуги касания металла с валками (/). Для параметров LB признаки Н, В, / и признаки, не внесенные в анализ, обеспечивают соответственно 65,7; 13,1; 20,5 и 0,7% изменений этой величины. Для параметра ліі<>п признаки Н, В, / и признаки, не внесенные в анализ, обеспечивают соответственно 11,6; 16,1; 51.7 и 20,6 % вариации. Для параметра 8поп эти величины равны соответственно 10,5; 18,3; 54,7 и 16,5 %, для параметра Ппр - 9,3; 9,2; 83,4 и 2,1 % и для параметра 6п - 4,7; 8,3; 85,5 и 1,5 %.

Полученные зависимости позволяютрассчитать режимы переменного обжатия слябов в клети с вертикальными валками. При таком способе прокатки передний и задний концы слябов обжимаются в меньшей степени, чем его средняя часть за счет изменения раствора между вертикальными валками в процессе прокатки.

13

Исследовали разноширинность раскатов (A6f/, =bCf—" '), прокатанных по

продольной схеме, в зависимости от отношения —, где Ъ^ bj, Ьс - ширина переднего,

заднего и по середине раската соответственно; \х1 - коэффициент вытяжки при первой протяжке сляба; ц2 - коэффициент вытяжки при разбивке ширины листа. Валки черновой клети стана 2800 в начале исследования (измерено 1350 раскатов) были цилиндрические. Исследования проводили периодически в течение одной кампании работы валков. При этом максимальная выработка в середине валков составляла 2 мм по диаметру. Результаты исследования нами описаны уравнениями для раскатов, прокатанных соответственно в начале, середине и в конце кампании работы валков:

Д\*,=—-\мм; (8)

ДА ж£5Ь.>ММ; (9)

п.

ДА ,15b., мм. (10)

М,

Ошибка результатов, вычисленных по формулам (8), (9), (10), не превышает 14,3,11,1 и 9 % соответственно Для размеров листов, прокатанных при различной выработке валков черновой клети, изменение ширины по длине суженных переднего и заднего концов раската практически совпадает и с точностью до 14 % нами описаны в данной работе уравнением

\*\*\* °'68 п-г

•7Г-= х -°Л (11)

где Ьх = Ьс -Ьх~ изменение ширины раската в произвольном сечении, отстоящем

на расстоянии х от торца по продольной оси (0 < х < I );

Ьх - ширина в произвольном сечении; /с - длина суженного конца раската.

Зависимость длины суженных концов раската от отношения — нами описаны

уравнениями: ^2

для переднего конца: /si"\_ = \_78ib-+467,MM' №)

для заднего конца: 1е., \_ „JQ^I 433 мм' ^^

где цп - величина суммарной продольной вытяжки при прокатке.

Величина -^ определяет длину концов сляба, на которых необходимо произ-

Н"лр

14 вести переменное боковое обжатие слябов в вертикальных валках для компенсации сужения концов полосы. Исследовали (измерено 1980 раскатов) при поперечной схеме прокатки влияние ширины полосы (Ь) и величины вытяжки при первой протяжке (ц,) на ее разнодлинность (AM.

Величина разнодлинности для раскатов шириной 1700-2600 мм, отнесенная к вытяжке при поперечных проходах, определяется соотношением вида:

ДІ

—2-=-84,7ц., + Л, мм, (14)

где ц2 - вытяжка в поперечных проходах; А - коэффициент, зависящий от ширины раската и от выработки валков.

Значения коэффициента А для раскатов шириной 1700-2600 мм, прокатанных в начале, в середине и конце кампании рабочих валков черновой клети, находятся в интервале 58-\*-!93 мм.

Выявлено, что изменение длины по ширине раската можно выразить уравнением

^ = ^1—0,43, (,5)

Ч, ^L + 0,43 А.»

где 1=1с -/. - изменение длины раската в произвольном сечении, отстоящем на

расстоянии х от боковой кромки торца (0 < х < Ъп );

/ и / — длина раската по продольной оси и в произвольном сечении

соответственно;

Ьп - ширина участка переменной длины раската.

Ошибка решений уравнения (15) не превышает 14 %.

Зависимости Ьп.д.от ширины полосы при прокатке в цилиндрических валках и валках с выработкой 2 мм по диаметру нами описано уравнениями для ц = 1:

Ьа = -О,0978Ь +667, мм; (16)

ь[\*=-0,1237Ь+673,мм; (17)

для ц, =1,4:

Ьп= -Ф,0978Ь +593, мм; (18)

Ьв \*= -0,1229Ь +627, мм. (19)

Ошибка решения уравнений (16)-(19) не превышает соответственно 5,5; 6,2; 4,9 и 7 %.

Выражение, полученное для величины обжатия в вертикальных валках в произвольном сечении полосы (ЛВАх), обеспечивающего устранение разноширинности раската при продольной схеме прокатки имеет вид:

дв = АЬх +дв 5х«. (20)

где Ab' = Ab -АЬ; (21)

ji^ - вытяжка в рассматриваемом сечении при поперечных проходах; Вьк -

15

величина обжатия в вертикальных валках концов полосы; т| - коэффициент эффективности обжатия вертикальными валками концов полосы.

Длязоныустановившегося процесса прокатки в вертикальных валках получили выражение для определения величины бокового обжатия сляба, обеспечивающего выравнивание ширины раската:

АЬср

АВьусг- \* (о,213Ц, ■#\*•"» ■\*-\*\*" ■i^4"' )0'70' \*™' (22)

где R — радиус вертикальных валков, мм.

Схема расчета режима переменного обжатия сляба в вертикальных валках:

- по выражениям (8) - (10) определить АЬс;

- по зависимостям (12), (13) определить длину концов сляба, на которых необходимо произвести переменное (неполное) обжатие в вертикальных валках;

- по выражению (22) определить величину максимального бокового обжатия сляба;

- по выражению (1) определить длину зон неустановившегося процесса прокатки при максимальном боковом обжатии сляба;

- по уравнению (20) определить величину обжатия в вертикальных валках неустановившегося процесса прокатки.

Поскольку величина /, необходимая для определения nn х ,зависит от ДВ4х, то уравнение (20) решается совместно с выражениями (6) и (7) методом приближений.

Полученные выражения для определения величины обжатия в вертикальных валках в произвольном сечении полосы, обеспечивающего выравнивание концов раската при поперечной схеме прокатки имеют вид: для случая прокатки с разбивкой ширины листа (с первой протяжкой):

ДВ= \_^1\_+ дв ^ (23)

Ьх п и. \*\* Л

для случая прокатки без разбивки ширины листа (без протяжки):

ДВ, = 61ж + ДВЫ ~- (24)

В уравнениях (23) и (24): Д/" =Д/ -А1х, (25)

где Д/с определяется из выражений типа (14), а Д/х - из уравнений (15) - (19).

Для зоны установившегося процесса прокатки в вертикальных валках получены выражения для определения величины бокового обжатия сляба, обеспечивающего выравнивание концов полосы:

для случая прокатки в горизонтальных валках по поперечной схеме с разбивкой

ширины листа: .

АВ»^= (0,213ц2 .я°'^"Л:4"5 } °'708' ММ; (2б)

для случая прокатки без разбивки ширины листа:

16

ДВЛуст= (6)627Ц2.я«^-''23Л.0'5"5) 0Й4'ММ' (2?)

Схемарасчета режима переменного бокового обжатия сляба, обеспечивающего выравнивание концов раската, такая же, как и при продольной схеме прокатки.

Режимы переменного бокового обжатия сляба представлены в виде таблиц, позволяющих в зависимости от размеров исходного сляба и прокатываемого из него листа, задавать программу переменного бокового обжатия сляба. Программа, задаваемая оператором, выполняется автоматически после включения привода вертикальных валков. Механическое и электрическое оборудование системы переменного бокового обжатия слябов разработано и изготовлено ВНИИМетмашем. Рассчитанные режимы обеспечивают получение раскатов при продольной схеме прокатки с разноширинностью не более ±20 мм. При прокатке по обычной технологии эта разноширинность составляла 40-180 мм.

Установлено, что в условиях стана 2800 за счет переменного бокового обжатия сляба расход металла возможно уменьшить на 20-25 % отн. При массовом производстве толстых листов с переменным боковым обжатием сляба фактическое увеличение выхода годного оказалось несколько ниже. Это объясняется тем, что при уменьшении обрези значительная часть дефектов, обусловленных особенностями процесса перехода металла с боковых граней сляба на контактные поверхности листа, остается на геометрически годной части листа.

Следовательно, необходимымусловиемреализацииэкономииметаллаявляется уменьшение перехода металла с боковой грани сляба на контактные поверхности листа. Величину перехода определяли по предварительно запрессованным в боковые грани и ребра 173-х слябов стержням из нержавеющей стали.

Ширина полосок перехода (наиболее дефектные участки раската) уменьшается: с уменьшением отношения jr- при прокатке в черновой клети с горизонтальными валками; при уменьшении неравномерности нагрева сляба и суммарного обжатия; с увеличением вытяжки при первой протяжке сляба (ц,); с уменьшением вытяжки в поперечных проходах (и,); при увеличении отношения —\*■; при уменьшении обжатия в вертикальных валках. Установлено, что переход металла с боковых граней слябана основные поверхности листа зависит от формы боковой грани сляба, задаваемого в горизонтальные валки: ширина полосок перехода при плоской поверхности боковой грани меньше, чем при выпуклой и больше, чем при вогнутой. На основании полученных результатов для увеличения выхода годного рекомендовано:

-увеличить температуру нижней зоны методической печи на 40°С. Реализация этой рекомендации уменьшила выход беззаказной продукции на 0,5 %:

- прокатку в первых (2-3) поперечных проходах производить с отношением дГ <0,5 - 0,6 (преимущественно при прокатке дорогостоящих сталей и сплавов, так как при этом производительность стана несколько уменьшается);

- при производстве толстолистовой стали большой ширины использовать слябы с вогнутой боковой гранью.

