

На правах рукописи



ЛИМАНКИН ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ ПРОКАТКИ НА МЕЛКОСОРТНО – ПРОВОЛОЧНОМ СТАНЕ
320/150 С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА**

Специальность 05.16.05 Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург, 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина».

Научный руководитель

- доктор технических наук, профессор
ШИЛОВ Владислав Александрович.

Официальные оппоненты:

- ЛЕХОВ Олег Степанович
доктор технических наук,
профессор, ФГАОУ ВПО
«Российский государственный
профессионально-педагогический
университет», заведующий кафедрой
механики;
- СМИРНОВ Сергей Витальевич
доктор технических наук, ст.науч.сотр.,
ФГБУН Институт машиноведения
УрО РАН, заместитель директора.

Ведущая организация:

- ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский
государственный университет» (на-
циональный исследовательский уни-
верситет)

Защита диссертации состоится «05» апреля 2013 г. в 15⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д212.285.04 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 28, 3-й учебный корпус, ауд. МТ-329.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Автореферат разослан «27» февраля 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Л.А.МАЛЫЦЕВА

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В России, как и во всем мире, несмотря на экономический кризис 2008 г. наблюдается рост объемов производства и потребления сортового проката. В настоящее время наиболее востребованным видом сортового проката остается прокат мелких и средних сечений. При этом потребление таких профилей превышает, и по прогнозу будет превышать их производство, что приводит к необходимости их импорта. Поэтому одной из актуальных задач, стоящих перед отечественной черной металлургией, является интенсификация прокатного производства на основе разработки и освоения новых высокоэффективных технологических процессов, обеспечивающих рост объемов производства, снижение материально-энергетических затрат по переделу. Отмеченные тенденции развития и структура отечественного сортопрокатного производства характерны и для ОАО «Амурметалл», имеющего в своем составе мелкосортно-проволочный стан 320/150.

Увеличение объемов производства на этом стане является объективной необходимостью в связи с высокой себестоимостью проката, что снижает конкурентоспособность продукции. Одна из причин высокой себестоимости и финансовой неустойчивости предприятия – высокая доля заемных средств. Для увеличения производительности стана необходим поиск резервов интенсификации производства за счет рационализации и оптимизации калибровок валков и технологических режимов прокатки при одновременном снижении расходов по переделу.

При разработке оптимальных технологических процессов производства проката все большее значение приобретает их компьютерное моделирование с помощью специального программного обеспечения. Для этого необходимо иметь научно обоснованные математические модели процессов.

Сказанное обусловило проведение настоящего исследования.

Работа выполнялась по госбюджетной и хоздоговорной тематике Уральского политехнического института (позже УГТУ-УПИ, УрФУ), в соответствии с планами и приказами по научно-техническому развитию завода «Амурметалл» и связана с выполнением Федеральной программы по развитию Дальнего Востока.

Цель диссертационной работы: на основе современных средств компьютерного моделирования и методов исследования операций получить научно обоснованные технологические разработки по оптимизации процессов прокатки, направленные на повышение производительности и экономию материально-энергетических ресурсов при производстве мелкосортных профилей на мелко-сортно-проволочном стане 320/150.

Научную ценность диссертации составляют следующие разработки:

- методика и результаты исследования изменения плотности металла при прокатке профилей из непрерывнолитой заготовки;
- методика и результаты исследования характера деформированного состояния металла при прокатке в калибрах простой формы;
- закономерности формирования зеренной структуры металла при прокатке профилей из непрерывнолитой заготовки в зависимости от величины накопленной деформации;
- закономерности течения металла в открытых прямополочных угловых калибрах;
- математическая модель и методика расчета формоизменения металла в открытых прямополочных угловых калибрах;

Практическую ценность представляют следующие результаты диссертации:

- данные о структуре металла исходной заготовки, в частности о заporоченности ее внутренними дефектами, и изменении в процессе прокатки;
- рабочие калибровки валков для прокатки равнополочной угловой стали от №2 до №5, обеспечивающие устойчивую прокатку и получение готового проката, отвечающего требованиям ГОСТ 8509–93;
- оптимальные по быстродействию технологические режимы прокатки всех профилей сортамента стана, позволившие увеличить среднюю часовую производительность стана на ~14 % и получить суммарный экономический эффект 12 млн. рублей (в ценах 2008 г.), за счет увеличения часовой производительности стана и снижения себестоимости продукции;
- научное обоснование реконструкции привода чистовой клетки стана, позволившей увеличить скорость прокатки арматурных и круглых профилей имеющих массу погонного метра от 2 до 3,85 кг, что позволяет довести производительность стана до ~79 т/ч;
- научное обоснование увеличения сечения квадратной исходной непрерывнолитой заготовки на стане до 140×140 мм вместо применяющейся заготовки 125×125 мм, что позволит увеличить производительность стана и машин непрерывного литья заготовок.

Результаты выполненных исследований могут быть использованы в инженерной практике при разработке оптимальных технологических режимов прокатки сортовой стали на любом действующем мелкосортном прокатном стане.

Реализация результатов работы ^{*)}.

Разработанные калибровки валков и оптимальные температурно-скоростные режимы прокатки угловой, круглой, арматурной стали и катанки внедрены на мелкосортно-проволочном стане 320/150 ОАО «Амурметалл».

Экономический эффект, полученный от реализации указанных разработок за счет увеличения часовой производительности стана и снижения условно-постоянных расходов по переделу, составил 219,57 тыс. руб. (в ценах 1990 г.) и превысил 12 млн. руб. (в ценах 2008 г.), что подтверждено экономическими расчетами и актами внедрения.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы были доложены и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

Всесоюзной конференции прокатчиков «Новые технологические процессы прокатки как средство интенсификации производства и повышения качества продукции»: - Челябинск, 1989. Международной научно-технической конференции «Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов»: - Санкт-Петербург, 2007. На семинаре НПО «МАШПРОМ» - Екатеринбург, 2009. VIII Конгрессе прокатчиков: - Магнитогорск, 2010. Международной конференции «Форсированное индустриально-инновационное развитие в металлургии»: - Алматы, 2010. Научно-практическая конференция к 80-летию ОАО «УИМ» «Новые технологии и материалы в металлургии» - Екатеринбург, 2010. Научно-практическая конференция к 85-летию Уралгипромеза «Новые проекты и технологии в металлургии» - Екатеринбург, 2010. Научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР»: - Екатеринбург, 2011. I Международной интерактивной научно-практической конференции «Инновации в материаловедении и металлургии»: - Екатеринбург, 2012.

^{*)} Автор выражает глубокую признательность специалистам ОАО «Амурметалл» за содействие во внедрении результатов диссертационной работы.

