

На правах рукописи

ЧЕЛИЩЕВ ВЯЧЕСЛАВ НИКОЛАЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА И КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ
ВЫСОКОПРОЧНОЙ АРМАТУРЫ ДИАМЕТРОМ 10,0 ММ
ДЛЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ШПАЛ НА ОСНОВЕ
РАЗРАБОТКИ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ
ХОЛОДНОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕРМИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ**

Специальность 05.02.23 – Стандартизация и управление
качеством продукции (металлургия)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Магнитогорск – 2006

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Научный руководитель:	кандидат технических наук, доцент Корчунов Алексей Георгиевич
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Шеркунов Виктор Георгиевич кандидат технических наук Корнилов Владимир Леонидович
Ведущая организация:	ООО «ЗМИ-Профит» (г. Магнитогорск)

Защита состоится 28 декабря 2006 г. в 16-00 ч. на заседании диссертационного совета К 212.111.03 при ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, МГТУ, малый актовый зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Автореферат разослан « » ноября 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

И.А. Михайловский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время за счет строительства новых дорог осваивается относительно небольшая часть ежегодного прироста грузооборота на железнодорожном транспорте. Существенно более высокие объемы прироста грузооборота осваиваются за счет увеличения производительности действующих магистралей. Основными путями интенсификации перевозок служат повышение скоростей движения поездов и их веса, что связано с резким ростом силового воздействия подвижного состава на путь. Его состояние сегодня не вполне отвечает более сложным условиям эксплуатации. В связи с этим компанией ОАО «Российские железные дороги» принята двухуровневая программа технического перевооружения отечественных железных дорог. Первый этап направлен на повышение скорости движения и модернизации существующих путей, затем начнется строительство специализированных высокоскоростных магистралей.

Одной из актуальных проблем при реализации намеченной программы является развитие производства современных комплектующих для строения пути и, в частности, железобетонных шпал нового поколения. В целях развития отечественного производства железобетонных шпал для высокоскоростных магистралей компания приобрела за рубежом несколько специализированных технологических линий по выпуску данной продукции. Основным несущим элементом в конструкции шпалы, определяющим ее работоспособность и долговечность, является высокопрочная арматура периодического профиля диаметром 10,0 мм ($\sigma_B \geq 1470$ Н/мм²). Использование высокопрочной арматуры такого диаметра обеспечивает снижение энергоемкости и высокую технологичность армирования, увеличивает производительность изготовления шпал, позволяет экономить металл, возврат которого в баланс металлопотребления страны в настоящее время практически равен нулю.

В зарубежных технологиях производства высокопрочной шпальной арматуры можно выделить два направления: деформационное упрочнение высокоуглеродистых сталей с последующим отпуском под сильным натяжением и термическое упрочнение.

У нас в стране на данный вид арматуры разработаны и действуют ТУ-14-125-704-96, где в качестве заготовки предусмотрено использование кремнистых сталей 40С2 или 55С2.

Опыт освоения высокопрочной арматуры из кремнистых сталей на металлургических заводах выявил проблемы в достижении требуемых показателей качества арматуры при термическом упрочнении в потоке прокатного стана, большого разброса механических свойств готовой продукции, отклонения по мерности прутков, низкой рентабельности производства при выпуске малотоннажных партий. Освоение производства арматуры метизными предприятиями деформационным упрочнением лимитируется отсут-

ствием подката требуемого качества с регламентированными показателями механических свойств и способностью к холодному пластическому деформированию.

Эти причины привели к фактическому отсутствию отечественной арматуры этого класса на рынке, а заводы ЖБШ вынуждены переориентироваться на зарубежного производителя. Несмотря на то, что концепция развития металлургии России предусматривает расширение производства импортозамещающих видов металлопродукции, сегодня ни одно отечественное предприятие не освоило производство данного вида продукции, конкурентоспособной с западными аналогами.

В связи с этим актуальным является поиск технических решений по повышению качества и конкурентоспособности отечественной высокопрочной арматуры для железобетонных шпал.

Цель работы. Обеспечение заданного уровня качества и повышение конкурентоспособности высокопрочной арматуры периодического профиля диаметром 10,0 мм для железобетонных шпал.

Научная новизна.

- разработана математическая модель управления геометрическими показателями качества двухстороннего периодического профиля с серповидными выступами в процессе холодного профилирования в клети-волоке со смещенными парами валков;
- получены математические модели оценки изменения механических свойств арматуры периодического профиля из кремнистых марок стали 40С2 и 55С2 при термическом упрочнении, на основе которых определены результативные режимы финишной обработки, обеспечивающие получение продукции заданного уровня качества;
- разработана методика управления качеством высокопрочной арматуры диаметром 10,0 мм для железобетонных шпал в гибком сочетании технологических блоков «холодная пластическая деформация» - «термическое упрочнение».

Практическая ценность и реализация работы в промышленности.