17

На стане 2800 по нашей рекомендации установлены вертикальные валки с калибром, имеющим наклонные стенки, плавно соприкасающиеся с выпуклым дном1. При прокатке листов с переменным боковым обжатием сляба в калибре с выпуклым дном существенно увеличился выход годного за счет уменьшения дефектов на кромочных и концевых участках листов. Кроме этого, отпала необходимость зачистки боковой грани слябов и браковки металла из-за дефектов на этой фани, так как при прокатке в таком калибре металл с боковых фаней сляба практически не переходит на поверхность листов, в результате брак на первом переделе уменьшился в три раза.

Одним из резервов экономии металла при производстве толстолистовой стали является использование минусового поля допусков и поставка металла по теоретической массе. Однако известные формулы для расчета условно-номинальной толщины листа при прокатке в поле минусовых допусков не учитывают дефекты поверхности проката. Между тем, на практике расход металла и количество листов незаказных размеров в значительной мере зависят от качества поверхности. Следовательно, прокатывать толстые листы в поле минусовых допусков следует с учетом качества поверхности проката. В противном случае этот профессивный метод может вместо экономии привести к повышению расхода металла из-за отсортировки листов после удаления поверхностных дефектов.

При производстве толстых листов эффект увеличения выхода годного за счет улучшения формы раската и прокатки в поле минусовых допусков может быть уфачен при резке раската на мерные длины. С целью максимального использования резервов экономии металла, необходимо подбирать оптимальную для конкретных условий массу сляба, учитывая непостоянство технологических параметров и качество поверхности проката.

Разработана методика расчета оптимальной условно-номинальной толщины листа и оптимальной массы сляба, которая реализована в виде вероятностных зависимостей, учитывающих статистические распределения поверхностных дефектов, колебаний фактической массы и размеров слябов, температуры металла, точности прокатки и т. п.

Вероятность получения незаказных длин листов из-за наличия дефектов

определяется по выражению: PhL" =ABCPhL" , (28)

где А - вероятность появления в партии листов с дефектами; В - вероятность появления листов с дефектами в пределах рассмафиваемых заказных длин; С - вероятность появления дефектов с глубиной, выводящей листы за пределы допуска по толщине; Рк - вероятность появления листов определенной условно-годной длины L г при прокатке на толщину h.

Из выражения (28) следует, что вероятность получения листов заказных длин равна:

P„h=(X-A-B-Q-P„'" (29)

Величины А, В и С определяются по фактическим данным. Далее необходимо просуммировать вероятности получения лисюв каждой заказной длины и

'Оптимальную величину стрелы выпуклости дна калибра установили экспериментальным путем

18 вероятности получения незаказных длин для всего диапазона L г при прокатке на заданную толщину, учитывая разброс толщины при прокатке. Полученные данные о распределении длин листов позволяют рассчитывать ожидаемые расходные коэффициенты и количество незаказной продукции при прокатке из данного сляба. Все расчеты проведены на ЭВМ по специальной программе. Дня проверки правильности расчета расходного коэффициента и количества незаказной продукции прокатали 60 тыс. т листа и сопоставили расчетные и опытные данные. Ошибка расчета не превышает 5,15 и 1,5 %, соответственно.

Таким образом, установлена возможность оптимизации массы сляба и условно-номинальной толщины листа в зависимости от уровня технологии. Для" прокатки с боковым обжатием сляба в калибре с выпуклым дном в условиях стана 2800 рассчитаны оптимальные значения величины массы сляба и условно-номинальной толщины листа основного типоразмера. Внедрение этих результатов позволило значительно снизить расход металла и увеличить выход заказных листов на 2,5 %.

3. Формирование заданных потребительских свойств проката за счет оптимизации термодеформационных режимов прокатки

Современный этап развития технологии производства листового проката характеризуется стремлением наряду со снижением расхода металла обеспечить весь комплекс служебных свойств непосредственно после прокатки и по возможности отказаться от последующей термообработки. В зависимости от состава и характеристик оборудования на конкретном прокатном стане могут быть реализованы различные технологии термомеханической прокатки с учетом которых выбирают состав стали. В этом случае в состав стали вводят микролегирующие добавки, позволяющие управлять структурообразованием при прокатке и охлаждении, улучшать комплекс свойств за счет измельчения зерна и дисперсионного твердения, а также снижать содержание углерода в стали и общий уровень легирования, при этом улучшать свариваемость проката. Такой подход к производству проката позволяет снизить расход энергетических ресурсов и легирующих элементов и повышать потребительские свойства.

Нами выполнен анализ возможных технологических схем производства листового проката с улучшенным комплексом свойств. В основу классификации былоположеносоотношениемеждутемпературамидеформации.рекристаллизации аустенита и у—><х превращения. В отдельные схемы выделяем, во-первых, высокотемпературную (рекристаллизационную) обработку, когда в промежутке после окончания деформации и до начала у—>а превращения происходит рекристаллизация аустенита (сюда относятся традиционная горячая прокатка и нормализующая прокатка). Во-вторых, в отдельный случай можно выделить схему, когда деформация происходит выше точки Аг3, но ниже температуры остановки рекристаллизации аустенита. Установлено, что температурную область, промежуточную между двумя описанными, не следует использовать для прокатки.

19

так как здесь имеет место процесс неполной рекристаллизации, что приводит к разнозернистости структуры. Наконец, рассматривается случай деформации в двухфазной области, т.е. ниже А[3, но выше Аг1. Важным признаком технологии является последеформационное охлаждение, которое может осуществляться на воздухе, также возможно применение прерванного ускоренного охлаждения или прямой закалки (с последующим отпуском).

Выбор технологии прокатки зависит от требований, предъявляемых к металлу, химического состава стали и состава оборудования стана. Разработке современных режимов прокатки на примере стана 2800 ООО «Уральская Сталь» посвящен настоящий раздел работы. Основным механизмом повышения одновременно прочности и вязкости стали является зернограничный. Размер формируемого зерна в значительной мере характеризует эффективность режимов прокатки и возможность достижения высокого комплекса свойств. Установлено, что управляющими воздействиями служат: температура нагрева металла под прокатку, температура конца черновой и чистовой прокатки, температурный интервал между окончанием рекристаллизации и началом превращения, степень деформации ниже температуры рекристаллизации, частные обжатия за проход в области рекристаллизации и ее отсутствия, скорость прокатки, скорость охлаждения, в том числе после прокатки и т.д.

Традиционная горячая прокатка осуществляется в области полной рекристаллизации аустенита. Показано, что улучшение свойств проката в этом случае может быть достигнуто при определенном ограничении температурного интервала и степени деформации за проход Многократная рекристаллизация после каждого прохода при прокатке способствует эффективному измельчению зерна аустенита. Для проката, поставляемого в горячекатаном состоянии, нами предложено осуществлять деформацию с частными обжатиями 12-15% за проход, что обеспечивает полное прохождение рекристаллизации и измельчение зерна, позволяет повысить прочностные характеристики металла на 10-15 Н/мм2, ударную вязкость на 10-15 Дж/см2 и улучшить однородность микроструктуры, что позволит увеличить объем поставки металла без последующей термообработки.

Нормализация позволяет улучшить однородность относительно грубой микроструктуры горячей деформации и измельчить зерно феррита, предупреждает образование продуктов промежуточного превращения аустенита, что обеспечивает улучшение вязкости и пластичности стали. Однако, как и все виды термообработки, нормализация из-за дополнительных энергозатрат повышает себестоимость проката.

Измельчения зерна можно достичь, если понизить температуру прокатки и уменьшить температурный интервал от момента завершения деформации до начала превращения (Аі3) в случае стали, не содержащей добавок сильных карбониридообразующих элементов, или до температуры рекристаллизации в случае их присутствия Такой процесс с завершением в области температур нормализации получил название «нормализующей» прокатки.

На основе проведенных экспериментов получено уравнение, показывающее возможность измельчения исходного зерна аустенита (Д^) при нормализующей

20 прокатке (Др:

Д^= 5,33+51,11Д°/г +£-|,"|ехр(350000/Л7')]"м"7 (30)

Разработан и внедрен режим нормализующей прокатки, предусматривающий многократную последовательную рекристаллизацию аустенита между проходами путем деформирования металла с частными обжатиями 12-15 % за проход и окончанием прокатки в верхней части области торможения рекристаллизации аустенита: для низколегированных сталей при температуре 820-840°С, для микролегированных сталей на 20-30°С выше. Такая технология прокатки обеспечивает получение свойств проката и микроструктур, идентичных нормализованному состоянию. Одним из важнейших параметров при рекристаллизационной обработке, влияющих на свойства (в первую очередь ударную вязкость), является размер аустенитного зерна в конце процесса (который минимален в оптимально микролегированных сталях), от которого в свою очередь зависит размер ферритного зерна.

Наиболее рациональной технологией упрочнения проката с использованием тепла прокатного нагрева является термомеханическая (контролируемая) прокатка. Технология контролируемой прокатки с температурой окончания процесса несколько ниже точки Ай, широко используется для получения толстолистового проката для труб большого диаметра. При этом эффективным является микролегирование сталей ниобием, что способствует подавлению процессов рекристаллизации аустенита и тем самым расширяет температурную область, непосредственно примыкающую в Аг3, где рекристаллизация подавлена полностью.

Стан 2800 относится к маломощным реверсивным прокатным станам, максимальное удельное давление по отношению к длине бочки рабочего валка чистовой клети составляет менее 1 т/мм, в то время как для современных станов превышает 2 т/мм. Анализ оборудования стана показал, что оно не позволяет в полной мере реализовать технологию низкотемпературной контролируемой прокатки (НКП). Поэтому для производства проката для хладостойких газопроводных труб нами разработаны новые технологии термомеханической прокатки. Разработан режим прокатки с завершением деформации в нижней части температурной области отсутствия рекристаллизации аустенита (780-820°С). При этом основными элементами технологии являются: низкотемпературный нагрев под прокатку, черновая прокатка с полным прохождением рекристаллизации, чистовая прокатка в области отсутствия рекристаллизации с суммарным обжатием не менее 70 %. Требуемая хладостойкость по виду излома образцов для ИПГ в прокате толщиной 12 мм обеспечивается при завершении деформации не выше 790-800°С, а для листов толщиной 14-15 мм температура окончания прокатки должна быть не выше 730-740°С, что не может быть реализовано на маломощном стане 2800 при данной схеме обжатий. Для обеспечения требуемых значений ударной вязкости (KCV20 и KCU"60) проката для хладостойких труб необходимо использовать сталь с содержанием серы менее 0,010 %. Применительно к этому случаю был разработан режим форсированной перекристаллизации

21 (форсированная нормализация), при котором ударная вязкость повышается на 10-20 Дж/см2 и сохраняются полученные после контролируемой прокатки значения теста Инг.