Комплекс научных и промышленных исследований по разработке и внедрению оптимальных технологических режимов прокатки сортовых профилей и катанки на мелкосортно-проволочном стане 320/150 ОАО «Амурметалл» отмечен дипломом лауреата международной выставки Металл-Экспо (г.Москва, 2008 г.), серебряной медалью международной выставки-конгресса «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции»(г. С.-Петербург, 2009 г.), серебряной медалью IX московского международного салона инноваций и инвестиций (г. Москва, 2009 г.).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражено в 15-ти статьях, в том числе 6 статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и пяти приложений; изложена на 183-х страницах машинописного текста, иллюстрирована 67-ю рисунками и 27-ю таблицами; библиографический список включает 126 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы и краткое содержание диссертационной работы.

В первой главе рассмотрено состояние вопроса и сформулирована цель и задачи исследования.

В настоящее время производство и потребление на мировом и российском рынках сортового проката достаточно устойчиво растет. При этом наиболее востребованным видом сортового проката остаются профили мелких и средних сечений с массой погонного метра до 6-10 кг и катанка. Потребление таких профилей в России превышает их производство. Сократить дефицит сортопрокатной продукции можно за счет увеличения объемов выпускаемой продукции на действующих прокатных станах. Сказанное характерно и для ОАО «Амурметалл» (г. Комсомольск на Амуре), имеющего в своем составе мелкосортно-проволочный стан 320/150 (рис. 1). Сортамент продукции стана включает круглый прокат диаметром 10-40 мм из углеродистых марок стали; арматурные периодические горячекатаные профили диаметром 10-32 мм из низколегированной стали и термомеханически упрочненные арматурные профили из углеродистых марок стали; равнополочные уголки с шириной полки 25-50 мм и толщиной полки 3-6 мм из углеродистой

стали, а также катанку и круглую сталь в бунтах. В последние годы производительность стана находится на уровне 380-400 тыс. т проката в год (проектная 500 тыс. т в год).

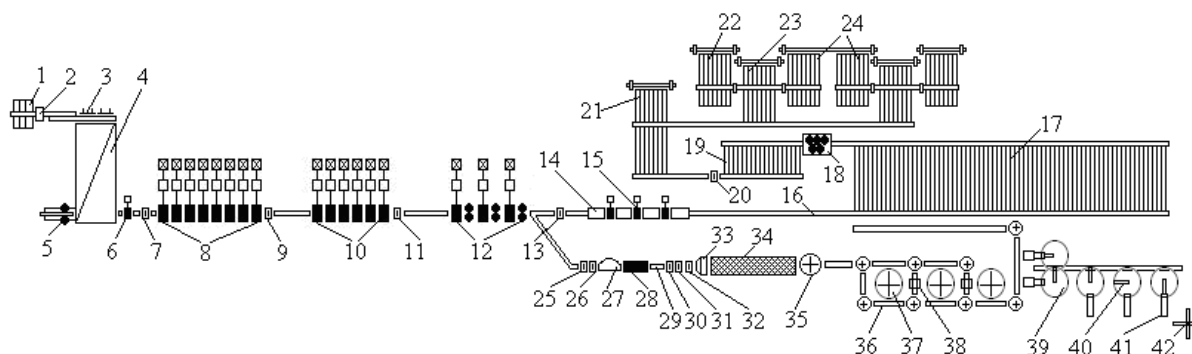


Рис. 1. Схема расположения технологического оборудования мелкосортно-проволочного стана 320/150: 1-загрузочная решетка; 2-кантователь; 3-втлквиватель; 4-нагревательная печь; 5-вытлквиватель; 6,15-трайб-аппараты; 7-разрывные ножницы; 8-черновая группа клетей 500/400; 9,11-кривошипные ножницы №51 и №52; 10-промежуточная группа клетей 360; 12-чистовая группа клетей 320; 13-кривошипно-эксцентриковые ножницы №53; 14-участок ускоренного охлаждения; 16-рольганг; 17-холодильник; 18-роликоправильная машина; 19-транспортер; 20-ножницы холодной резки; 21-пакетирующее устройство; 22,23,24-штабелирующие устройства; 25,26-кривошипно-эксцентриковые ножницы; 27-петлерегулятор; 28-десяतिकлетевой проволочный блок 215/170; 29-установка водяного охлаждения; 30,31-калибровочные ножницы; 32-отходокрошитель; 33-виткоукладчик; 34-участок воздушного охлаждения; 35-виткосборник; 36-конвейер; 37-опрокидыватели; 38-уплотнение и увязка бунтов; 39-устройство для передачи бунтов; 40-съемник бунтов; 41-транспортер; 42-бунтопакетировочная машина

Для стана 320/150 ОАО «Амурметалл» увеличение производительности является объективной необходимостью в связи с высокой себестоимостью проката, вызванной дорогим топливом и электроэнергией, что снижает конкурентоспособность продукции. В таких условиях технологические режимы прокатки должны быть направлены не только на увеличение производительности стана, но и на экономное расходование материально-энергетических ресурсов, то есть быть оптимальными.

Технологический процесс прокатки является достаточно сложной технической системой. Поэтому характерной особенностью современных способов расчета калибровок валков и оптимальных технологических параметров прокатки является моделирование технологических процессов на компьютере. В области сортовой прокатки известны работы в этом направлении зарубежных ученых У.Суппо, Ф.Крочека, К.Томаса и других, отечественных исследователей М.Л.Зайцева, В.С.Берковского, В.Б.Шишко, В.К.Смирнова, В.А.Шилова, Ю.В.Инатовича и других, труды УкрНИИМЕТа, ДонНИИЧЕРМЕТа, ЦНИИЧЕРМЕТа, МИСИСа и УГТУ-УПИ. Достаточно надежный

программный комплекс, представляющий собой экспертную систему (ЭС) автоматизированного анализа, проектирования и оптимизации технологических процессов сортовой прокатки разработан в Уральском федеральном университете (УПИ, УГТУ-УПИ).

ЭС «Технология сортовой прокатки» позволяет решать широкий круг задач моделирования и диагностики действующих и проектирования новых технологических процессов прокатки. Комплексная математическая модель ЭС позволяет рассчитывать формоизменение металла и энергосиловые параметры для любой системы калибров простой формы. Для схем прокатки, включающих калибры, форма которых отличается от обычной формы калибров простой формы, система расчетов предусматривает определение энергосиловых параметров по методу В.С.Смирнова. При этом фасонные калибры и раскаты заменяются соответственными прямоугольными по методу А.Ф.Головина или М.В.Врацкого, что можно отнести к недостатку описанной математической модели.

Кроме того, ЭС позволяет решать задачи оптимизации технологических режимов сортовой прокатки по критериям

-производительность прокатанного стана $\Pi \rightarrow \max$;

-расход электроэнергии на прокатку $Q_э \rightarrow \min$;

-удельный расход валков $Q_в \rightarrow \min$;

-расход топлива на нагрев заготовки $Q_т \rightarrow \min$;

-комплексный критерий, выражающий часть затрат на производство тонны проката

$$W = C_э Q_э + C_т Q_т + C_в Q_в,$$

где $C_э$, $C_т$ и $C_в$ - цены на электроэнергию, топливо и валки соответственно.