- получены исходные данные для проектирования результативных режимов холодной пластической деформации и термического упрочнения высокопрочной арматуры диаметром 10,0 мм, обеспечивающих достижение требуемого уровня качества и повышение конкурентоспособности готовой продукции;
- выпущены опытно-промышленные партии высокопрочной арматуры для железобетонных шпал по ТУ-14-125-704-96 на ОАО «Магнитогорский калибровочный завод» (ОАО «ММК-МЕТИЗ»);
- разработано программное обеспечение, позволяющее на основе моделирования и анализа напряженного состояния при волочении определять режимы получения качественной заготовки под профилирование;

– разработана технологическая карта ТК 176-МТ.ПР-112-2006 на процесс получения холодной пластической деформацией периодического профиля арматуры по ТУ-14-125-704-96;

– для реализации и ускорения внедрения разработанных технических решений в промышленных условиях предложена компоновка поточной технологической линии термического упрочнения профилированной арматуры;

– результаты работы использованы при составлении программы технического развития ОАО «ММК-МЕТИЗ» до 2010 г. по организации выпуска новых конкурентоспособных видов продукции с заданным уровнем качества.

Апробация работы.

Основные положения работы доложены и обсуждены на традиционных ежегодных научно-технических конференциях Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова 2003 – 2006 гг., на V Международном конгрессе прокатчиков (г. Череповец, 2003г.); на международной научно-технической конференции «Теория и технология процессов пластической деформации-2004» (МИСиС, г. Москва, 2004г.), на 4 и 5 школах-семинарах «Фазовые и структурные превращения в сталях» (п. Кусимово, Башкортостан, 2004-2005гг.), на всероссийской научно-технической конференции «Новые материалы и технологии - НТМ 2006» (МАТИ, г. Москва, 2006г.), на технических советах ОАО «ММК-МЕТИЗ» 2004-2006гг.

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 10 печатных статьях, в т.ч. две - в рецензируемых изданиях.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 113 страницах машинописного текста и включает: введение, 5 глав, 8 таблиц, 40 рисунков, заключение, библиографический список из 86 наименований, 4 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и основные задачи исследований.

В первой главе проанализированы современные требования, предъявляемые к качеству высокопрочной арматуры для армирования железобетонных шпал, обобщены материалы по проблемам достижения требуемого уровня качества при различных способах ее производства. Общей мировой тенденцией, в свете значительного повышения интенсивности грузоперевозок и увеличения скорости движения подвижного состава, является постоянное повышение показателей прочности и пластичности арматуры, снижение потерь от релаксации, внедрение средств обеспечения продолжительности жизненного цикла готовой продукции. В европейских странах в промышленных объемах выпускаются и успешно эксплуатируются на высокоскоростных магистралях железнодорожные шпалы, армированные высокопрочной арматурой диаметром 10,0 мм. Особенностью арматуры для железобетонных

шпал, в отличие от других сортов арматурной стали, является высокий уровень её прочностных свойств (σ_B не менее 1470 Н/мм²). Высокий уровень механических свойств арматуры и ограниченные возможности прямого использования зарубежных разработок остро ставят задачу организации на российских предприятиях собственного производства конкурентоспособной арматуры с качеством, соответствующим мировым прототипам.

Эффективным способом решения этой задачи может стать схема производства, состоящая из двух технологических блоков: блока холодной пластической деформации, включающем операции волочения подката на размер под профилирование и нанесения периодического профиля и блока финишного термического упрочнения. Такой подход открывает широкие возможности в управлении качеством продукции за счет реализации преимуществ холодной пластической деформации и термообработки на каждой отдельной стадии производства. Так, на этапе холодной пластической деформации появляется возможность получать арматуру по теоретической массе, обеспечить точность выполнения геометрических показателей качества. На этапе термической обработки сформируется высокопрочное изотропное состояние арматуры. В целом технологический процесс обеспечит гибкость и мобильность при смене сортамента, выпуск малотоннажных партий, многовариантность финишного упрочнения, получение стабильных однородных механических свойств арматуры и повышение конкурентоспособности продукции.

Чтобы реализовать преимущества предлагаемой технологической схемы, необходимо определить размер заготовки под профилирование на основе металлоемкости элементов арматурного профиля, разработать аппарат оценки и анализа уровня напряженного состояния арматуры на этапе холодного пластического деформирования, предопределяющего возможность появления закалочных трещин при последующей термической обработке. Избежать этого можно при помощи разработки эффективных режимов волочения и профилирования с учетом специфики финишного термоупрочнения кремнистых сталей. Литературные данные дают разрозненную картину поведения сталей 40С2 и 55С2 при термическом упрочнении, выполнявшемся в разных условиях с применением различного оборудования, образцов и материалов, электрических и технологических характеристик нагрева. Результаты такого рода исследований трудно подчинить задачам по обоснованию результативных режимов термической обработки профилированной в холодном состоянии арматуры периодического профиля. С целью получения сведений о закономерностях процессов, протекающих при холодной пластической деформации периодического профиля арматуры и последующей термической обработке, требуются отдельные исследования. Изучив процессы формирования качества на этапах холодного пластического деформирования и термической обработки, на основе полученных знаний необходимо разработать методику управления качеством высокопрочной арматуры для

железобетонных шпал, позволяющую определять рациональные режимы обеспечения заданного уровня качества и повышения конкурентоспособности готовой продукции.