Первые разработанные марганцовистокремнистые микролегированные (в том числе природнолегированные Ni и Ст) стали классов прочности К52-К60 нашли широкое применение при изготовлении хладостойких труб для магистральных газопроводов с рабочим давлением 75 атм. 0 530-820 мм (одношовные) и 1020-1220 мм (двухшовные) на ОАО «ВМЗ» и ОАО «ЧТПЗ». Однако толщина проката ограничивалась 12 мм. Возможность увеличения толщины проката, удовлетворяющего требованиям по критериям ИГТГ, напрямую связана с возможностью обеспечить требуемую степень суммарной деформации (не менее 3,5-4,0 крат) ниже температуры торможения рекристаллизации. На маломощных станах необходимо повысить температуру остановки рекристаллизации, для чего наиболее приемлемым является повышение содержания ниобия. Кроме того, важным механизмом обеспечения критерия ИПТ является формирование кристаллографической текстуры в феррите, которая достигается завершением деформации в у+а области (ниже 780-770°С). Для такой прокатки разработан режим с мелкодробными обжатиями (степенями деформации за проход менее 10%). Разработана и внедрена технология термомеханической прокатки с использованием пониженной температуры нагрева слябов (1170-1200°С), мелкодробными обжатиями и завершением прокатки в нижней части у-или в верхней части у+а области с последующим охлаждением на воздухе.

Таким образом, на маломощном стане 2800 создана технология термомеханической прокатки, обеспечивающая получение исключительно мелкозернистого (5-6 мкм) проката для хладостойких труб магистральных трубопроводов в толщинах до 16 мм, удовлетворяющих тесту ИПГ.

Дополнительное измельчение зерна можно обеспечить, используя ускоренное охлаждение после деформации за счет понижения температуры превращения деформированного аустенита. Нами установлена зависимость величины ферритного зерна (Да) от размера деформированного зерна аустенита (Я) и скорости охлаждения (V ):

^ = 5,13 + 0,314^-0,0735^0^) (31)

При прерванном ускоренном охлаждении с температурой окончания ~ 500°С, можно получить действительное зерно размером до 4 мкм.

Эксперименты с использованием установок ускоренного охлаждения, которые были в эксплуатации на стане 2800, позволили оценить возможности ускоренного охлаждения, включая закалку с прокатного нагревадля формирования оптимальной структуры и повышения свойств проката. При этом нами сформулированы технические требования к современной установке ускоренного охлаждения.

На основании анализа результатов исследований в промышленных условиях на ООО «Уральская Сталь» была разработана и внедрена технология прокатки на стане «2800» (без коррекции температурного режима) с последующим ускоренным охлаждением до 640-670°С листов из стали СтЗсп, 09Г2С, 10ХСНД и 17ГС, при этом достигалось повышение уровня предела текучести на 20-40 Н/мм2,

22 временного сопротивления на 10-20 Н/мм2, ударной вязкости на 10-20 Дж/см2. Ускоренное, охлаждение стали 12ГСБ (со скоростью -12 град/с и температурой окончания ~580°С), прокатанной по контролируемому режиму, повысило прочностные свойства проката по сравнению с охлаждением на воздухе более чем на 100 Н/мм2, а ударную вязкость на 40-50 Дж/см2.

Одним из важнейших элементов повышения конкурентоспособности проката является снижение его себестоимости за счет сокращения количества технологических операций и снижения расхода энергоносителей. В этом смысле эффективно термическое упрочнение с прокатного нагрева Повышение прочности при закалке с прокатного нагрева в сравнении с закалкой с отдельного нагрева обусловлено повышением прокаливаемости (устойчивости аустенита) в связи с более высокой температурой нагрева под прокатку в сравнении с термообработкой с отдельного нагрева, что связано с повышенной растворимостью элементов в аустените. Повышение прокаливаемости дает возможность использовать эту технологию двояким образом: увеличить прочность проката из стали данного состава или уменьшить содержание легирующих элементов в стали (снизив при этом углеродный эквивалент на 0,05-0,09% и улучшив свариваемость) для данного уровня прочности (рис.1).

1200 -г

5

§■ 1000 -

■ З + О в ЗПН + О

fc 800 -

ш

X

I 600 -

I 400-

а.

С 200 -

0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9

Углеродный эквивалент

Рис. 1. Эффективность применения закачки с прокатного нагрева в сравнении с закачкой с отдельного нагрева.

Показано, что если закалка с прокатного нагрева с отпуском (ЗПН+О) обеспечивает повышение прочности в сравнении с закалкой с отдельного нагрева (З+О), то применением контролируемой прокатки перед ЗПН можно повысить хладостойкость проката.

В табл. 1 представлены эффективные технологии, разработанные для маломощных станов типа стана 2800, которые позволяют получить прокат со свойствами, отвечающими лучшим мировым стандартам.

Таблиця 1. Разработанные и реализованные на стане 2800 технологии контролируемой прокатки

Режимы прокатки Т,°С нагрева Т, °С после 2го

пропуска на клети

ДУО 'Г, °С начала

прокатки в клети

КВАРТО Режим обжатий в клети КВАРТО, кол-во проходов Т, °С конца

прокатко

в клети

КВАРТО Охлаждение

после

прокатки Реализация

1 Прокатка с завер¬шением деформации в нижней части аустенитной области 1180-1210 980-1030, в последних

3-х проходах, £ > 10-

12% за проход 850-880 6-8 проходов

Суммарное обжатие

не менее 70% 780-800 11а воздухе Внедрена на сталях 101 ШФБ

(К60), 10Г2СФВ(К60),

12ГСЬ(К52), 12Г2СБ(К56)

толщины проката

до 12 ммвкл

2 Прокатка с завер-шением деформации в межкритической области с мелкодроб-ными обжатиями 1180-1210 980-1030, в последних

3-х проходах,

Е > 12% за проход 900-920 для листов более 14 мм 11-13 проходов для

листов более 14 мм

Суммарное обжаше

не менее 70% 740-780 На воздухе Внедрена на сталях 13Г1С-У

(К55)и08ПНФ£(К60)в

толщинам прокша до 16 мм

вкл (Nb > 0,06%)

3 Прокатка сталей с высоким содержанием серы (-0,02%) и пос¬лед} кэшей форсиро¬ванной перекристал-лизацией 1180-1210 980-1030, в последних

3-х проходах, Е > 10%

за проход 850-880 6-8 проходов

Суммарное обжатие

не .менее 70% 780-800 11а воздухе, за гем режим форсиро-ванной нормализации Внедрена на сталях 12ГСБ

(К52) и 12Г2СБ (К56) при их

производстве в мартеновском

цехе, толщина проката

до 12 мм вкл

4 Прока пса с завер¬шением деформации в нижней части аустенитной области с последующим прерванным У О 1180-1210 980-1030, в последних

3-х проходах, Е > 10%

за проход 850-880 6-8 проходов

Суммарное обжатие

не менее 70% 780-500 УО до t-ры

550-600°С,

Vox= 10-12

град/с Опробовано в цеховых условиях на стали 12ГСБ, толщина проката до 14 мм

вкл

5 Прокатка с заверше¬нием деформации в аустенитной области и закалкой с прокатного нагрева 1200-1220 980-1030, в последних

3-х проходах, Е > 10%

за проход Без ограничений Без ограничений 850-870 Охлаждение

с Vox > 30

град/с, отпуск

670°С Опробовано в цеховых условиях на стали 10Г2СФБ с Vox>20 ірад/с, толщина прокатало 14 мм вкл

6 Прокатка с заверше¬нием деформации в нижней части аусте¬нитной области с после¬дующим интенсивным ускоренным охлаждением. 1180-1210 980-1030, в последних

3-х проходах, е> 10%

за проход 850-880 6-8 проходов

суммарное обжатие

не менее 70% 780-800 Охлаждение с V> 20 град/с до t-ры 450°С Опробовано на стали 12ГСБ,

толщина проката до 10 мм

вкл

24

4. Освоение производства толстолистового проката с повышенными

эксплуатационными свойствами из сталей нового поколения.

Исследование потребительских свойств проката

Анализ сортамента толстолистовых сталей, производимых на ООО «Уральская Сталь» (ОХМК), к моменту посіановки работы выявил их ряд недостатков с точки зрения современных требований потребителей, в том числе: повышенное содержание углерода и вредных примесей, повышенное содержание и неэффективное использование легирующих элементов, недостаточный уровень прочности, неудовлетворительная свариваемость; отсутствие гарантии ряда механических и технологических свойств- хладостойкости, огнестойкости, коррозионной стойкости, Z-свойств и др., необходимость применения термической обработки, повышающей себестоимость проката

На основании проведенных исследований в работе предложена концепция разработки сталей нового поколения, включающая: максимальное измельчение зерна путем оптимизации технологии и микролегирования; минимальное (для обеспечения заданной прочности) содержание углерода; упрочнение твердого раствора кремнием, марганцем и путем природного легирования никелем и хромом; дисперсионное твердение ванадием, ниобием; повышение чистоты стали по вредным примесям; максимальное использование контролируемой прокатки и применение термической обработки только в крайнем случае (повышенные толщины, необходимость обеспечения специального комплекса свойств и др.).

Указанные технологические приемы и структурные механизмы применяли комплексно с учетом требуемого уровня свойств проката для различных отраслей народного хозяйства и экономической целесообразности.

С учетом применения новых технологий на деформационном переделе проведены исследования влиянияуглерода, легирующих (в том числе и природного легирования) и микролегирующих элементов на свойства и структуру проката, что позволило создать основу для разработки трубных сталей нового поколения различных классов прочности. Основные стадии работ, направления развития трубных сталей и достигнутые результаты схематично представлены на рис. 2.