Состояние оптимизируемого процесса в каждом i -ом проходе для различных систем калибров определяется с учетом ограничений по прочности оборудования рабочих клетей, по степени загрузки электродвигателей привода клетей, по скоростному режиму работы стана, по условиям захвата и устойчивости раскатов, по производительности нагревательной печи.

Достаточно высокая точность расчета параметров процесса прокатки при применении ЭС «Сортовая прокатка» подтверждается экспериментальными иссле-

дованиями, в частности и в условиях стана 320/150.

На основе проведенного аналитического обзора сформулирована цель диссертационного исследования и определены задачи, необходимые для её достижения:

– провести исследование деформированного состояния непрерывнолитого металла исходной заготовки в процессе прокатки и его влияния на качество готового проката;

– разработать научно обоснованные математические модели расчета калибровок валков для прокатки угловой стали, учитывающие закономерности течения металла в угловых калибрах. На основе полученных моделей разработать методику расчета калибровок валков для прокатки угловых профилей на мелкосортных станах;

– по разработанной методике спроектировать калибровки валков для угловой стали характерных размеров, прокатываемых на мелкосортно-проволочном стане 320/150 завода «Амурметалл». Путем компьютерного моделирования процесса прокатки угловой стали по разработанным калибровкам валков определить оптимальные технологические режимы по критериям быстродействия и экономии материально-энергетических ресурсов;

– с применением ЭС «Технология сортовой прокатки» выполнить анализ действующих технологических режимов прокатки профилей основного сортамента стана 320/150 с целью выявления резервов интенсификации и повышения эффективности производства. Оптимизировать калибровки валков и режимы прокатки по критерию быстродействия;

– внедрить разработанные оптимальные технологические режимы на мелкосортно-проволочном стане 320/150 ОАО «Амурметалл».

Во второй главе приведены результаты исследования состояния металла в процессе прокатки на стане 320/150.

Удобным критерием количественной оценки поврежденности металла внутренними дефектами сплошности является его плотность. Поэтому было проведено исследование изменения в процессе прокатки плотности металла непрерывнолитой исходной заготовки квадратного сечения со стороной 125 мм. Для исследования изменения плотности был применен метод гидростатического взвешивания. На рис. 2 показаны тренды

изменения средней плотности по сечению полосы в зависимости от суммарного коэффициента вытяжки λ_{Σ} и номера клетки.

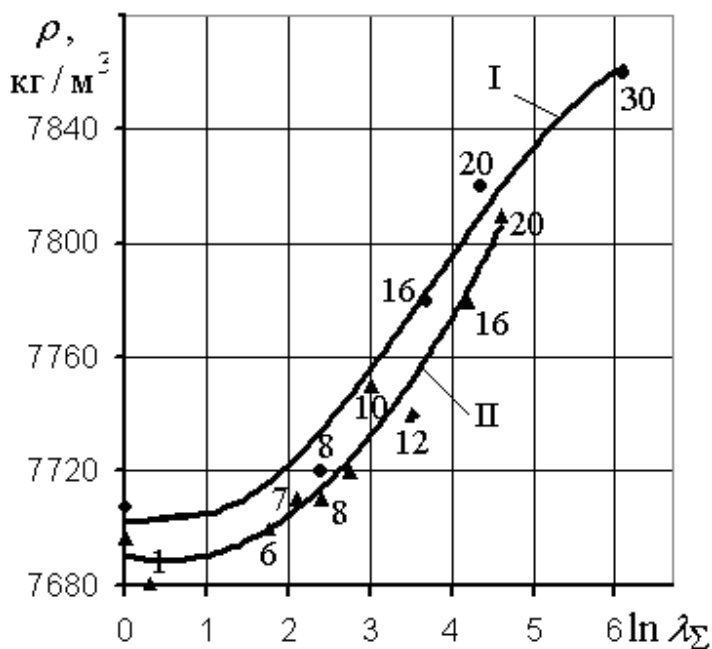


Рис. 2. Тренды изменения средней плотности металла при прокатке катанки диаметром 6,5 мм (I) и арматурной стали №14 (II) (1-30 – номера рабочих клеток)

Установлено, что средняя плотность металла по сечению непрерывнолитой квадратной заготовки составляет 7700 ± 10 кг/м³ и мало зависит от марки стали. Низкая плотности металла объясняется наличием центральной рыхлости, повышенным содержанием газов и внутренними окисленными трещинами. Характер изменения плотности металла на стане во многом определяется величиной накопленной деформации (см. рис. 2).

Полученные результаты позволили сделать вывод, что плотность металла профилей с площадью поперечного сечения 150-200 мм² ($\varnothing 14$ мм - $\varnothing 16$ мм) и больше, прокатываемых из непрерывнолитой заготовки $\square 125$ мм, ниже требований стандартов. Одним из способов повысить эффективность режимов деформации раската с точки зрения увеличения его плотности является применение определенного закона его кантовок в черновой группе клеток. С применением торсионного пластометра были проведены три серии опытов: первая заключалась в одностороннем закручивании образцов, вторая - в циклическом знакопеременном деформировании с постоянной амплитудой угла закручивания; третья - включала симметричное знакопеременное кручение с постоянной амплитудой угла закручивания. Для каждого образца рассчитывали накопленную степень деформации сдвига $\Lambda = \sum_i \text{tg} \beta_i$, где β - угол закручивания; i - число циклов закручивания при знакопе-

ременной деформации. Плотность металла после деформации определяли методом гидростатического взвешивания. Данные экспериментов, показанные на рис. 3, свидетельствуют, что интенсивность изменения плотности металла в случае одностороннего закручивания заметно выше, чем при знакопеременном кручении.

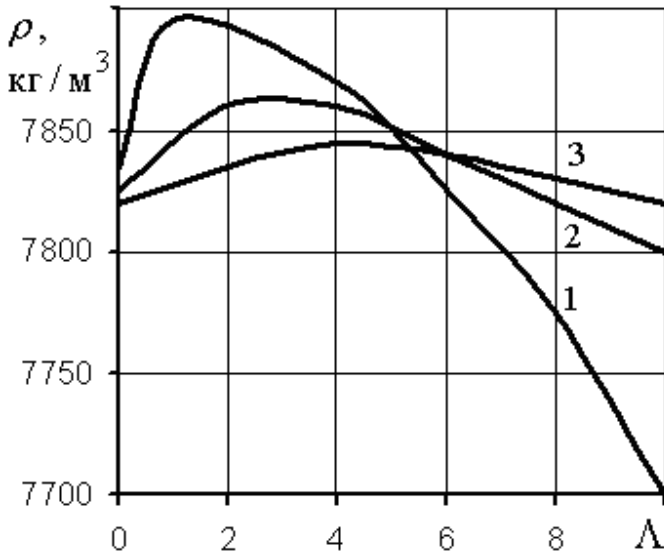


Рис. 3. Тренды зависимости плотности стали марки 35ГС от степени деформации и схемы горячего пластического кручения: 1 – кручение в одну сторону; 2 – циклическое знакопеременное кручение; 3 – симметричное циклическое знакопеременное кручение

Такой вывод был использован в практических целях: предложено производить все кантовки раската в черновой группе клетей против часовой стрелки относительно направления прокатки. Увеличение числа кантовок в черновой группе клетей в одном направлении с 3-х до 6-ти, обеспечило дополнительную деформацию металла при скручивании в пределах 8-10 % и прирост плотности готового проката на 0,55 %.