В связи с этим в работе необходимо решить следующие задачи:

- разработать режимы холодной пластической деформации заготовки под профилирование на основе моделирования и анализа напряженного состояния в зависимости от технологических параметров процесса волочения, с учетом специфики обеспечения заданного уровня качества готовой продукции при профилировании и финишной термообработке;
- разработать модель управления геометрическими показателями качества арматуры в процессе холодного профилирования круглой холодноотянутой заготовки, на базе которой определить эффективные режимы обработки и калибровки профилирующих валков;
- выполнить исследование процессов формирования качества арматуры периодического профиля из сталей 40С2 и 55С2 на этапе термического упрочнения и разработать результативные режимы финишной термообработки;
- разработать методику управления качеством высокопрочной арматуры для железобетонных шпал диаметром 10,0 мм, на основе которой определить рациональные технологические режимы обработки, обеспечивающие формирование заданного уровня качества и повышение конкурентоспособности готовой продукции;
- выпустить опытно-промышленные партии высокопрочной арматуры периодического профиля для железобетонных шпал.

Вторая глава посвящена разработке рациональных режимов получения холодноотянутой заготовки под профилирование. С учетом формы поперечного сечения арматуры, регламентированной техническими условиями ТУ-14-125-704-96 (рис.1), операция нанесения периодического профиля базируется на двухвалковой схеме профилирования круглой заготовки.

При нанесении периодического профиля необходимо обеспечить получение арматуры требуемого номинального диаметра с заданным уровнем сцепления с бетоном и минимальной массой погонного метра. Выполнение этих требований зависит от соотношений между параметрами периодического профиля и размера заготовки под профилирование.

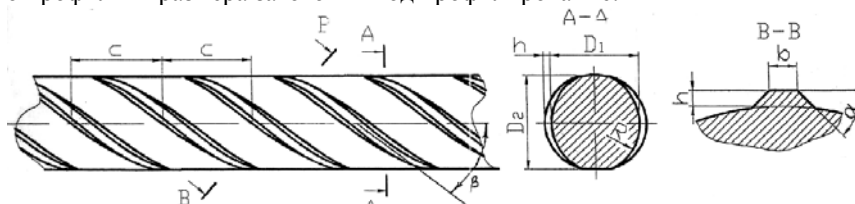


Рис. 1. Арматурный профиль по ТУ-14-125-704-96

Для определения размера заготовки под профилирование на основе анализа металлоемкости элементов периодического профиля и основного сечения арматурного профиля разработали инженерную формулу:

$$d_0 = \sqrt{\frac{8 \cdot F_k / \sin \beta}{\pi}} + d_n^2, \quad (1)$$

где F_k – площадь проекции поперечного сечения серповидного выступа, мм²; β – угол наклона выступа к продольной оси стержня, град; d_n – номинальный диаметр арматуры, мм.

В предлагаемом сочетании технологических блоков режимы волочения на размер под профилирование и нанесения периодического профиля будут формировать уровень напряженного состояния холоднодеформированной арматуры, который предопределяет склонность стали к появлению закалочных трещин при последующей термической обработке.

Для расчета напряжений и определения границ зон с разными схемами напряженного состояния в очаге деформации при волочении использовали метод линий скольжения. Исследование процесса волочения осуществлялось с учетом общепринятых допущений на основании способа решения осесимметричных задач теории пластичности, предложенного Г. Генки и развитого отечественными учеными Л.М. Качановым, Г.Э. Аркулисом, Х.И. Копыловским.

Для автоматизации расчетов, построения и визуализации полей напряжений в очаге деформации при волочении было разработано программное обеспечение «Автоматизированный расчет напряженного состояния при волочении» на языке «Delphi» (подана заявка на регистрацию программы в Федеральный орган исполнительной власти по интеллектуальной собственности).

Программный продукт позволяет оперативно моделировать напряженное состояние в зависимости от технологических параметров исходной заготовки и процесса волочения и может легко интегрироваться в системы управления качеством продукции. С его использованием было установлено количественное влияние технологических факторов волочения на вероятность возникновения неблагоприятного напряженного состояния с преобладанием напряжений растяжения в очаге деформации. Такое напряженное состояние в зависимости от технологических факторов волочения и качества исходной заготовки может привести к снижению сопротивления проволоки к разрушению и явлению «разрыхления», что может сделать невозможным достижение заданного уровня качества продукции на этапе термической обработки.

Для прогноза вероятности возникновения неблагоприятного напряженного состояния при волочении программный продукт предусматривает рас-

чет коэффициентов, оценивающих рациональность назначаемых режимов обработки.

Коэффициент m характеризует протяженность зоны напряженного состояния всестороннего растяжения в радиальном направлении:

$$m = \frac{r_p}{R_0}, \text{ где } r_p - \text{текущий радиус проволоки в очаге деформации, до кото-}$$

рого действуют радиальные растягивающие напряжения; R_0 - начальный радиус проволоки до волочения.

Было установлено, что с уменьшением степени деформации и увеличением угла волоки коэффициент m увеличивается (рис.2), а напряженное состояние продукта волочения становится неблагоприятным для последующего профилирования и термической обработки.