По мере развития технологии взамен устаревших сталей типа 17ГС, 17Г1С-У были разработаны стали с пониженным содержанием углерода, серы, микролегированные ниобием (при необходимости - ванадием). На сталях марок 12ГСБ, 12Г2СБ, 10Г2СФБ удалось обеспечить после контролируемой прокатки класс прочности К52-К60 с гарантией доли вязкой составляющей в изломе образцов для ИПГ при -20°С в листах толщиной до 12 мм.

Дальнейшее развитие трубные стали в настоящей работе получили путем применения природного легирования хромом и никелем с использованием руд Халиловской группы месторождений. На этой основе были предложены хладостойкие стали классов прочности К52-К60 для трубопроводов с повышенным ресурсом эксплуатации марок ЮГНБ-ПЛ, 09ГНФБ-ПЛ и 08Г1НФБ-ПЛ. За счет использования природного легирования удалось снизить в сталях содержание углерода и марганца.

25

650

Основные

направлення

разработок Исходное состояние +Nb ТМп 1С, IS, +V 1С, 1Мп, +ПЛ iC, |Nb 1C.-V

Марка стали 17Г1С-У 12ГСК 12Г2СБ 10Г2СФБ 08Г1НФБ 13ПС-У 05ПБ

Состояние поставки Нормали-зация (Н) КИ КП КП КП КП КП+УО

Сэкв 0,39-0,46 <0,41 0,39-0,44 0,38-0,42 0,37-0,41 0,38-0,42 <0,40

210

при (УС при-2№С при-20\*С при~2СРС при -2СРС nfm ,1S,C ^,-2^

Рис. 2. Схема основных этапов разработки трубных сталей повышенной прочности и хладостойкости применительно к ООО «Уральская Сталь» (ОХМК)

26

Предложена концепция повышения коррозионной стойкости сталей: сталь должна содержать 0,2-0,5% Cr; 0,3-0,4% Ni и Си; не должна подвергаться глубокой дефосфорации; должна иметь невысокое содержание углерода.

Для электросварных труб повышенной коррозионной стойкости модернизировали традиционные для нефтепроводов трубные стали марок 17ГС, 17Г1С, 17ПС-У. В зависимости от уровня минерализации подтоварных вод предложена поставка сталей двух категорий коррозионной стойкости К52ПЛ-1 и К52ТТЛ-2. Гарантируемое предельное значение скорости общей коррозии для обеих категорий сталей составляет <0,4 мм/год.

Проведены систематические исследования свойств проката из разработанных сталей. Результаты проведенных испытаний проката из стали 08ГШФБ-ПЛ показали, что металл имеет высокий уровень ударной вязкости во всем исследованном интервале температур испытания. Установлено, что до температуры испытания -30°С в изломе образцов для ИПГ сохраняется не менее 85 % вязкой составляющей, а переходная температура Т50 находится ниже минус 40°С, что говорит о высоком сопротивлении хрупкому разрушению. Сопоставление стали 08ПНФБ-ПЛ с традиционной показывает, что новая сталь при более высокой прочности имеет ударную вязкость в 3-5 раз выше, а порог хладноломкости на 60°С ниже (рис. 3).

-60 -40 -20 0 20

Температура испытания, С

17ПС-У 08ПНФБ-ПЛ

2

-80 -60 -40 -20 0 20 Температура испытания, С.

40

-17Г1С-У -08ПНФБ-ПЛ

Рис. 3. Сопоставление вязкости и хладостойкости проката иі етапи 17Г1С-У и 08Г1НФБ-ПЛ

27

Сталь марки 08ПНФБ-ПЛ отличается повышенной чистотой по неметаллическим включениям: средний балл по сульфидам не превышает 1,0 балла по ГОСТ 1778, по оксидам и силикатам - 2,5 балла, размер ферритного зерна после термомеханической прокатки не крупнее номера 10 по ГОСТ 5639, полосчатость до 1,5 баллов по ГОСТ 5640.

Разработанные стали по сопротивлению зарождению трещины более чем в 2,5 раза превосходят традиционную сталь 17Г1С. Аналогичные результаты получены и для работы развития трещины. Испытания образцов с заранее нанесенной трещиной показали, что стали 09ГСНФ и 08ГШФБ-ГОІ имеют более высокие значения критического раскрытия трещины COD в сравнении со сталью 17Г1С. Оценка сопротивления усталостному разрушению показала, что разработанные стали более стойки к циклическим нагружениям, чем традиционная сталь, длительность инкубационного периода у сталей 09ГСНФ и 08Г1НФБ-ПЛ в 1,5-2 раза выше.

Проведенный комплекс исследований показал, что сталь 08Г1НФБ-ПЛ характеризуется наилучшими показателями по стойкости к зарождению и распространению трещины в условиях статических, циклических испытаний и замедленного разрушения при воздействии напряжений, коррозионной среды и водорода. Испытания на стойкость к общей коррозии в минерализованных водах, соответствующих по составу пластовым водам нефтяных промыслов, по методике ЦНИИчермета им. И.П. Бардина показали, что сталь 08ГШФБ-ГОІ выдерживает норматив по коррозионной стойкости (менее 0,4 мм /год) при содержании кислорода до 2,5 мг/л.

Сталь марки 08Г1НФБ-ПЛ не склонна к образованию холодных трещин при всех используемых видах сварки, максимальный уровень ударной вязкости околошовной зоны наблюдается при ручной дуговой сварке и сварке в среде защитного газа.

Обеспечение хладостойкости стали в прокате толщиной более 12 мм с учетом возможностей стана 2800 является крайне трудной задачей, которая до постановки настоящей работы не решалась без применения закалки с высоким отпуском. В работе предложен подход, позволяющий в условиях стана 2800 производить хладостойкий прокат в толщинах до 16 мм, что достигается уменьшением содержания углерода и измельчением зерна феррита. Последнее обеспечивается приведением в соответствие температуры остановки рекристаллизации аустенита с температурой начала чистовой прокатки путем введения в сталь необходимого количества ниобия.

На базе этого подхода оптимизирован состав стали 13Г1С-У и освоено производство проката толщиной до 16 мм класса прочности К55 для хладостойких труб диаметром до 1220 мм. Исследование хладостойкости проката показало, что он имеет ударную вязкость KCU при температуре испытания -70°С более 150 Дж/см2, ударная вязкость KCV превышает уровень 100 Дж/см2 при температурах до -60°С, доля вязкой составляющей в изломе образцов для ИПГ более 80% гарантируется при температурах испытания до -30°С. Микроструктура стали

28 после контролируемой прокатки феррито-перлитная, размер зерна соответствует номеру 10-11 по ГОСТ 5639, полосчатость - 1-2 баллу по ГОСТ 5640.

Таким образом, разработаны и впервые освоены в производстве на стане 2800 с применениемразработаннойтехнологииконтролируемойпрокаткитолстолистовые стали толщиной до 16 мм для электросварных труб диаметром до 1220 мм классов прочности К52-К60, в том числе хладостойких и коррозионностойких с повышенным ресурсом эксплуатации из марок: 12ГСБ, ЮГНБ-ПЛ, 09ГНФБ-ПЛ, 08ПНФБ-ПЛ, 17ПС-У-ПЛ, 13ПС-У(микролегированнойМЬ)идр.Сталипрошли полный комплекс испытаний, включая полигонные, и включены в «Инструкцию по применению стальных труб в газовой и нефтяной промышленности» ОАО «Газпром».

Впервые в России разработаны научные основы и создан новый подкласс материалов: строительные свариваемые стали повышенной огнестойкости, сохраняющие требуемый комплекс механических свойств до температур 600-700°С. Установлено, основными принципами создания таких сталей являются:

- получение структуры, состоящей из ферритной матрицы с развитой субструктурой, с достаточным количеством сдвиговой фазы с повышенной плотностью дислокаций;

- сохранение в твердом растворе определенного количества ванадия (или ниобия) для его последующего выделения в процессе нагрева;

- в зависимости от требований необходимо использовать один, два или три основных воздействия на структуру стали, обеспечивающих: наклеп феррита, формирование бейнита, торможение выделения частиц карбонитридных фаз;

- сталь должна содержать минимальное количество углерода и марганца и при повышенных требованиях - молибден.

Разработаны огнестойкие стали марок 06БФ и 06МБФ повышенной хладостойкости и на ООО «Уральская сталь» освоено промышленное производство проката классов прочности С255 и С345 толщиной 8-50 мм. Проведенные исследования показали, что прокат из стали 06МБФ имеет ударную вязкость KCV\*0 > 100 Дж/см2, что позволило впервые в отечественной практике ввести в ТУ гарантии по этой характеристике. Прокат имеет очень высокие z-свойства i|/z=76-82%. Испытания при 600 °С показали, что прокат из стали 06МБФ имеет предел текучести 238-298 Н/мм2, в сравнении с ат=60-107 Н/мм2 для стандартных сталей СтЗсп, 09Г2С (рис. 4). При исследовании свариваемости установлено, что высокий уровень ударной вязкости (KCV"° > 29 Дж/см2) околошовной зоны и невысокая твердость (HV < 320 ед.) позволяют использовать все режимы сварки, регламентированные строительными нормами и стандартами. Оценка хладостойкости сварных соединений на образцах натурных толщин (20 мм), дала значения переходной температуры -50°С для стали 06БФ и -70°С для стали 06МБФ.

29

Рис. 4. Сопоставление свойств проката из стандартных строительных и огнестойкой стали 06МБФ

Взамен морально устаревших неэффективных сталей марок (10-15) ХСНД разработаны стали марок 10ХСНДА, 15ХСНДА и освоено массовое производство толстолистового проката из этих сталей для мостостроения и строительства, что позволило полностью обеспечить требования потребителей. Основные этапы разработок и достигнутые при этом результаты приведены ниже.

1. Снижение максимальной массовой доли серы и фосфора с 0,035% до 0,015 и 0,020% соответственно позволило обеспечить нормированные значения ударной вязкости KCV20 и KCV40 > 29 Дж/см2; значения Z-свойств ом > 0,5а и у2 > 15%; повысить сплошность проката, оцениваемую по результатам УЗК, с 3-го до 2-го класса по ГОСТ 22727; обеспечить нормированное значение ударной вязкости KCU™ < 29 Дж/см2 в ЗТВ при сварке.