В работе выполнено экспериментально-теоретическое исследование деформированного состояния металла непрерывнолитой исходной заготовки при прокатке в черновой группе клетей. Сначала моделировали процесс прокатки в лабораторных условиях на стане 130 в масштабе 1:4. Прокатывали сборные образцы с нанесенной внутри квадратной координатной сеткой с шагом 2 и 1,5 мм. После прокатки и разборки образцов исходная и деформированная координатные сетки фотографировались с одинаковым увеличением в 10 раз. С фотографий снимались размеры начальной (a_0 и b_0) и конечной (a_1 и b_1) сетки. Общая погрешность определения информации об изменении координатной сетки не превышала 5 %. Затем информацию о координатах каждого узла до и после деформации обрабатывали с помо-

щью специальной компьютерной программы, алгоритм которой базируется на соотношениях теории конечных деформаций. Вычисляли компоненты тензора результирующего деформирования в представлении Лагранжа (тензор Грина):

$$\hat{\varepsilon}_{x'x'} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{a_1}{a_0} \right)^2 - 1 \right], \quad \hat{\varepsilon}_{y'y'} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{b_1}{b_0} \right)^2 - 1 \right], \quad \hat{\varepsilon}_{x'y'} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{a_1}{a_0} \frac{b_1}{b_0} \right) \cos \alpha \right], \quad (1)$$

где α - угол между отрезками a_1 и b_1 после деформации. Далее вычисляли главные компоненты тензора Грина

$$\hat{\varepsilon}_{ii} = \frac{\hat{\varepsilon}_{x'x'} + \hat{\varepsilon}_{y'y'}}{2} \pm \sqrt{\left[\left(\frac{\hat{\varepsilon}_{x'x'} + \hat{\varepsilon}_{y'y'}}{2} \right)^2 + \varepsilon_{x'y'}^2 \right]}, \quad i=1,2 \quad (2)$$

и осуществляли переход к главным логарифмическим деформациям

$$\varepsilon_i = \frac{1}{2} \ln \left(1 + 2 \hat{\varepsilon}_{i'i'} \right), \quad i=1,2. \quad (3)$$

Третью главную логарифмическую деформацию в направлении нормали к плоскости нанесения сетки определяют из условия несжимаемости $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$.

Так как направление главной оси z совпадает с нормалью плоскости сетки, то принимая гипотезу плоских сечений, считали, что $\hat{\varepsilon}_{yz} = \hat{\varepsilon}_{xz} = 0$. С помощью соотношения

$\operatorname{tg} 2\theta_1 = -2 \hat{\varepsilon}_{xy} / \left(\hat{\varepsilon}_{xx} - \hat{\varepsilon}_{yy} \right)$ определяли направление главных осей, где θ_1 - угол между начальным направлением оси x и осью x' . В качестве меры деформации в ячейке приняты интенсивность деформации ε и интенсивность деформации сдвига Λ :

$$\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_2^2}, \quad \Lambda = \sqrt{3} \varepsilon_i. \quad (4)$$

В качестве примера на рис. 4 показаны результаты исследования деформированного состояния в ящичном калибре первой клетки стана. Прокатка в первых клетях черновой группы особенно выделяется низкой деформационной проработкой осевой зоны заготовки. Так, величины показателей деформации в центре заготовки и

на контактной поверхности могут различаться больше, чем в 2 раза.

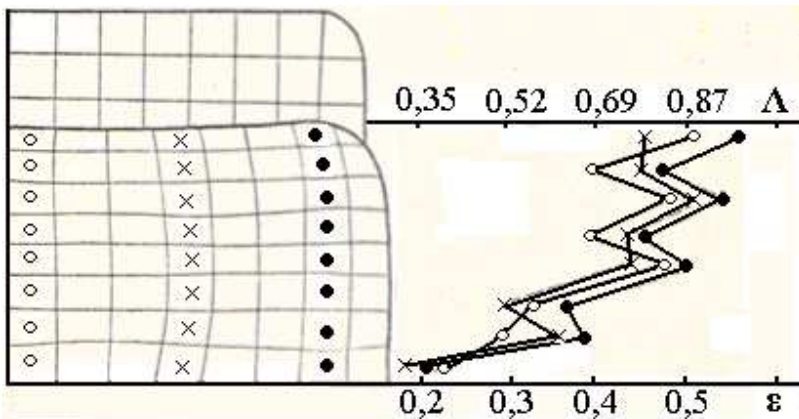


Рис. 4. Распределение накопленной деформации по поперечному сечению полосы при прокатке в клетях 1 (показана четвертая часть полосы, специальными знаками отмечены ряды ячеек для которых построены эпюры распределения Δ и ϵ)

На этом фоне предпочтительней выглядит система калибров овал-ребровой овал, которая применяется в последних клетях черновой группы. При прокатке металла в овальных калибрах имеет место более равномерное распределение степени деформации по объему полосы.

Для оценки качества формируемого профиля при прокатке из сортовых непрерывнолитых заготовок на стане 320/150 важно иметь правильные представления о структуре исходной заготовки и структуре катаного металла по клетям стана. С этой целью были отобраны непосредственно на стане от полосы, принадлежащей одной заготовке темплеты при прокатке катанки диаметром 6,5 мм из стали марки СтЗсп и профиля для армирования железобетонных конструкций №14 из стали марки 35ГС. Методика металлографического исследования основывалась на ГОСТ 10243-75. Были рассмотрены вопросы микроструктурного анализа и количественной металлографии, которые выполнены с помощью структурного анализатора изображений «EPIQUANT».

Проведенное металлографическое исследование изменения структуры непрерывнолитого металла в процессе деформации позволило выявить следующие основные закономерности:

- исходная заготовка имеет высокую степень запороченности внутренними дефектами, такими как осевая пористость, газовые пузыри и горячие трещины, а также нестабильность исходной зеренной структуры по сечению;
- основное формирование структуры металла за счет деформации происходит в клетях черновой группы, при этом окисленные поверхности не свариваются под дей-

ствием деформации и возможен выход пористости на готовом профиле; в результате имеет место несоответствие прокатанного металла из-за низкого качества исходной заготовки требованиям ГОСТ 14085-79 по макроструктуре катаной стали.