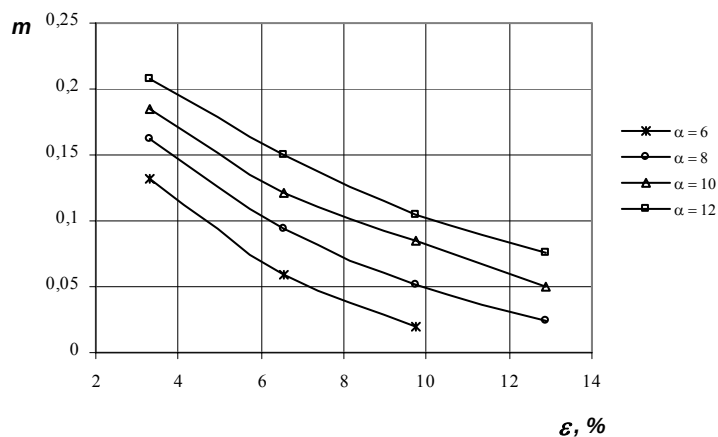


Рис. 2. Зависимость коэффициента m от степени деформации и полуугла канала волоки

Коэффициент n характеризует отношение максимального растягивающего напряжения на оси проволоки к величине константы пластичности:

$$n = \frac{\sigma_{lmax}}{k}, \text{ где } \sigma_{lmax} - \text{максимальное растягивающее напряжение в очаге де-}$$

формации; k - константа пластичности материала.

Условием вероятности возникновения неблагоприятного напряженного состояния при волочении заготовки под профилирование являются значения $m > 0$ и $n > 2$ (рис.3).

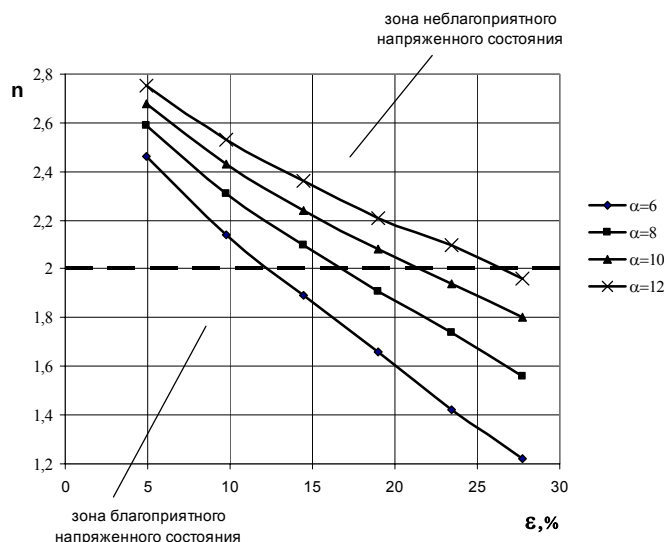


Рис. 3. Зависимость коэффициента n от степени деформации и полуугла канала волокна

По результатам моделирования напряженного состояния определили рациональные режимы волочения заготовки под профилирование, создающие благоприятные условия для достижения заданного уровня качества продукции при нанесении периодического профиля и финишной термообработке.

Третья глава посвящена разработке модели управления геометрическими показателями качества периодического профиля арматуры для железобетонных шпал в процессе профилирования.

Приводятся результаты анализа условий профилирования круглой холодноотянутой заготовки в двухвалковом калибре с формированием на ее поверхности периодического профиля арматуры с серповидными выступами. Анализ проводили по характеру и степени неравномерности высотной деформации по ширине площади контакта металла и инструмента при профилировании. Определяли интегральный коэффициент неравномерности высотной деформации V , коэффициент охвата K_{ox} и степень ограничения уширения. Было установлено, что процесс нанесения серповидного профиля на поверхность круглой заготовки характеризуется равномерной высотной деформацией $\nu = 0,88$, что положительно сказывается на напряженном со-

стоянии арматуры. Высокое значение коэффициента охвата $K_{ох} = 0,9$ создает благоприятные условия для проявления металлом пластических свойств.

В то же время анализ практики производства двухсторонних периодических профилей показал, что существенным их недостатком является повышенное уширение в процессе профилирования и, как следствие, повышенная овальность, прогрессивно растущая с увеличением диаметра проволоки. Устранить присущие двухвалковой схеме профилирования недостатки возможно разработкой рациональной калибровки валков, применением двухвалковых клетей-волоков со смещенными парами валков, широкие технологические возможности которых в управлении геометрическими показателями качества продукции показаны зарубежными и отечественными производителями.

Технология натяжения арматуры при производстве шпал предусматривает наличие резьбы на концах стержней арматуры, что обуславливает жесткие требования по овальности профиля. Выполнение требований по овальности арматуры, массе погонного метра и условиям сцепления с бетоном зависит от геометрических характеристик периодического профиля и условий формоизменения в очаге деформации.

Для определения закономерностей формоизменения и разработки математического аппарата управления геометрическими показателями качества арматуры были проведены экспериментальные исследования процесса холодного профилирования в промышленных условиях. Для нанесения периодического профиля использовалась неприводная клеть-волока со смещенными парами валков, которую устанавливали в линию волочильного стана ИЗТМ 10-28. Первая пара валков с овальным калибром, расположенных горизонтально, предназначалась для предварительного бокового обжатия и стабилизации задачи исходной заготовки в профилирующий калибр. Для формирования выступов на поверхности периодического профиля в ручьях второй пары валков, расположенных вертикально, электроэрозионным способом выполнили серповидные канавки глубиной 0,7 мм с шагом 10,0 мм под углом 30°. Параметры ручьев калибров определили с использованием методики расчета режимов холодной пластической деформации в системе круг-овал-круг. Расстояние между очагами деформации в клетях-волоках составляло 36 мм, диаметр деформирующих и профилирующих валков - 170 мм, бандажи валков - из стали X12M с твердостью рабочей поверхности 60 HRC. При проведении экспериментов использовалась заготовка под профилирование диаметром 11,2 мм с различным уровнем прочностных свойств из сталей 40C2 и 55C2.