2 Снижение массовых долей углерода, марганца, хрома, никеля и микролегирование ванадием или ниобием и создание сталей марок 15ХСНДА и 10ХСНДА позволило: нормировать углеродный эквивалент Сэ < 0,42%, полностью исключить образование холодных трещин после заводской и монтажной сварки, повысить надежность обеспечения нормативных требований по ударной вязкости и снизить себестоимость проката.

3. Показано, что для обеспечения требуемой ударной вязкости в сварных соединениях, выполняемых по унифицированной технологии, необходимо повысить массовую долю марганца > 0,50% и снизить содержание серы < 0,010%, фосфора < 0,015%. С целью повышения механических свойств в Z-направлении и его сплошности разработана и внедрена технология замедленного охлаждения листов после прокатки. Это обеспечило: уг > 35%, улучшение сплошности до классов 0-1 ГОСТ 22727; повышение нормативных требований по ударной

зо

вязкости проката и сварных соединений до KCU'70 > 69 Дж/см2.

4. Последним этапом разработок конкурентоспособного проката для мостостроения явилась реализация энергосберегающей технологии, включающей «нормализующую прокатку» в сочетании с режимами замедленного охлаждения листов после прокатки.

Достигнутый уровень качества проката обеспечил практически равный уровень прочностных и пластических свойств в плоскости проката и в направлении его толщины. Исследования, проведенные в ЦНИИСе, показали, что прокат из сталей нового поколения обеспечивает все сварочно-технологические характеристики применительно к условиям заводского изготовления и монтажа мостовых конструкций.

Разработана природнолегированная сталь С345ПЛ для сварных строительных конструкций с гарантией ударной вязкости KCV45, что обеспечено формированием мелкодисперсной структуры с размером зерна 10-11 номера. Скорость атмосферной коррозии стали С345ПЛ в окислительных и кислых средах в среднем на 35 % меньше, чем стандартной стали С345. Сталь С345ПЛ имеет хорошую свариваемость и не склонна к образованию холодных трещин в околошовной зоне.

Для крупных гражданских зданий, имеющих большое социальное значение, разработана технология и впервые изготовлена промышленная партия проката толщиной 50 мм из стали 10ХСНДА класса С390 с гарантией Z-свойств, повышенной коррозионной стойкостью и с высоким комплексом служебных свойств. Свойства в направлении толщины проката: аа = 560 Н/мм2, vj/2 = 61-1Л %. При испытаниях на ударный изгиб минимальные значения составляли: KCU"70 = 200 Дж/см2, KCV-40 =210 Дж/см2, KCV50 = 80 Дж/см2 При исследованиях сварных соединений по методу Кинцеля выявлены высокие значения хладостойкости: Т \_1% = -60 °С, максимальная твердость околошовной зоне (ОШЗ) не превышала 270 HV. Величина критического коэффициента интенсивности напряжений К[с при -70 °С составляет 120 МПа-м"2, что свидетельствует о высокой надежности данного проката с точки зрения возникновения спонтанных хрупких разрушений при эксплуатации.

Уточнены металловедческие принципы и впервые в России разработаны и освоены в производстве высокопрочные свариваемые стали марок 17ХГН2МФБТ и 12ХГН2МА с пределом текучести до 1000 Н/мм2 повышенной износостойкости и хладостойкости, по комплексу механических свойств превосходящие общемировой уровень, принятый для сталей типа Hardox-400 и Weldox-700. Обеспечение требуемого комплекса свойств проката базировалось на следующих металловедческих положениях: а) легирование Mn, Сг, Ni, Mo для сквозной прокаливаемости; б) микролегирование V, Nb для измельчения зерна и повышения износостойкости; в) оптимальное содержание углерода для баланса прочности, вязкости и свариваемости; г) микролегирование бором при толщине листа до 50 мм; д) пониженное содержание вредных примесей (S, Р); е) новая технология

31 термической обработки

Исследование хладостойкое™ показало, что по критерию ударной вязкости порог хладноломкости стали марки 17ХГН2МФБТ располагается ниже -30°С, а для стали марки 12ХГН2МА - ниже -70 °С. При режимах сварки, применяемых при изготовлении кузовов и рам самосвалов, ударная вязкость металла ОШЗ не ниже свойств основного металла, а для стали марки 12ХГН2МА металл ОШЗ имеет ударную вязкость KCV70 - не ниже 30...40 Дж/см2. Проведенные сравнительные испытания на циклическую усталость сталей марок 12ХГН2МА и 10ХСНД свидетельствуют о существенном превосходстве стали 12ХГН2МА: инкубационный период зарождения трещины больше в 2,5 раза; общий период роста трещины больше в 1,6 раза; средняя скорость роста трещины меньше в 1,4 раза. Сталь марки 12ХГН2МА обладает сквозной прокаливаемостью в толщинах до 30 мм, практически не склонна к деформационному старению.

Сформулированы отличительные признаки сталей нового поколения, обеспечивающие производство конкурентоспособного проката:

- по технологии производства: применение разработанных оптимальных энергосберегающих технологий термомеханической и термической обработки стали;

- по химическому составу: новые композиции с использованием природного легирования, пониженным содержанием углерода и марганца, комплексного микролегирования;

- формирование путем целенаправленного воздействия на процессы струк-турообразования гаммы структур, в зависимости от предъявляемых требований: мелкозернистого (4-7 мкм) феррита и перлита, дисперсной феррито-бейнитной, бейнито-ферритной, бейнито-мартенситной и мартенситной (отпущенных);

- высокая степень чистоты за счет современной технологии внепечной обработки и использования природнолегированного чугуна;

- при данном уровне прочности стали нового поколения имеют: в 2-4 раза более высокую ударную вязкость, повышенную хладостойкость (гарантированный уровень доли вязкой составляющей в изломе образцов для ИПГ), улучшенную свариваемость;

- стали обеспечили производство проката со специальными свойствами: огнестойкого до 600-700°С, коррозионностойкого (<0,4 мм/год), повышенной трещинностойкости.

5. Внедрение разработок в производство, эффективность применения новых технологий на прокатном переделе и видов проката

В целом, разработаны и внедрены технологии производства конкурентоспособного проката обеспечивающие: экономию металла на 10%; экономию энергоносителей за счет минимального использования термической

32 обработки и применения низкотемпературных режимов нагрева под прокатку; экономию легирующих элементов и расходов на ферросплавы путем формирования оптимальной структуры при использовании разработанных технологических схем, оптимальных составов стали и применения природного легирования.

С использованием новых технологий на прокатном переделе на стане 2800 освоено производство проката из 19 марок сталей нового поколения, характеризующихся повышенным комплексом эксплуатационных свойств. Из изготовленного в объеме более 630 тыс. тонн проката построены мосты, путепроводы, производственные и гражданские здания и сооружения, газо-нефтепроводы, большегрузные автомобили., в том числе ряд уникальных сооружений.

Техническая эффективность разработок заключается в достижении нового уровня качества металлопроката: повышенной прочности, хладостойкости, огнестойкости, коррозионной стойкости, свариваемости, гарантии сплошности проката и Z-свойств.

Экономический эффект работы обусловлен снижением себестоимости стали и проката за счет уменьшения расхода ферросплавов и энергоносителей, снижением расхода металла на прокатном переделе, сокращением сроков ввода в строй крупных строительных конструкций за счет бездефектности проката, исключением защитных покрытий конструкций, повышенным ресурсом эксплуатации, и составляет 5,2 млрд руб.

6. Перспективные направления реконструкции толстолистовых

станов и разработка научных основ перспективных

ресурсосберегающих технологий производства проката

Экспериментальные исследования, по результатам которых разработаны рациональные технологии производства толстолистовой стали нового поколения с высокими потребительскими свойствами при одновременном снижении затрат на производство, позволили разработать направления реконструкции реверсивных толстолистовых станов России. Анализ состава оборудования и технологических возможностей действующих в России 14 толстолистовых станов показал, что только три стана (2800 ООО «Уральская Сталь», 2800 и 5000 ОАО «Северсталь») пригодны после соответствующей реконструкции для производства конкурентоспособной толстолистовой стали нового поколения.

Перспективными направлениями реконструкции толстолистовых станов 2800 являются:

- замена клети с вертикальными валками на более мощную, с допустимым давлением металла на валки из условия прочности узлов клети не менее 600 т.е. Диаметр вертикальных валков по дну калибра должен быть не менее 1000 мм. Клеть должна быть оборудована автоматизированной системой переменного бокового

33 обжатия слябов и использоваться как эффективный инструмент снижения расхода металла за счет улучшения формы раскатов;

- установка перед первым холодильником агрегата поперечной резки горячих раскатов для обеспечения прокатки 2-3-х листов из одного сляба, что позволит снизить расход металла и энергозатрат на 5-6 %;

- установка чистовой клети с допустимым давлением металла на валки не менее 6000 т.е., а также установка за чистовой клетью устройства для ускоренного охлаждения проката (разработаны технические требования к такой установке). Это позволит реализовать технологии производства толстолистовой стали нового поколения с повышенными потребительскими свойствами и пониженным содержанием легирующих элементов;

- замена существующих маломощных пятивалковых правильных машин на 9-11-валковые с автоматизацией процесса правки листов с пределом текучести до 1000 Н/мм2 при минимальной температуре правки 500°С. Такая реконструкция обеспечитвыполнение перспективных требованийпотребителейкгеометрическим размерам проката с уменьшением отклонения от плоскостности листового проката с 7-10 мм до 2-3 мм/м;

- установка в потоке стана ножниц поперечной резки с «катящимся резом», что позволит обеспечить требуемую плоскостность заднего конца листа;

- замена существующих закалочных прессов на роликозакалочные машины с давлением воды у сопла 700-1000 КПа, обеспечивающих необходимую плоскостность и равномерность механических свойств по площади термоулучшенных листов;

- комплексная автоматизация технологических процессов для обеспечения

устойчивых результатов по качеству листов и снижения материальных затрат всех

видов.