- прокатный передел с действующим технологическим режимом прокатки обеспечивает получение мелкозернистой однородной структуры по сечению готовых профилей и выкатываемость негрубых дефектов сплошности непрерывнолитой стали.

На рис. 5 показан характер изменения среднего размера аустенитного зерна \bar{d} непрерывнолитой стали в процессе прокатки в зависимости от величины суммарного коэффициента вытяжки λ_{Σ} .

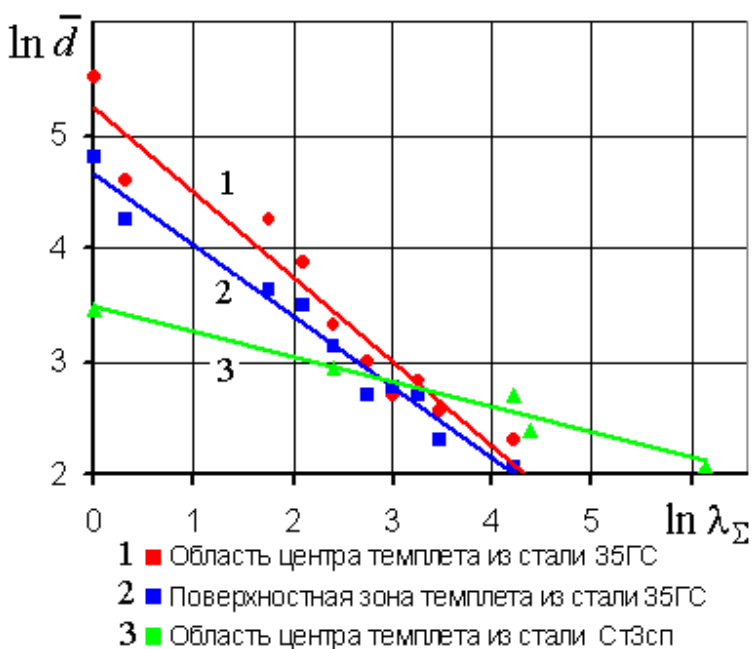


Рис. 5. Логарифмическая зависимость среднего размера аустенитного зерна от суммарного коэффициента вытяжки

Как видно из рис. 5, в процессе прокатки по мере накопления суммарного коэффициента вытяжки происходит измельчение зерна первичного аустенита. Причем интенсивность измельчения по отношению к λ_{Σ} убывает. При прокатке катанки $\varnothing 6,5$ мм с $\lambda_{\Sigma}=460$ ($\ln \lambda_{\Sigma}=6,1$) и профиля №14 с $\lambda_{\Sigma}=68,1$ ($\ln \lambda_{\Sigma}=4,2$) средний размер зерна практически одинаков и составляет $\sim 7,5$ мкм ($\ln \bar{d} \approx 2$).

Для прогнозирования зеренной структуры металла профилей, прокатываемых на стане 320/150, с помощью пакета Microsoft Excel был проведен регрессионный анализа опытных данных по изменению величины \bar{d} в зависимости от λ_{Σ} . В результате получены уравнения регрессии общего для различных случаев прокатки вида:

$$\bar{d} = \exp\left(C_0 \lambda_{\Sigma}^{-C_1}\right), \quad (5)$$

где C_0 и C_1 - коэффициенты регрессии, зависящие от условий прокатки. Например, при прокатке катанки $C_0=3,541$, $C_1=0,084$. Оценка коэффициентов множественной корреляции $R_{y,x}$ и коэффициентов регрессии C_0 , C_1 для этих уравнений показала, что они статистически значимы, а полученные уравнения регрессии – адекватны.

Результаты исследований позволяют сделать вывод, что с точки зрения улучшения свойств и структуры профилей, прокатываемых из непрерывнолитого металла, целесообразно увеличить суммарную деформацию при прокатке, например, увеличив сечение непрерывнолитой заготовки. Размеры сечения исходной заготовки на стане лимитируются тремя основными факторами: допустимым диапазоном скоростей вращения валков, энергосиловой нагрузкой линий приводов и захватывающей способностью валков. В диссертации показано, что с учетом этих ограничений сечение квадратной исходной заготовки на стане может быть увеличено до размеров 140×140 мм. Это позволит увеличить деформацию (суммарную вытяжку) в черновой группе на 12,5 %, производительность стана в зависимости от прокатываемого профиля на 0,2-2 %, МНЛЗ – на 25%.

В третьей главе описаны результаты экспериментального исследования формирования металла при прокатке в угловых открытых прямополочных калибрах.

Фирмой СКЭТ (ГДР), которой изготовлен стан, были предложены пусковые калибровки валков для прокатки угловой стали в закрытых калибрах с развернутыми по радиусу полками. Основным недостатком таких калибров следует признать их малую универсальность, возможность переполнения их металлом, повышенным износом валков и увеличенным расходом электроэнергии на деформацию. Поэтому было решено разработать новую рабочую калибровку валков с применением открытых прямополочных калибров.

Вопросам расчета калибровок валков для прокатки угловой стали посвящены работы А.П. Виноградова, И.И. Кучко, А.Ф. Головина, А.П. Чекмарева, Б.П. Бахтинова, Д.И. Старченко, М.М. Штернова, И.М. Кочетова, И.Я. Тарновского, Б.М. Илюковича, А.Н. Скороходова, В.К.Смирнова, В.А.Шилова и других ученых. Однако в литературе отсутствуют рекомендации по расчету калибровок валков угловой стали с применением открытых прямополочных калибров. В настоящей работе было проведено исследование с

целью создания методики расчета калибровок валков с использованием таких калибров.

Закономерности прокатки в угловых открытых прямополочных калибрах изучали на основе обобщения накопленного производственного опыта с помощью методов математической статистики. Для описания формоизменения металла в этих калибрах приняли следующие безразмерные параметры (рис. 6): $\beta = l/l'$ – коэффициент уширения полки профиля по средней линии (l и l' – длина средней линии полки соответственно после и до прохода); $1/\eta = h'/h$ – коэффициент обжатия полки профиля в проходе (h' и h – толщина полки профиля до и после прохода); $1/\eta_\Sigma = h_0/h_1$ – суммарный коэффициент обжатия в прямополочных калибрах (h_0 – толщина подката для прямополочных калибров, h_1 – толщина полки готового профиля); $\text{tg}\varphi$ – тангенс угла сгибания полки профиля в проходе; $n_{\text{ку}}$ – количество прямополочных калибров.