Для измерения геометрических параметров арматуры после профилирования с каждого образца отбирались темплеты. С помощью проектора ЛЭТИ- 60 конфигурация темплетов в увеличенном масштабе переносилась

на бумагу, откуда затем снимались необходимые для анализа формоизменения параметры. Изображения темплетов оцифровывались и обрабатывались в программе «Mathcad Pro». Геометрические размеры периодического профиля контролировали микрометром типа МК 0 - 25 по ГОСТ 6507 - 88, высота выступа определялась с помощью рычажно-зубчатого индикатора часового типа. Обработка всех экспериментальных данных проводилась методами математической статистики.

Для определения закономерностей формоизменения арматуры при профилировании в качестве исследуемых параметров были выбраны: абсолютное обжатие круглой заготовки в первой паре валков $\Delta d (X_1)$; временное сопротивление разрыву холоднотянутой заготовки под профилирование $\sigma_{B0} (X_2)$. Высота профилирующего калибра, размер заготовки под профилирование и диаметр валков фиксировались на постоянном уровне и в ходе экспериментов не изменяли своего значения. В качестве функций откликов служили геометрические показатели качества арматуры (рис.1): высота выступа $h (Y_1)$ и овальность периодического профиля, характеризуемая разницей размеров по вертикальному и горизонтальному направлениям: $D_2 - (D_1 + 2h) (Y_2)$.

Для установления связи между исследуемыми величинами применялся аппарат математического планирования эксперимента. Использовался полный факторный план типа 2^2 и уравнение регрессии линейного типа с взаимодействиями факторов. Уровни значений и интервалы варьирования факторов определили из условия получения требуемых геометрических параметров профиля. На каждом уровне реализовали по несколько параллельных опытов. В каждой серии экспериментов проводился анализ промахов по критерию Стьюдента.

В результате проведенных исследований получена математическая модель управления геометрическими параметрами двухстороннего периодического профиля с серповидными выступами в процессе холодного профилирования в клети-волоке со смещенными парами валков:

$$\begin{aligned} Y_1 &= 0,5 + 0,095X_1 + 0,065X_2; \\ Y_2 &= 0,25 - 0,086X_1 - 0,052X_2. \end{aligned} \quad (2)$$

Проверка на адекватность с помощью критерия Фишера показала, что полученная модель достаточно точно описывает результаты эксперимента в исследуемой области изменения технологических параметров. На базе полученной модели формоизменения была выполнена корректировка калибровки валков и разработаны режимы профилирования, обеспечивающие получение требуемых значений геометрических показателей качества арматуры диаметром 10,0 мм.

Выполненные исследования процессов формирования качества арматуры в технологическом блоке «холодной пластической деформации» позволили разработать рациональные режимы обработки, обеспечивающие получение арматуры с требуемыми геометрическими показателями качества и благоприятным уровнем напряженного состояния, соответствующим условиям финишной термообработки.

Четвертая глава посвящена вопросам исследования формирования требуемого уровня качества профилированной арматуры на этапе финишной термической обработки. Исследования проводились в лабораторных и промышленных условиях на образцах арматуры номинальным диаметром 10,0 мм из сталей 40С2 и 55С2.

В лабораторных условиях была опробована схема термического упрочнения профилированных прутков арматуры закалкой и отпуском с использованием тепла печного нагрева. Образцы нагревали под закалку в электрической камерной печи без защитной атмосферы. Температура нагрева под закалку принималась для стали 40С2 - 900° С, а для стали 55С2 - 880° С. Продолжительность нагрева 25-30 мин обеспечивала необходимую равномерность распределения температуры по сечению арматуры и полноту протекания фазовых превращений в стали. После нагрева образцы поштучно охлаждали в воде. Закаленные образцы подвергали печному отпуску в интервале температур 350-400° С продолжительностью 25-30 мин. Применительно к этому способу термического упрочнения были отработаны температурно-временные режимы отпуска, обеспечивающие получение требуемого комплекса механических свойств арматуры.

Более прогрессивный вариант организации поточной технологии термического упрочнения арматуры предполагает использование тепла индукционного нагрева. В этом направлении наибольший интерес представляет изучение поведения закаленной стали при индукционном отпуске.

Закалка образцов осуществлялась в промышленных условиях на установке УТВЧ, оснащенной двумя индукционными нагревателями и специально сконструированным охлаждающим устройством с тангенциальной подачей воды. Путем однофакторных экспериментов были установлены температуры нагрева под закалку с индукционного нагрева, обеспечивающие формирование структуры мартенсита 3-5 балла, равномерно распределенной по всему сечению арматуры.

Условия индукционного отпуска моделировались нагревом образцов в ванне с расплавом солей KNO_3 и $NaNO_3$, обогреваемой электрическим током. С целью определения промышленных параметров отпуска, образцы нагревали до температур 500, 550 и 600° С с записью термограмм нагрева путем регистрации сигнала от хромель-алюмелевой термопары, зачеканенной в одном из образцов, на электронном автоматическом потенциометре КСП-4. Обработка опытных термограмм показала, что продолжительность

нагрева в расплаве солей до рабочих температур происходит за время эквивалентное скоростям нагрева используемых в технологиях термической обработки ТВЧ калиброванного металла.