Разработанные перспективные направления реконструкции толстолистовьгх станов для производства сталей нового поколения легли в основу программы реконструкции стана 2 800 ООО «Уральская Сталь» и могут быть использованы при корректировке планов реконструкции станов 2800 и 5000 ОАО «Северсталь».

Дальнейшее улучшение экономических показателей при производстве листового проката может быть достигнуто при совмещении в технологическую линию непрерывной разливки и прокатки. Современные планетарные станы по нашему мнению наиболее пригодны для совмещения с МНЛЗ как по производительности, так и по кинематическим параметрам. Проектирование литейно-прокатных модулей создание технологии и оборудования требуют разработки режимов прокатки и оценки технологических, деформационных и энергосиловьгх параметров процесса прокатки, совмещенного с непрерывной разливкой стали.

При полосовой планетарной прокатке, в отличие от периодической в зоне деформации всегда находится одра или две пары волков ы, следовательно, холостой промежуток отсутствует. Тогда і ісжно сотта^дштехфдная заготовка поступает

СПетервург J

» 99 Ив net .

■ ■— \*\*

34 в клеть непрерывно и с постоянной осевой скоростью, равной

V = m/T, (32)

где m - величина осевой подачи исходной заготовки за один цикл прокатки, м; т - время одного цикла прокатки, с.

Согласно предложенной в работе схеме перемещения рабочих валков в зоне деформации следует, что объем металла, заключенный между смежными парами рабочих валков, равен

VV. + (He-q)m, (33)

а не как определялось ранее

V, = Hm, (34)

где Но - половина толщины исходной полосы, м; Vm - объем подачи металла за цикл прокатки, отнесенный к одному валку, м3. "

Вынося Но за скобки, получим

V=kV°. (35)

f tf го

Здесь к - безразмерный коэффициент, равный

Я,+(Д + 2г)[1-со8(фг+ч/)]

%-2 — . (36)

где Н, - половина конечной толщины, м; R и г - радиус опорного и рабочего валков соответственно, м; фг - угловой шаг между соседними валками, рад.; у - текущее значение центрального угла валка, рад.

Согласно принятой схеме, определение величины абсолютных

Д#, = p(cos \|/ - cos \у5), (37)

ff.+pO-COSYlU

и относительных є =ш— — (38)

#,+p(l-cos\j/)

частных обжатий сводится к отысканию угла ц/ из трансцендентного уравнения

—f^£¥ +(sin2\|/5 -sin2vj/)+2(\j;5 -у)-4(1-Н</)(йпук-5Іпу) = 0, (39)

где p = R+2r, м; \|/ - значение центрального угла в точке определения частных деформаций, рад.

Анализ полученных зависимостей показал, что при прокатке с перекрытием максимальные значения частных обжатий больше их минимальных значений в начале зоны деформации в 5... 30 раз.

Разработанная методика позволяет провести расчет деформационного режима планетарной прокатки с учетом влияния исходной и конечной прокатываемой полосы.

Для определения энергосиловых условий процесса необходимо знать напряжения на контактной поверхности валков с металлом. При определении контактных напряжений на поверхности валков целесообразно воспользоваться

35 энергетическим методом или методом баланса мощностей. Баланс мощности при планетарной прокатке можно представить уравнением:

Nb + Nn+N-VN = 0 (40)

где Nb - мощность, подводимая в очаг деформации через валки; Nn - мощность подпора сляба; NH - мощность натяжения полосы; N - мощность сил внутреннего сопротивления металла пластическому формоизменению; N - мощность сил внешнего трения на контактной поверхности валков.

При полосовой планетарной прокатке на значительном участке зоны деформации, превышающем 4/5 общей ее длины от начала сляба, процесс идет при 1/п <Т, когда силы внешнего трения и скорости скольжения на контактной поверхности валков заметного развития не получают. В этих условиях силами внешнего трения при прокатке обычно пренебрегают (N =0).

Задача определения нормальных контактных напряжений сводится к отысканию коэффициента напряженного состояния по, равного

"•-£■ (41>

где Р - нормальные контактные напряжения, Па;

к - константа пластичности металла или сопротивления его чистому сдвигу, Па.

После подстановки в уравнение баланса мощности выражений его членов и необходимых математических преобразований получим

„ /ц 1-coscc, Z. ^#,/-cosvy

\_ п, /2r+cos(p-cos((p-ct,,) r+R I2

r[ cos w+ —1

y (r + R)l

где no - безразмерный коэффициент, равный no = /2klu > a„ ~ уг°л ДУ™ касания рабочего валка с металлом, град; ср - угол отклонения рабочего валка от плоскости, в которой лежат оси опорных валков, град; / - проекция дуги контакта рабочего валка с металлом, м; m - величина подачи сляба за один цикл прокатки, м; z -количество пар рабочих валков; у - угол отклонения от оси прокатки внешнего контура мгновенного очага деформации, град; у - коэффициент натяжения готовой полосы.

Для определения коэффициента по в работе были использованы метод разрывных решений в сочетании с экстремальными принципами теории пластичности.

Выразив коэффициент по в функции от заданных параметров п =7/п и у и варьируемых параметров Р и 9, дальнейшее решение задачи сводится к поиску экстремума функции no = f (Р, 8) в точках минимума

dn/dp = 0, дп0/дв = 0. (43)

Чтобы корни уравнения удовлетворяли экстремуму искомой функции п в точках минимума, необходимо соблюсти условие

36

где d\ - второй дифференциал функции по.

Полученные расчетные значения коэффициента п с высокой степенью точности аппроксимируются с помощью полинома Лорана зависимостью

по = 0,41+0,32п +0.29/П +0,49у +1,47у2 - 0,33n.\|/. (45)

Коэффициент по при у = 0 изменяется от своего максимального значения, равного 2,57 при т)< 0,13, до 1 при ц = 1. Разница между по при у = 20° и у = 0 изменяется от 9,5 % при ц = 0,15 до 18,3 % при ц = 1.

Экспериментальные исследования энергосиловых параметров проводили на лабораторном стане 80 и реконструированном стане 600 Экспериментального завода ЦНИИчермета на различных сталях. С целью определения достоверности полученных теоретических зависимостей было произведено сопоставление расчетных и экспериментальных значений усилий прокатки. Из сравнения следует, что с понижением температуры конца прокатки расчетные усилия меньше их экспериментальных значений на 10... 15 %, при этом максимальные отклонения наблюдаются для случая прокатки стали 09Г2ФБ. При температуре прокатки 900 °С отличие расчетных усилий от экспериментальных не превышает 5 %.

Проведены комплексные экспериментальные исследования по определению влияния технологических режимов планетарной прокатки (в том числе по схеме ТМО)на уровень механических свойств углеродистых (СтЗсп), низколегированных (09Г2ФБ и 10Г2ФБ; и легированных конструкционных (40ХН2МА) сталей. Показана возможность существенного повышения прочностных свойств и вязкости проката в сравнении с традиционной прокаткой за счет формирования дисперсной структуры (до 14 номера зерна).

Полученные результаты позволили создать технологические основы применения планетарного стана для получения проката из конструкционных сталей с повышенным комплексом свойств и оптимальной структурой минуя стадию термической обработки. Производство проката на совмещенных модулях непрерывной разливки и планетарной прокатки обеспечивает экономию топлива до 50 %, снижение капитальных затрат на 30-40 % и повышение выхода годного до 98-99 %. Для повышения механических и эксплуатационных свойств готовой полосы возможно использование технологии термомеханической прокатки.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Создана концепция производства конкурентоспособного толстолистового проката, включающая научные основы новых технологий прокатки: металлосберегающих, энергосберегающих, материалосберегающих и обеспечивающих формирование оптимальной структуры и заданного комплекса

37 высоких эксплуатационных свойств толстолистовой стали, на ее основе разработан комплекс технических решений позволивший решить народно¬хозяйственную проблему организации массового производства и широкого применения листового проката из сталей нового поколения для мостостроения, строительства, машиностроения и трубопроводного транспорта с высоким комплексом потребительских свойств при одновременной экономии металла, сырья и энергоресурсов.

2. Получила дальнейшее развитие теория прокатки в части закономерностей

формоизменения толстолистовых раскатов при обжатии слябов в вертикальных

валках и последующей их прокатке в горизонтальных валках, что послужило

основой совершенствования технологии прокатки толстых листов на стане

2800, в первую очередь в целях снижения расхода металла. При этом введено

новое понятие "поперечного" коэффициента эффективности обжатия полосы

вертикальными валками как способа выравнивания концов раската при поперечной

схеме прокатки. Установлено, что эффективность обжатия полосы в вертикальных

валках при последующей продольной прокатке в горизонтальных валках в 1,5-2,5

раза больше, чем при поперечной прокатке. Впервые установлена закономерность

изменения коэффициента эффективности обжатия вертикальными валками по

длине зон неустановившегося процесса прокатки.

На основе систематических натурных исследований с использованием плана эксперимента 33 (432 сляба) впервые дана количественная оценка доли влияния толщины, ширины сляба и длины дуги касания металла с валками на величину коэффициента эффективности обжатия вертикальными валками и удлинения центральных слоев полосы при последующей прокатке в горизонтальных валках, а также на длину зоны неустановившегося процесса прокатки в вертикальных валках.

3. Разработана математическая модель деформирования металла в системе

«вертикальные — горизонтальные валки», на основании которой реализованы на

ЭВМ алгоритмы расчета:

- удлинения центральных слоев полосы при обжатии сляба вертикальными

валками;

- величины продольного и поперечного коэффициентов эффективности

обжатия для зон установившегося процесса прокатки в вертикальных валках;

- длины зон неустановившегося процесса прокатки в вертикальных валках

и коэффициента эффективности обжатия вертикальными валками по длине этих

зон. По результатам замеров 3330 раскатов получены статистические зависимости

для определения формы раскатов при прокатке листов на стане 2800 по

продольной и поперечной схемам. С использованием полученных зависимостей и

установленных закономерностей формоизменения металла при прокатке в системе

"вертикальные-горизонтальные валки'' разработана и внедрена методика расчета

режимов переменного обжатия сляба в вертикальных валках для выравнивания

38

ширины раскатов при продольной схеме прокатки и выравнивания длины концов раскатов при поперечной схеме. Рассчитанные режимы переменного бокового обжатия слябов обеспечивают получение раскатов с разноширинностью не более ±20 мм (40-180 мм при прокатке по обычной технологии). Установлена и реализована возможность уменьшения продольной разнотолщинности листов путем переменного обжатия сляба в вертикальных валках.