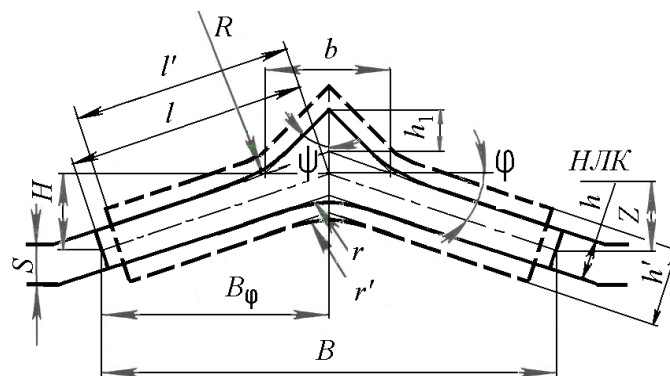


Рис. 6. Схема прокатки в угловых открытых прямополочных калибрах

С целью получения уравнений регрессии для определения указанных параметров было проведено пассивное экспериментальное исследование действующих калибровок валков мелкосортных станов при прокатке равнополочной угловой стали. По каждому безразмерному параметру $n_{\text{ку}}$, β , $1/\eta$, $1/\eta_\Sigma$, $\text{tg}\varphi$ составляли статистические выборки, в которые включали в качестве независимых переменных номер уголка N , порядковый номер углового калибра против направления прокатки $N_{\text{ку}}$, приведенный диаметр валков чистой клетки $A = D_*/h_1$, где ($D_* = D_0 - h_1$), D_0 – межосевое расстояние валков; а также другие безразмерные параметры очага деформации, которые, по

предположению, могли оказывать влияние на исследуемый параметр. Число опытных точек в выборках составляло в зависимости от исследуемого параметра 32 – 115. Выборки обрабатывали с применением программ корреляционно-регрессионного анализа пакета Microsoft Excel. Результаты корреляционного анализа позволили установить факторы, влияющие на исследуемые параметры. Например, на уширение полок раската наибольшее влияние оказывает коэффициент обжатия полок (коэффициент парной корреляции $r_{\beta_{1/\eta}}=0,861$), в меньшей степени влияют порядковый номер калибра ($r_{\beta_{N_{\text{ку}}}}=0,646$), угол изгиба полок ($r_{\beta_{\text{tg}\phi}}=-0,585$), номер профиля ($r_{\beta_N}=-0,506$), приведенный диаметр валков ($r_{\beta_{A_1}}=0,325$) и количество калибров ($r_{\beta_{n_{\text{ку}}}}=-0,285$). Причем, между величиной уширения и параметрами $1/\eta$, $N_{\text{ку}}$, A_1 существует прямая зависимость, а между уширением и параметрами N , $n_{\text{ку}}$, $\text{tg}\phi$ - обратная. Значимость коэффициентов парной корреляции проверяли по значениям t - критерия Стьюдента.

В результате регрессионного анализа получены уравнения для расчета:

– коэффициента уширения:

$$\beta = 0,945N^{-0,0215} N_{\text{ку}}^{0,810} N^{-2,028} A_1^{0,0287} \frac{1}{\eta}^{0,127} \text{tg}\phi^{-0,0029} n_{\text{ку}}^{-0,029}, \quad (6)$$

– количества необходимых угловых калибров

$$n_{\text{ку}} = 17,539N^{0,0024} A_1^{1,214} \cdot A_1^{-0,488}, \quad (7)$$

– суммарного коэффициента обжатия полок

$$1/\eta_{\Sigma} = 0,138N^{0,266} A_1^{0,478} n_{\text{ку}}^{0,778}, \quad (8)$$

– коэффициентов обжатия полок по проходам

$$\frac{1}{\eta} = 0,848N^{-0,0091} N_{\text{ку}}^{0,173} N^{-0,388} A_1^{0,041} n_{\text{ку}}^{0,167}, \quad (9)$$

– угла сгибания полок

$$\text{tg}\phi = 1,196 - 0,181N_{\text{ку}} - 0,0052N_{\text{ку}}^2. \quad (10)$$

Уравнения (6) – (10) характеризуются значениями коэффициента множест-

венной корреляции $R_{y,x_i} = 0,848 \div 0,956$, и является адекватным, так как расчетные значения F – критерия превышают табличные при 5 % уровне значимости.

На основе полученных уравнений регрессии и составленных геометрических соотношений в прямополочных открытых калибрах разработана методика, и алгоритмы расчета калибровок валков для прокатки угловой стали. Была выбрана схема прокатки (рис.7) и спроектирована рабочая калибровка валков для прокатки угловой равнополочной стали от №2 до №5 на стане 320/150 ОАО «Амурметалл».

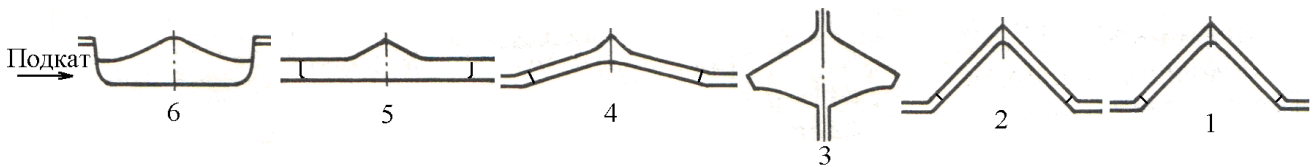


Рис. 7. Принципиальная схема прокатки угловой стали на стане 320/150 (1-6 – номера калибров против направления прокатки)

Схема прокатки каждого профилеразмера предусматривает использование одного разрезного развернутого закрытого калибра для первого контроля ширины раската, одного - двух открытых прямополочных калибров, одного калибра в вертикальной клети для второго контроля ширины раската и двух чистовых открытых калибров. Для каждого профиля использовали отдельные разрезные калибры и отдельные калибры в вертикальных клетях, а остальные унифицировали по группам профилеразмеров. Во всех случаях гибка полок раската до 45^0 проводится за три прохода. Таким образом, предложенная схема калибровки валков позволила сократить общее число фасонных калибров по сравнению с калибровкой валков фирмы «SKET». Например, при прокатке профиля 20x20x3 мм их сократили с 6 до 5, а 50x50x3 мм – с 9 до 6. Одновременно удалось унифицировать и минимизировать количество калибров в черновой группе клетей.

В процессе разработки калибровки валков была решена задача оптимизации режимов прокатки на стане угловой стали по расходу электроэнергии на деформацию металла. Затраты энергии на прокатку каждого профиля W_{Σ} определяли по формуле

$$W_{\Sigma} = \sum_1^n W_i, \quad (11)$$

где для непрерывного стана $W_i = \frac{71,2M_{\text{пр.}i}}{\omega_i D_{\text{ки}}}$ - расход энергии при прокатке раската в i -ой клетки стана, кВт·ч/т, отнесенный к рабочим валкам; $M_{\text{пр.}i}$ - крутящий момент прокатки на валках рабочей клетки; ω_i - площадь поперечного сечения раската; n - число клетей (проходов), используемых при прокатке данного профилеразмера. При минимизации выбранного критерия ($W_{\Sigma} \Rightarrow 0$) в качестве управляющих параметров выбрали число проходов n и конечную скорость прокатки $U_{\text{к}}$, для поиска решения использовали метод упорядоченного перебора параметров управления.