Учитывая темп проведения закалочных операций, время пребывания образцов при отпуске в расплаве соли было принято равным 10, 20, 30, 40 и 60 сек. В стали 40С2 необходимые показатели прочности и пластичности металла достигнуты отпуском при температуре 550° С за время 20 сек, а в стали 55С2 за время 30 и 40 сек. В стали 40С2 распад мартенсита происходил непосредственно на стадии прогрева образцов до конечной температуры отпуска 550° С, обеспечивая формирование структуры троостита отпуска и свойственного ей комплекса механических свойств стали, удовлетворяющего необходимым требованиям.

В ходе исследований установлено, что отпуск, выполненный в условиях быстрого нагрева, является сокращенным по продолжительности. Однако в режиме ускоренного отпуска сталь в состоянии приобретать такую же прочность, что и сталь, отпущенная в печи, но при более высокой (на 100-150° С) температуре. Полученные данные свидетельствуют о том, что структурные превращения при скоростном отпуске стали успевают происходить как с выдержкой, так и без выдержки при температуре отпуска. Следует полагать, что формирование механических свойств исследуемых сталей при ускоренном отпуске формируются не за счет специфического влияния скорости нагрева, а за счет интенсификации диффузионных процессов, протекающих в условиях повышенных температур за более короткое время, обеспечивая полный распад мартенсита и образование структуры троостита отпуска.

По результатам исследований с использованием методов математической статистики получены уравнения, позволяющие прогнозировать механические свойства термически упрочненной арматуры периодического профиля в зависимости от температуры и времени проведения операций печного и скоростного отпуска (табл. 1).

Таблица 1

Зависимости изменения механических свойств арматуры периодического профиля от температурно-временных параметров отпуска

Марка стали	Вариант отпуска	Временное сопротивление разрыву σ_B , Н/мм ²	Относительное удлинение после разрыва δ , %
40С2	печной	$\sigma_B = 3616 - 5,2T - 7\tau$	$\delta = 0,03T + 0,06\tau - 4,7$
	в солях	$\sigma_B = 3986 - 4,3T - 6,9\tau$	$\delta = 0,05T + 0,08\tau - 22,3$
55С2	печной	$\sigma_B = 4285 - 6,1T - 10,7\tau$	$\delta = 0,06T + 0,1\tau - 18,9$
	в солях	$\sigma_B = 5382 - 6,1T - 12,4\tau$	$\delta = 0,04T + 0,09\tau - 21,7$

Установленные закономерности формирования механических свойств арматуры периодического профиля из кремнистых сталей 40С2 и 55С2 при термическом упрочнении с отдельного нагрева были положены в основу разработки опытно-промышленных технологий производства высокопрочной арматуры для железобетонных шпал.

В пятой главе разработана результирующая схема формирования заданного уровня качества высокопрочной арматуры периодического профиля диаметром 10,0 мм для армирования железобетонных шпал, состоящая из двух технологических блоков (рис. 4).

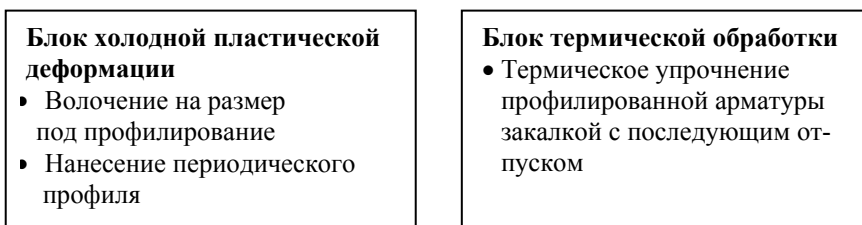


Рис. 4. Технологическая схема производства высокопрочной арматуры диаметром 10,0 мм для железобетонных шпал

На базе выполненных исследований с учетом характера взаимодействия между технологическими блоками разработана методика управления качеством высокопрочной арматуры железобетонных шпал диаметром 10,0 мм и определены рациональные режимы обработки, обеспечивающие формирование заданного уровня качества и повышение конкурентоспособности готовой продукции.

Исходной информацией при реализации методики служат показатели качества горячекатаного подката, согласно установленной нормативно-технической документации. По инженерной формуле (1) определяется размер круглой заготовки под профилирование из учета получения необходимых параметров сцепления с бетоном и минимальной массы погонного метра арматуры. Затем на базе разработанного программного обеспечения производится анализ напряженного состояния при волочении на размер под профилирование, определяются режимы обработки, отвечающие условиям финишного термического упрочнения. В случае высокой исходной твердости горячекатаного подката в качестве дополнительного управляющего воздействия на металл служит предварительная «смягчающая» термообработка-отжиг. С использованием полученной модели управления геометрическими показателями качества арматурного профиля (2) определяется режим профилирования. Далее осуществляется расчет результирующих режимов термической обработки профилированной арматуры на основе разработанных математических моделей (см. табл.1).