4. Разработаны научные основы улучшения качества поверхности проката

и снижения расхода металла за счет уменьшения перехода металла с боковых

граней заготовки на основные поверхности листа. Общие закономерности

процесса перехода металла получены на основе промышленных экспериментов

с использованием предварительно запрессованных в боковые грани стержней из

нержавеющей стали на 173-х слябах. Установлено, что ширина полосок перехода

(наиболее дефектные участки раската) уменьшается: с уменьшением отношения

— при прокатке в черновой клети с горизонтальными валками; при уменьшении

неравномерности нагрева сляба и суммарного обжатия; с увеличением вытяжки при первойпротяжкесляба(ц1);суменьшениемвытяжкивпоперечныхпроходах(|12);при

увеличении отношения ^L ; при уменьшении обжатия в вертикальных валках.

Установлено также, что переход металла с боковых граней сляба на основные поверхности листа зависит от формы боковой грани сляба, задаваемого в горизонтальные валки: ширина полосок перехода при плоской поверхности боковой грани меньше, чем при выпуклой и больше, чем при вогнутой.

Полученные результаты послужили основой совершенствования технологии прокатки толстых листов на стане 2800 с целью снижения расхода металла. В частности, разработаны новые режимы нагрева слябов, уточнены режимы обжатий в черновой клети, разработаны новые калибры вертикальных валков. С учетом особенностей распределения дефектов по поверхности листов и колебаний параметров прокатки, с использованием математической статистики и теории вероятностей разработана и внедрена методика расчета оптимальной массы сляба и оптимальной условно-номинальной толщины листа при прокатке в поле минусовых допусков.

5. Создание и освоение металлосберегающих технологий в условиях стана

2800 позволило уменьшить расход металла и улучшить качество поверхности

листов, том числе:

- разработка и внедрение режимов переменного бокового обжатия слябов уменьшили расход металла на 6% (абс);

- разработка и внедрение новой калибровки вертикальных валков обеспечили улучшение качества поверхности проката, увеличение выхода годного за счет уменьшения дефектов концевых или прикромочных участков листов и снижение расхода металла на 2% (абс);

- внедрение методики расчета оптимальной массы сляба и оптимальной

условно-номинальной толщины листа при прокатке в поле минусовых допусков

39 позволило снизить расход металла на 2 % (абс.) и увеличить выход заказных листов на 2,5 %.

6 На основе общих принципов термомеханической обработки разработаны научные основы и технологии производства на маломощном стане 2800 проката с пределом текучести от 345 до 1000 Н/мм2.

Разработаны, опробованы и внедрены новые эффективные технологии: горячей прокатки с деформацией с обжатиями 12-15% за проход, обеспечивающей повышение сТ на 10-15 Н/мм2 и KCV на 10-15 Дж/см2; нормализующей прокатки, обеспечивающей существенное измельчение зерна; термомеханической прокатки; прокатки с последующим ускоренным охлаждением (при этом установлена зависимость величины ферритного зерна от размера зерна аустенита и скорости охлаждения) или закалкой с прокатного нагрева, а также для особых требований комбинации прокатки и термической обработки, что в целом обеспечивает повышение комплекса свойств проката и экономию энергоносителей.

Впервые в России разработан и внедрен режим термомеханической прокатки с мелкодробными частными обжатиями в области остановки рекристаллизации аустенита на маломощном стане 2800, обеспечивший получение в прокате толщиной до 16 мм все требования ОАО «Газпром» к металлу для труб диаметром до 1420 мм по прочности, ударной вязкости и др., включая тест ИПГ.

7. Предложена концепция создания толстолистовых сталей нового поколения с максимальным использованием разработанных термодеформационных режимов прокатки. Получили развитие металловедческие принципы создания ряда сталей с повышенным комплексом свойств. Показано, что следует добиваться максимального измельчения зерна, главным образом, за счет выбора оптимальных термодеформационных режимов прокатки, микролегирования, использования природного легирования никелем и хромом. При выплавке стали необходимо использовать технологические процессы, повышающие чистоту металла по вредным примесям и газам. В новых сталях снижено содержание углерода и легирующих элементов, за счет этого повышаются потребительские свойства и снижается себестоимость проката.

Впервые в России разработаны научные основы и создан новый подкласс материалов - строительные свариваемые стали повышенной огнестойкости, сохраняющие требуемый комплекс механических свойств до температур 600-700°С. Установлено, основными принципами создания таких сталей являются:

- использование в зависимости от требований одного, двух или трех основных

воздействий на структуру стали: наклепа феррита, формирования бейнита,

сохранение в твердом растворе определенного количества ванадия (или ниобия)

для его последующего выделения в процессе нагрева;

- минимальное содержание углерода и марганца и при повышенных

требованиях добавка молибдена.

Уточнены металловедческие принципы и впервые в России разработаны и освоены в производстве высокопрочные свариваемые стали марок 17ХГН2МФБТ

40 и 12ХГН2МА с пределом текучести до 1000 Н/мм2 повышенной износостойкости и хладострйкости, по комплексу механических свойств превосходящие общемировой уровень. Обеспечение требуемого комплекса свойств проката базировалось на следующих металловедческих положениях' легирование Мп, Сг, Ni, Mo для сквозной прокаливаемости; микролегирование V, Nb для измельчения зерна и повышения износостойкости; оптимальное содержание углерода для баланса прочности, вязкости и свариваемости; микролегирование бором при толщине листа до 50 мм; пониженное содержание вредных примесей (S, Р); новая технология термической обработки.

8. Разработанные технологии и оптимизированный химический состав

сталей позволили впервые на стане 2800 получить прокат с уникальными

свойствами, в том числе для: хладостойких труб большого диаметра класса

прочности до К60; труб повышенной эксплуатационной надежности; огнестойких

строительных конструкций; мостостроения - с уникальным сочетанием свойств;

машиностроения - высокопрочный свариваемый прокат (с пределом текучести до

1000Н/мм2)идр.

Установлено, что новые виды проката превосходят прокат из традиционных сталей аналогичного назначения: по ударной вязкости - в 2-5 раз; по коррозионной стойкости - в два раза; по огнестойкости - в два-три раза; по порогу хладноломкости - ниже на 20-40°С; по прочности - на 25%; по ударной вязкости сварного соединения - в 4 раза.

Эффективность сталей нового поколения и постоянно растущая потребность в толстолистовой стали с повышенными потребительскими свойствами обусловили освоение на ООО «Уральская Сталь» производства проката из 19 новых марок сталей. Было изготовлено более 630000 тонн высококачественного проката, использованного как в массовых, так и в уникальных конструкциях, строительство последних было бы невозможно без применения сталей нового поколения.

9. Показано, что разработанные технологии производства конкуренто-способного проката обеспечивают: экономию металла (на 8-10%, абс), энергоносителей за счет минимального использования термической обработки и применения низкотемпературных режимов нагрева под прокатку; экономию легирующих элементов путем формирования оптимальной структуры иприменения природного легирования Использование проката из сталей нового поколения у потребителя позволяет за счет высоких служебных характеристик исключить возникновение дефектов сварки и уменьшить аварийность при изготовлении металлоконструкций, сократить сроки возведения и сдачи в эксплуатацию сооружений максимум до 1—1,5 года, исключить применение защитных покрытий конструкций, повысить ресурс эксплуатации. В целом экономический эффект от внедрения результатов работы составил 5, 2 млрд руб.

10. В работе получила дальнейшее развитие теория прокатки на планетарном стане, в частности.

-разработана математическая модель деформирования металлав планетарном

41 стане с двумя и более числом пар валков, на основании которой составлены и реализованы на ЭВМ алгоритмы расчета частных абсолютных и относительных обжатий при полосовой планетарной прокатке с перекрытием двумя или более числом пар валков в зоне деформации;

- разработан и реализован на ЭВМ алгоритм расчета коэффициента

напряженного состояния и контактных нормальных напряжений для планетарной

прокатки с использованием уравнения баланса мощностей, метода разрывных

решений и экстремальных принципов теории пластичности;

- получены зависимости для расчета коэффициента напряженного состояния,

учитывающие влияние внешних осевых сил переднего подпора и заднего

натяжения и угла наклона рабочего инструмента, а также с учетом влияния

угла наклона контактной поверхности без учета влияния внешних осевых сил.

В частном случае, при у=0 и г) = 0,2-0,6, получено более точное решение для

определения коэффициента напряженного состояния в сравнении с результатами

расчета, основанного на методе линий скольжения;

- установлены закономерности влияния технологических параметров

планетарной прокатки на ее силовые параметры и на уровень механических

свойств углеродистых, низколегированных и легированных конструкционных

сталей и показаны преимущества полученного проката над произведенным по

традиционной схеме.

На основе результатов проведенного цикла работ по оценке технологических, деформационных и энергосиловых параметров процесса планетарной прокатки и разработке режимов прокатки на планетарном стане с целью дальнейшего улучшения экономических показателей производства листового проката предложено создание литейно-прокатных модулей, основанных на совмещении МНЛЗ и планетарных станов.

11. Результаты проведенной работы, сформулированные научные положения и предложенные технические решения открывают перспективы для создания новых металлургических технологий, получения металлопроката с новым сочетанием свойств, расширения марочного сортамента сталей и областей их применения в промышленности. С учетом полученных результатов разработаны научно обоснованные рекомендации по реконструкции толстолистовых станов и программа развития ООО «Уральская Сталь», предусматривающая дальнейший ввод в эксплуатацию, а также реконструкцию основного металлургического оборудования, разработку новых материалов и технологий в рамках разработанной концепции.

42

Основные результаты и положения диссертации

опубликованы в работах:

1. Шабалов И.П., Шафигин З.К. Высокопрочные хладокоррозионностойкие природнолегированные стали для газопроводных труб и строительных конструкций. - М.: Теплоэнергетик. 2002. - 208 с.