В результате моделирования с применением ЭС «Сортовая прокатка» режимов прокатки по разработанной калибровке валков всех угловых профилей из сталей марок Ст3 и Ст5 с регламентированной температурой нагрева заготовки 1180⁰С было установлено, что при найденном числе фасонных калибров затраты энергии на деформацию минимальны. Эта энергия в зависимости от профилеразмера составляет 103,6-130 МДж/т. Экономия электроэнергии, затрачиваемой на деформацию металла, по сравнению с проектной калибровкой составляет в зависимости от профилеразмера 7,5÷13,5 %.

Разработанную калибровку валков и скоростные режимы прокатки внедрили на стане 320/150. Эффективность предложенной калибровки валков и скоростных режимов прокатки подтвердилась в процессе промышленной эксплуатации. Экономический эффект, который получили за счет уменьшения затрат электроэнергии на прокатку и сокращения числа используемых валков превысил 200 тыс. руб. (в ценах 1990 г.). Кроме того, в результате увеличения конечных скоростей прокатки на 30-60 % по сравнению с проектными скоростями увеличилась производительность стана при прокатке угловой стали.

В четвертой главе изложены результаты компьютерного моделирования и внедрения оптимальных технологических режимов прокатки на стане сортовых профилей и катанки.

В качестве целевой функций при оптимизации приняли производительность стана $W_{\text{п}}$. Поиск оптимального технологического режима заключался в определении максимально возможной конечной скорости прокатки профилей сортамента при минимально возможной температуре нагрева заготовки t_0 , при которых

достигается максимум производительности стана и минимум удельного расхода тепловой и электрической энергии:

$$W_{\Pi} = f(t_0, U_{\text{к}}) \rightarrow \max. \quad (12)$$

Поиск экстремума целевой функций (12) проводили методом упорядоченного перебора параметров управления $U_{\text{к}}$ и t_0 с помощью ЭС «Сортовая прокатка».

В результате компьютерного моделирования технологических параметров прокатки круглой -, арматурной -, угловой стали и катанки по действующим калибровкам валков и режимам обжатый установлено, что существующие (регламентированные) конечные скорости прокатки профилей могут быть увеличены, с учетом ограничений по силовой нагрузке оборудования главных линий стана. Увеличение скорости прокатки круглой стали в зависимости от профилеразмера составляет 6-50 % при среднем значении 32 %, арматурной стали – 6-40 % при среднем значении – 19 %, угловой стали, соответственно 13-54 % и 29 %, а профилей в бунтах (катанка и круглая сталь) – 7-39 % и 21%. Основными ограничениями (в зависимости от профилеразмера) являются мощность электродвигателей привода рабочих клеток чистовой группы стана и скорость срабатывания летучих ножниц.

Внедрение новых скоростных режимов прокатки позволило увеличить среднюю часовую производительность стана с 63,25 до 72,07 т (на 14 %). При этом объем производства проката увеличился с 30 – 32 тыс. т до 33 – 37 тыс. т в месяц в зависимости от производственной программы, т.е. производительность стана 320/150 повысилась на 10 – 16 %.

Оптимизация температуры нагрева исходной заготовки показала, что при прокатке круглой, угловой стали и катанки температура нагрева заготовки может быть снижена с регламентированной 1180 – 1220 °С до 1100 – 1150 °С, а при прокатке арматурной стали до 1150 °С. Это позволило получить суммарную экономию затрат на топливо и электроэнергию в пределах 1,2-2,1 %, при одновременном увеличении производительности нагревательной печи.

Суммарный экономический эффект, связанный с увеличением часовой производительности стана и снижением себестоимости продукции превысил 12 млн. рублей.

Результаты моделирования технологических процессов прокатки позволили установить, что основным ограничением увеличения производительности стана при прокатке профилей имеющих массу погонного метра от 2 до 3,85 кг является недостаточная мощность электродвигателя привода (550 кВт) чистовой клетки. Была обоснована и реализована установка нового электродвигателя главного привода чистовой клетки стана мощностью 1000 кВт. Это позволило дополнительно увеличить скорость прокатки арматурной и круглой стали по сравнению с рекомендованной по результатам оптимизации скоростей прокатки. Новые скоростные режимы увеличили среднечасовую производительность стана, которая с учетом ограничений на производительность нагревательной печи 105 т/ч и пропускной способности хвостовой части стана возрастает до 79,1 т. Годовой объем производства на стане может достигнуть 475 – 550 тыс. т.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения диссертационной работы достигнута поставленная цель и получены следующие результаты:

1. Показано, что эффективным путем поиска оптимальных технологических режимов прокатки сортовых профилей на действующих и проектируемых станах является компьютерное моделирование технологических процессов прокатки с помощью специального программного обеспечения.

2. Установлено, что при прокатке сортовых профилей из непрерывнолитой заготовки при суммарном коэффициенте вытяжки менее 100, дефекты литой структуры устраняются не полностью, и как результат, плотность готовых профилей получается ниже номинальных значений, определяемых стандартами. Для увеличения плотности готового проката предложено кантовать раскат в межклетевых промежутках в одном направлении относительно положения исходной заготовки. Это обеспечит за счет дополнительной сдвиговой деформации увеличение плотности металла готового профиля дополнительно не менее чем на 0,5-0,8 %.

3. Показано, что применение в черновой группе клеток системы калибров овал-ребровой овал обеспечивает благоприятную картину деформированного состояния в объеме металла.

4. Установлено, что исходная непрерывнолитая заготовка имеет запороченность внутренними дефектами и нестабильность исходной зеренной структуры по сечению; прокатный передел с действующим технологическим режимом прокатки обеспечивает получение мелкозернистой однородной структуры по сечению готовых профилей и выкатываемость негрубых дефектов сплошности непрерывнолитой стали. Получены адекватные регрессионные зависимости, позволяющие прогнозировать зеренную структуру металла готовых профилей в зависимости от среднего значения величины зерна первичного аустенита и суммарного коэффициента вытяжки.

5. Показано, что максимальным сечением исходной непрерывнолитой заготовки в условиях стана 320/150 ОАО «Амурметалл» является квадрат со стороной 140 мм. Применение такой заготовки позволит увеличить накопленную деформацию в черновой группе клетей, что благоприятно скажется на структуре металла; увеличить производительность стана и машин непрерывного литья заготовок.

6. Разработаны рекомендации по рациональным значениям начальных диаметров валков для мелкосортно-проволочных станов, аналогичных стану 320/150 ОАО «Амурметалл».