Необходимыми элементами методики являются ограничения, которые обеспечивают выполнение требований по стабильности формирования требуемого качества арматуры. В технологическом блоке «холодная пластическая деформация» режимы обработки определяются с учетом следующих ограничений: возникновение при волочении на размер под профилирование неблагоприятной зоны напряженного состояния с преобладанием в очаге деформации напряжений растяжения, повышенная овальность профиля, невыполнение высоты анкерующего выступа. В технологическом блоке «термическая обработка» в роли ограничений выступает несоответствие полученных механических свойств готовой продукции заданному уровню качества. Для обеспечения соответствия между заданным и достигнутым по результатам контроля уровнем показателей качества готовой продукции методика предусматривает корректирующие воздействия на свойства исходной заготовки, режимы волочения, профилирования и термообработки. Результатом служат стабильные режимы холодной деформации на этапе получения периодического профиля и финишной термической обработки, обеспечивающие формирование заданных значений показателей качества и повышение конкурентоспособности высокопрочной арматуры диаметром 10,0 мм для железобетонных шпал.

Разработанные в результате исследований режимы реализованы на ОАО «Магнитогорский калибровочный завод», в условиях которого были выпущены опытно-промышленные партии высокопрочной арматуры по ТУ-14-125-704-96 диаметром 10,0 мм из сталей 40С2 и 55С2. В качестве исходной заготовки использовался отожженный подкат диаметром 13,0 мм. Волочение на размер под профилирование 11,2 мм осуществили за один переход на однократном стане 1/750. Профилирование холоднотянутой заготовки с временным сопротивлением разрыву 850 Н/мм^2 велось на промышленных скоростях с использованием клетки-волоки со смещенными парами валков, установленной в линию волочильного стана ИЗТМ 10-28, оборудованного устройством резки на мерную длину. Абсолютное обжатие в первой паре валков составляло 1,2 мм. Полученные арматурные прутки по геометрическим показателям качества и массе погонного метра полностью отвечали требованиям технических условий. Далее задача достижения требуемого уровня качества арматуры решалась термическим упрочнением профилированных прутков закалкой с последующим отпуском. Закалку образцов выполнили на установке УТВЧ, оснащенной двумя индукционными нагревателями и закалочным устройством. Питание установки током высокой частоты 4000 Гц осуществлялось от тиристорных преобразователей. Скорость движения прутков профилированной арматуры через индукционные нагреватели составляла 1,5 м/мин. Измерение температуры образцов производили оптическим пирометром. Температура нагрева под закалку для стали 40С2 составляла 940-950 °С, для стали 55С2 - 920-930 °С. Давление воды в сети

равнялось 3 -4 атм. Печной отпуск профилированных прутков вели на роликовой проходной печи в течение 30 минут при температуре $360 \pm 15^\circ \text{C}$ для стали 40C2 и $390 \pm 15^\circ \text{C}$ для стали 50C2A. Индукционный отпуск выполнили на установке УТВЧ, отключив один индуктор, при скорости движения металла 1,5 м/мин по следующим режимам: для стали 40C2- температура прутков на выходе из индуктора $500 \pm 10^\circ \text{C}$ продолжительность отпуска- 40 сек.; для стали 50C2A – $540 \pm 10^\circ \text{C}$ и 40 сек. Механические свойства полученной по разработанным режимам арматуры приведены в табл.2.

Таблица 2
Механические свойства высокопрочной арматуры диаметром 10,0 мм

Характеристика механических свойств	Среднее значение		Границы доверительного интервала			
			нижняя		верхняя	
Марка стали	40C2	55C2	40C2	55C2	40C2	55C2
Временное сопротивление разрыву σ_b , Н/мм ²	$\frac{1540}{1498}$	$\frac{1645}{1580}$	$\frac{1490}{1474}$	$\frac{1597}{1540}$	$\frac{1590}{1522}$	$\frac{1693}{1620}$
Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	$\frac{1388}{1351}$	$\frac{1483}{1424}$	$\frac{1343}{1328}$	$\frac{1410}{1378}$	$\frac{1430}{1369}$	$\frac{1506}{1448}$
Относительное удлинение после разрыва δ_{10} , %	$\frac{8,1}{8,0}$	$\frac{6,8}{6,4}$	$\frac{7,7}{7,8}$	$\frac{6,2}{6,0}$	$\frac{8,5}{8,2}$	$\frac{7,4}{6,8}$

Примечание: в числителе указаны значения для арматуры, подвергнутой печному отпуску, в знаменателе –индукционному при уровне значимости 0,05.

Из анализа результатов опытно-промышленной апробации было установлено, что расхождение между предсказываемыми математическими моделями и фактически полученными механическими свойствами арматуры не превышает 12%. Опытно-промышленная проверка показала, что разработанные режимы холодной пластической деформации и термообработки обеспечивают получение конкурентоспособной продукции с заданным комплексом показателей качества по ТУ-14-125-704-96. Важным аспектом апробации технических разработок явилось обоснование принципиальной возможности синхронного выполнения процессов закалки и отпуска по ускоренным режимам в поточных технологиях термического упрочнения арматурной стали. Для освоения промышленной технологии термического упрочнения высокопрочной арматуры диаметром 10,0 мм для железобетонных шпал разработаны рекомендации по составу оборудования специализированной поточной линии.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Предложена результативная схема производства высокопрочной арматуры диаметром 10,0 мм для армирования железобетонных шпал, состоящая из технологических блоков холодной пластической деформации и финишного термического упрочнения закалкой с отпуском.