2. Шабалов И.П., Шафигин З.К. Обобщение исследований по снижению затрат при производстве толстолистовой стали на реверсивном и планетарном станах. -М: Теплоэнергетик, 2003. -304 с.

3. Шабалов И.П., Морозов Ю.Д., Эфрон Л.И. Стали для труб и строительных конструкций с повышенными эксплуатационными свойствами. -М.: Металлургиздат, 2003. - 520 с.

4. Шабалов И.П., Иванова О.В. Экспериментальные исследования процесса планетарной прокатки. Проблемы повышения уровня производства черных металлов и сплавов и улучшения качества металлопродукции. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. - М: Черметинформация, 1985. С. 53-54.

5. Иванова О.В. Шабалов И.П. Профиль опорного валка в станах типа Платцера / Проблемы повышения технического уровня производства черных металлов и сплавов и улучшения качества металлопродукции. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. - М.: Черметинформация, 1985. С. 49.

6. Шабалов И.П., Лавров И.П. Анализ тенденций развития производства горячекатаной листовой стали // НТТМ в области развития научно-технического прогресса в черной металлургии. Материалы Всесоюзной отраслевой встречи. -М: Черметинформация, 1986. С. 34-35.

7. Скорняков АН., Шабалов И.П., Иванова О.В. Исследование механических свойств углеродистых и конструкционных сталей после планетарной прокатки // НТТМ в области развития научно-технического прогресса в черной металлургии. ДСП. Материалы Всесоюзной отраслевой встречи. - Москва. 1986. -М.: Черметинформация, 1986. С. 41.

8. Тетерин П.К., Шабалов И.П., Ребеко А.Ф. и др. Определение коэффициента напряженного состояния при прокатке толстых полос с учетом наклона контактной поверхности/ Технологические особенности производства высококачественного проката и покрытий. -М.: Металлургия, 1987. С. 13-17.

9. Бернштейн М.Л., Добаткин СВ., Капуткина Л.В., Рыклина Е.П., Скорняков А.Н., Шабалов И.П Опробование ВТМО при планетарной прокатке// Изв. ВУЗов. Черная металлургия. 1988. №11. С. 98-101.

10. Тетерин П.К., Шабалов И.П., Котлобулатова О.З. Нормальные контактные напряжения при полосовой планетарной прокатке // Теоретические проблемы прокатного производства. Тез. докл. IV Всес научно-технической конференции, г. Днепропетровск, ноябрь 1988. С. 45.

11. Тетерин П.К., Иванова О.В., Скорняков А.Н., Шабалов И.П. Силовое

43 взаимодействие смежных рабочих валков при прокатке на планетарных станах типа Сендзимира // Известия Вузов. Черная металлургия. 1988. №5. С. 67-70.

12. Симонов В.П., Винокуров Ч.В., Данилович Ю.А., Скорняков А.Н., Шабалов И П., Тетерин П К. Опытно-промышленный металлургический модуль «выплавка - разливка - прокатка» // Непрерывные металлургические процессы. Тез докл на Всесоюзной научно-технической конференции сен. 1989. -М., 1989. С. 5-6

13. Шабалов И.П., Деев А.И. Технологические процессы производства горячекатаного полосового проката с использованием тонкослябовых УНРС и низкотемпературной прокатки // Тез. докл. засед. науч. сов. ГКНТ СССР «Новые процессы в черной металлургии» АН СССР. Институт металлургии, ЦНИИЧермет. -М. 1990. С. 1-2.

14. Молотилов Б.В., Шабалов И.П., Деев А.И. Тенденция развития литейно-прокатных агрегатов // Сталь. 1991. № 6. С. 71-75.

15. Листопад В.И., Следнев В.П., Шабалов И.П. и др. Способ прокатки. А.С. №1784293. Бюл. №48, 1992.

16. Лебедев В.И., Богатырев Ю.П., Шабалов И П. и др. Способ непрерывного получения листов. Патент РФ №2041019. Бюл. №22, 1995.

17. Лебедев В.И., Богатырев Ю.П., Шабалов И.П. и др. Способ непрерывного получения металлических листов. Патент РФ №2041020. Бюл. №22,1995.

18. Лебедев В.И., Евтеев Д.П., Шабалов И.П. и др. Способ обжатия непрерывнолитых плоских слитков в твердожидком состоянии. Патент РФ № 1677927//Бюл. №21, 1995.

19. Лебедев В.И., Евтеев Д.П., Шабалов И.П. и др. Способ непрерывной разливки плоских слитков. Патент РФ № 2038897// Бюл. №19, 1995.

20. Лебедев В.И., Евтеев Д.П., Шабалов И.П. и др. Способ непрерывной разливки плоских слитков Патент РФ № 2038896// Бюл. №19, 1995.

21. Одесский П. Д., Ларионов В.П., Шабалов И.П. и др. Стали нового поколения повышенной и высокой прочности производства ОАО «НОСТА» (ОХМК) для сварных металлических конструкций. МиТОМ, 2003. №10. С. 3-8.

22. Одесский П.Д., Шабалов И.П., Кулик Д.В., Кокота И.И. Стали нового

поколения производства ОАО «НОСТА» (ОХМК) для сварных металлических

конструкций ответственного назначения// Монтажные и специальные работы в

строительстве. 2003. №1. С. 20-24.

23.Кулик Д.В., Одесский П.Д., Шабалов И.П. Требования к прокату для металлических конструкций. - М.: ООО «ЧТЕАРТ». 2003. - 56 с.

24. Одесский П.Д., Кулик Д.В., Соловьев Д.В., Шабалов И.П. Новые стали для ответственных строительных металлических конструкций // Монтажные и специальные работы в строительстве. 2003. № 12. С. 2-4.

25. Шабалов И.П. Задачи разработки и освоения нового поколения трубных сталей с учетом перспектив развития газонефтепроводных систем России // Металлоснабжение и сбыт. 2003. № 12. С. 34.

26. Шафигин Р.З., Шабалов И.П. Повышение конкурентоспособности

44 российской трубной продукции на международном рынке // Металлург. 2004. №З.С. 7-8.

27. Одесский П. Д, Кулик Д.В., Шабалов И.ГТ. Оценка прочности неоднородных структур. Тез. докл. П-ой Евразийской научно-практической конференции. М., апрель 2004 г. МИСиС. 2004. С. 10.

28. Шабалов И.П. Термомеханическое и термическое упрочнение стали для металлических конструкций.- М.: Металлургиздат. 2004. - 64 с.

29. ОдесскийП. Д., Кулик Д.В., Шабалов И.П. Создание наУрале сталей нового поколения для металлических конструкций // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов. Тез докл. XVII Уральской школы металловедов-термистов, г. Киров, февраль 2004 г. Вятский государственный университет. 2004. С. 157.

30. Шабалов И П. Исследование формоизменения полос при прокатке полосы с обжатиями в вертикальных и горизонтальных валках // Производство проката. 2004. №7. С. 3-13.

31. ШабаловИ.П. Исследование формообразованияраскатов натолстолистовом стане 2800 // Производство проката. 2004. №8. С. 3-8.

32. Шабалов И.П. Промышленное исследование перехода металла с боковых граней сляба на основные поверхности листа // Производство проката. 2004. № 9. С. 3-12.

33.Одесский П.Д.,МорозовЮ.Д.,Шабалов И.П. идр.Разработкасталейнового поколения дляметаллическихконструкцийикомплекснойтехнологиипроизводства проката в условиях ОАО «НОСТА» (ОХМК) // Технология металлов. 2004. №1. С. 8-13.

34. Кулик Д.В., Одесский П.Д., Шабалов И.П. Требования к прокату для металлических конструкций. Часть 1. Анализ стандартов на прокат для металлических конструкций. Сообщение 1 // Технология металлов. 2004. №7. С. 8-13.

35. Кулик ДВ., Одесский ПД., Шабалов И.П. Требования к прокату для металлических конструкций. Часть 1. Анализ стандартов на прокат для металлических конструкций. Сообщение 2 //Технология металлов. 2004. №8. С. 8-11.

36. Кулик Д.В., Одесский П.Д., Шабалов И.П. Требования к прокату для металлических конструкций. Часть II. Общие требования к прокату. Требования к механическим свойствам на растяжение. // Технология металлов. 2004. №9. С. 8-14.

37. Кулик Д.В., Одесский ПД., Шабалов И.П. Требования к прокату для металлических конструкций. Часть Ш. Требования по ударной вязкости, сопротивлению переменным нагрузкам и атмосферной коррозии //Технология металлов. 2004. №10. С. 6-11.

38. Кулик Д.В., Одесский П.Д., Шабалов И.П. Требования к прокату для металлических конструкций. Часть IV. Требования по свариваемости// Технология металлов. 2004. № 11 .С. 8-11.

45

39. Кулик Д.В., Одесский П.Д., Шабалов И.П. Требования к прокату для металлических конструкций. Часть V. Особенности требований к прокату проектировщиков и изготовителей конструкций. Случай эксплуатации в экстремальных условиях // Технология металлов. 2004. №12. С. 11-16.

40. Одесский П Д., Кулик Д.В., Шабалов И.П. Применение в металлических конструкциях листов больших толщин, упрочненных на станах. Международная научно-техническая конференция «Теория и технология процессов пластической деформации». 2004. Тезисы докладов. Минск - Москва, 26-27 октября, 2004, -217с.

41. Одесский П.Д., Рудченко А.В., Шабалов И.П. Термомеханическое и термическое упрочнение строительных сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 2005. №3. С.34-43.

42. Кулик Д.В., Одесский П.Д., Шабалов И.П. Требования к прокату для металлических конструкций. Часть VI. Требования, связанные с деградацией свойств сталей для металлических конструкций // Технология металлов. 2005. №1.С. 11-17.

46

47

Подписано в печать 21.11.05. Формат 60x84 1/16

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 2,0

Тираж 100 экз. Заказ №325

Отпечатано в ООО «Графике В»

103030, Москва, ул.Долгоруковская, д. 33

»24067

РНБ Русский фонд

2006-4 26184