7. Выполнены исследования и установлены закономерности формоизменения металла в открытых прямополочных угловых калибрах. Получены статистически адекватные уравнения регрессии для расчета коэффициентов уширения в указанных калибрах в зависимости от параметров очага деформации. Определены соотношения параметров калибра и раската в виде адекватных уравнений регрессии, необходимых для расчета калибровок валков и оптимальных технологических режимов.

8. Разработана математическая модель, методика, и алгоритм расчета формоизменения металла при прокатке угловой стали с применением прямополочных угловых калибрах. По разработанной методике спроектирована и освоена рабочая калибровка валков стана 320/150 ОАО «Амурметалл» для прокатки равнополочной угловой стали. Эффективность предложенной калибровки валков подтвердилась в процессе промышленной эксплуатации. Суммарный экономический эффект реализации рабочих калибровок валков составил в 1990 г. 219,57 тыс. руб.

9. Проведено компьютерное моделирование технологических параметров прокатки

по действующим калибровкам валков. Установлено, что действующие (регламентированные) конечные скорости прокатки профилей могут быть увеличены с учетом ограничений по силовой нагрузке оборудования главных линий стана. Внедрение новых скоростных режимов прокатки позволило увеличить среднюю часовую производительность стана на 10 – 16 %. Суммарный экономический эффект составил 12 млн. рублей.

10. Обоснована необходимость замены электродвигателя чистовой клетки стана (550 кВт) на электродвигатель мощностью 1000 кВт. Это позволило значительно повысить конечную скорость прокатки профилей с массой погонного метра от 2 до 3,85 кг. При этом среднечасовая производительность стана возрастает до 79,1 т, а годовой объем производства на стане достигнет 475 – 550 тыс. т.

11. Полученные результаты являются научно обоснованными технологическими решениями и разработками по повышению эффективности производства мелкосортных профилей на действующих сортопрокатных станах, что имеет существенное значение для экономики металлургической промышленности страны.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах.

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:

1. Освоение технологии прокатки-разделения арматурной стали на мелкосортно-проволочном стане 320/150 ОАО "Амурметалл" / Г.П.Перунов, В.В.Лиманкин, В.К.Смирнов, Ю.В.Инатович // Производство проката, 2006, №10. С.16-19.

2. Разработка и внедрение оптимальных технологических режимов прокатки на мелкосортно-проволочном стане 320/150 ОАО «Амурметалл» / С.А.Хохлов, Г.П.Перунов, Ю.В.Инатович, В.В.Лиманкин // Производство проката, 2009, №11. С.14-17.

3. Влияние пластической деформации на плотность непрерывнолитой стали / В.В.Лиманкин, В.А.Шилов, Б.М.Антошечкин, Ю.В.Инатович, Г.П.Перунов // Производство проката. 2010. № 6. С.16-19.

4. Внедрение технологии прокатки-разделения арматурных профилей на стане 320/150 / Г.П.Перунов, В.В.Лиманкин, Ю.В.Инатович // Сталь, 2010, №5. С.90-92

5. Внедрение оптимальных технологических режимов прокатки сортовых профилей на стане 320/150 ОАО «АМУРМЕТАЛЛ» / Хохлов С.А., Лиманкин В.В., Перунов Г.П., Инатович Ю.В. // Сталь, 2010, № 12. С.38-40.

Другие публикации:

6. Оптимизация калибровки валков для прокатки угловой стали на стане 320/150 / В.К.Смирнов, В.В.Лиманкин, В.А.Шилов, Ю.В.Инатович // Сталь, 1991, №2. С.54-56.

7. Перунов Г.П., Соколов П.Л., Лиманкин В.В. Опыт разработки и освоения

технологических режимов прокатки на мелкосортно-проволочном стане завода «Амурсталь» / Новые технологические процессы прокатки как средство интенсификации производства и повышения качества продукции: Тез. докл. Всесоюзной конф. прокатчиков, 23-25 мая 1989 г. Челябинск: Изд-во ЧПИ, 1989. с.288-292.

8. Антошечкин Б.М., Лиманкин В.В. Экспериментальное изучение поведения дефектов сплошности при прокатке мелкосортной стали из непрерывнолитых заготовок / Новые технологические процессы прокатки как средство интенсификации производства и повышения качества продукции: Тез. докл. Всесоюзной конф. прокатчиков, 23-25 мая 1989 г. Челябинск: Изд-во ЧПИ, 1989. с.218-222.

9. Лиманкин В.В., Шилов В.А., Инатович Ю.В. Анализ деформированного состояния непрерывнолитой заготовки при прокатке в черновой группе клетей стана 320/150 / VIII Конгресс прокатчиков // Труды VIII Конгресса прокатчиков, 11-15 окт. 2010 г. Магнитогорск, 2010. С.487-490.

10. Разработка и внедрение оптимальных технологических режимов прокатки на мелкосортно-проволочном стане / Перунов Г.П., Лиманкин В.В., Инатович Ю.В., Шилов В.А. // Труды семинара НПП «МАШПРОМ» 16-20 октября 2009 г. Екатеринбург: МАШПРОМ, 2009. С. 37-48.

11. Технология прокатки-разделения арматурных профилей №14 и №16 на стане 320/150 ОАО «Амурметалл» / Г.П.Перунов, Ю.В.Инатович, В.В.Лиманкин и др. // Бюлл. «Черная металлургия», М.: ОАО «Черметинформация», 2010, №11. С.44-47.

12. Применение новых технологий прокатки для повышения производительности мелкосортных станов / Перунов Г.П., Инатович Ю.В., Лиманкин В.В., Хохлов С.А., Волков К.В., Балдин С.М., Чиж. С.А. // Сб. научн. трудов «Новые технологии и материалы в металлургии». Екатеринбург: УрО РАН, 2010. с.263-275.

13. Оптимизация технологических режимов прокатки на мелкосортно-проволочном стане / Перунов Г.П., Лиманкин В.В., Шилов В.А., Инатович Ю.В. // Труды международной конференции «Форсированное индустриально-инновационное развитие в металлургии». Алматы: Казахский национальный технический университет имени К.И.Сатпаева, 2010. с.74-79.

14. Применение новых технологий прокатки для повышения производительности мелкосортных станов / Перунов Г.П., Инатович Ю.В., Лиманкин В.В., Чиж. С.А. // Сб. научн. трудов «Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР». Екатеринбург: Изд. дом «ИздатНаукаСервис», 2011. с.538-542.

15. Инатович Ю.В., Перунов Г.П., Лиманкин В.В. Влияние кантовок раскатов на плотность непрерывнолитой стали / Материалы 1 международной интерактивной научно-практической конференции «Инновации в материаловедении и металлургии». Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2012. С.98-101.

Подписано в печать

Бумага писчая

Уч. – изд. л.

Плоская печать

Тираж 100 экз.

Формат 60×84 1/16

Усл. печ. л.

Заказ

Редакционно-издательский отдел УрФУ

620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19

Ризография НИЧ УрФУ

620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19