2. На основе метода линий скольжения разработано программное обеспечение, позволяющее проектировать режимы получения заготовки под профилирование путем оценки и анализа уровня ее напряженного состояния в зависимости от технологических параметров процесса волочения с учетом специфики финишной термообработки.

3. Разработана модель управления геометрическими показателями качества арматуры в процессе холодного профилирования в клетчатой волоке со смещенными парами валков. На основе модели разработаны калибровки валков и режимы профилирования, обеспечивающие формирование требуемых геометрических показателей качества арматуры.

4. Получены математические модели оценки изменения механических свойств арматуры периодического профиля из кремнистых марок стали 40С2 и 55С2 при термическом упрочнении по схеме «закалка-отпуск». На базе моделей определены режимы финишной обработки, обеспечивающие получение требуемого качества готовой арматуры.

5. Разработаны технологические режимы изготовления арматуры диаметром 10,0 мм для железобетонных шпал, обеспечивающие формирование заданного уровня качества и повышение конкурентоспособности готовой продукции. На процесс получения холодной пластической деформации периодического профиля арматуры по ТУ-14-125-704-96 разработана технологическая карта ТК 176-МТ.ПР-112-2006.

6. Выпущены опытно-промышленные партии высокопрочной арматуры диаметром 10,0 мм из сталей 40С2 и 55С2. Даны рекомендации по составу оборудования специализированной поточной линии для промышленной реализации технологии термического упрочнения высокопрочной арматуры периодического профиля.

7. Разработана методика управления качеством высокопрочной арматуры железобетонных шпал диаметром 10,0 мм в гибком сочетании технологических блоков «холодная пластическая деформация»- «термическое упрочнение».

8. Результаты работы использованы в программе технического развития ОАО «ММК-МЕТИЗ» до 2010 г. по организации выпуска новых конкурентоспособных видов продукции с заданным уровнем качества.

9. Полученные в работе теоретические и практические результаты используются в учебном процессе ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова» при подготовке инженеров по специальности 200503 - «Стандартизация и сертификация» и 150106 - «Обработка металлов давлением».

Основные положения диссертации опубликованы в работах

1. Чукин В.В., Корчунов А.Г., Челищев В.Н. и др. Влияние поверхностной механической обработки на структуру и свойства калиброванного металла // Труды пятого конгресса прокатчиков. М.: Черметинформация, 2004. С. 410-412.
2. Чукин В.В., Корчунов А.Г., Челищев В.Н. Отработка технологических режимов производства высокопрочной арматуры для железобетонных шпал // Обработка сплошных и слоистых материалов. Вып. 30: Межвуз. сб. науч.тр. / Под ред. Г.С. Гуна.- Магнитогорск: МГТУ, 2004.-С. 115-118.
3. Корчунов А.Г.,Пивоварова,К.Г.,Челищев В.Н. Изменение механических свойств и шероховатости поверхности металла при обточке и калибровании // Производство проката.- 2004.- №9. С 31-33.**(рецензируемое издание)**
4. Корчунов А.Г., Челищев В.Н., Пивоварова К.Г. Развитие производства калиброванного металла со специальной отделкой поверхности // Теория и технология процессов пластической деформации-2004: Материалы докл. междунар.- науч.- техн. конф.- М. МИСиС, 2004.- С. 83-84.
- 5.Носов А.Д., Носков Е.П., Челищев В.Н и др. Исследование вариантов технологических процессов производства высокопрочной арматуры для железобетонных шпал // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова.- 2005.-№ 3. С.80-83.
6. Корчунов А.Г., Чукин В.В., Челищев В.Н. и др. Анализ возможности получения высокопрочной арматуры диаметром 10,0 мм для железобетонных шпал деформационным упрочнением // Вып. 32: Межвуз. сб. науч.тр. / Под ред. Г.С. Гуна.- Магнитогорск: МГТУ, 2005.-С. 94-98.
7. Корчунов А.Г., Чукин В.В., Челищев В.Н. Формирование потребительских свойств высокопрочной арматуры периодического профиля термическим и деформационным воздействием // Материалы 64 науч.техн. конф. по итогам НИР за 2005г.: Сб.докл.- Магнитогорск: МГТУ, 2006.- Т1. -С 62-63.
8. Корчунов А.Г., Чукин В.В. Челищев В.Н. и др. Оценка формирования качества высокопрочной стержневой арматуры для железобетонных шпал в технологиях термического и деформационного упрочнения //Производство проката.- №10.- 2006.- С. 19-21. **(рецензируемое издание)**
9. Носов А.Д., Носков Е.П., Челищев В.Н. и др. Формирование требований к качеству исходной заготовки для производства высокопрочной арматуры железобетонных шпал деформационным упрочнением // Обработка сплошных и слоистых материалов. Вып. 34: Межвуз. сб. науч.тр. / Под ред. Г.С. Гуна.- Магнитогорск: МГТУ, 2006.-С. 28-31.
10. Корчунов А.Г., Челищев В.Н., Андреев В.В. Технологические процессы производства высокопрочной арматуры периодического профиля для железобетонных шпал // Новые материалы и технологии-НТМ 2006. Материалы докл. всерос.- науч.- техн. конф. -М. МАТИ, 2006. Т1-С8-9.