

На правах рукописи



ЗИНКЕВИЧ МАКСИМ БОРИСОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОПРОЧНОГО АРМАТУРНОГО ПРОКАТА ИЗ
ФЕРРИТО-ПЕРЛИТНЫХ СТАЛЕЙ

Специальность 05.16.05 – “Обработка металлов давлением”

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2013

Работа выполнена в Национальном исследовательском технологическом университете “МИСиС” на кафедре “Пластическая деформация специальных сплавов” (ПДСС).

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Трусов Виталий Алексеевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор кафедры обработки металлов давлением
ФГБОУ ВПО “Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова”
Тулупов Олег Николаевич

кандидат технических наук,
заместитель генерального директора
по научно-производственной деятельности
ГНЦ ФГУП “ЦНИИчермет им. И.П. Бардина”
Галкин Михаил Петрович

Ведущая организация:

ОАО АХК ВНИИМЕТМАШ
им. академика А.И. Целикова

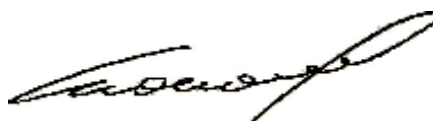
Защита состоится 19 июня 2013 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.132.09 при Национальном исследовательском технологическом университете “МИСиС” по адресу: 119049, Москва, Ленинский проспект, д.4, ауд. Б-607.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского технологического университета “МИСиС”.

Автореферат разослан 14 мая 2013 г.

Справки по телефону: (495) 955 01 27, электронной почте: pdss@misis.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ионов С.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Развитие производства сортового проката в настоящее время идет в направлении повышения показателей качества металлопродукции, увеличения производительности, совершенствования технологии с возможностью замены легированных и низколегированных сталей на экономнолегированные или углеродистые. Современный подход к увеличению производительности, снижению энергетических затрат и получению высокопрочного состояния мелкосортных профилей заключается во внедрении и развитии технологии многониточной прокатки при реализации “слиттинг-процесса” с последующей термической обработкой в потоке стана.

Совершенствование технологии необходимо выполнять на основе математических моделей, отражающих основные закономерности исследуемых явлений, позволяющих прогнозировать эффективность производства, микроструктуру, механические свойства, форму и точность размеров мелкосортного проката. Разработка математической модели чаще всего осуществляется на базе статистических и экспериментальных исследований по изучению влияния деформационно-скоростных, температурно-временных параметров процесса прокатки и последеформационного охлаждения на структуру и механические свойства профилей.

Цель работы и задачи исследования

Цель работы заключается в научно обоснованном совершенствовании технологии производства высокопрочного арматурного проката из феррито-перлитных сталей с заданными показателями качества.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка методики и проведение статистических и экспериментальных исследований по влиянию технологических параметров процесса горячей деформации и ускоренного охлаждения на показатели качества мелкосортных профилей.
2. Установление закономерности уширения металла при создании методики расчета деформационного режима многоручьевой прокатки с целью получения заданной точности мелкосортных профилей.
3. Разработка математической модели расчета и компьютерной системы проектирования технологических процессов горячей одно- и многониточной прокатки, последеформационного ускоренного охлаждения, структурообразования и формирования механических свойств мелкосортных профилей.
4. Совершенствование технологии прокатки и разработка новой конструкции установки последеформационного ускоренного охлаждения в потоке стана для производства высокопрочных свариваемых арматурных профилей из феррито-перлитных сталей.

Научная новизна работы

1. Установлены закономерности формирования зеренной структуры металла при горячей прокатке арматурных профилей в зависимости от величины степени, скорости и температуры деформации.
2. Выявлена закономерность поперечного течения металла, учитывающая форму очага деформации с помощью безразмерных параметров и особенности технологического процесса многоручьевой прокатки.
3. Разработана математическая модель, позволяющая определять технологические параметры процесса горячей сортовой прокатки и охлаждения феррито-перлитной стали, включающая расчет параметров микроструктуры и механических свойств, отличающаяся высоким уровнем приближения результатов расчета к требуемому комплексу показателей качества арматурных профилей.
4. Создана и реализована методика расчета технологических режимов производства сортового проката с заданными показателями качества в режиме высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) с распадом горячедеформированного аустенита, характеризующаяся возможностью корректировки деформационно-скоростных, температурно-временных параметров горячей прокатки и последеформационного охлаждения профилей в режиме “онлайн”.
5. На базе экспериментальных и теоретических исследований установлены основные закономерности влияния деформационно-скоростных, температурно-временных режимов горячей прокатки и последеформационного ускоренного интенсивного охлаждения на повышенный комплекс механических свойств арматурных профилей.

Практическая значимость работы

1. На основе разработанной математической модели создана компьютерная система проектирования технологических процессов одно- и многониточной горячей прокатки и последеформационного охлаждения, позволяющая рассчитать технологические режимы производства высокопрочного арматурного проката в условиях полунепрерывного стана 350/250 АО “Лиепаяс Металургс” (Латвия, г. Лиепая).
2. Впервые разработана, сконструирована, создана и реализована на стане 350/250 установка ускоренного охлаждения сортовых профилей с использованием хладагента с высокими относительными скоростями движения при прохождении проката, что позволяет повысить интенсивность охлаждения за счет поступательно-вращательного движения жидкости. Это позволяет расширить диапазон получаемых высоких механических свойств для широкого круга профилей или стабилизировать их от плавки к плавке (патент на полезную модель № 122047 (РФ), В21В 43/10 от 20.11.2012).

3. Разработаны и внедрены в производство новые технологические схемы получения высокопрочных профилей №12, №14, №16 класса А500С, А600С для армирования железобетонных конструкций в условиях полунепрерывного стана 350/250 АО “Лиепаяс Металургс” из углеродистой свариваемой стали СтЗсп, отвечающие требованиям ГОСТ Р 52544-2006, СТО АСЧМ 7-93, DIN 488-2009.

4. По разработанной технологии произведено 277 тыс. тонн высокопрочных арматурных профилей №12, №14 и №16, отвечающих требованиям классов А500С и А600С по СТО АСЧМ 7-93. Снижение себестоимости готовой продукции за счет увеличения средней часовой производительности стана на ~37 % и уменьшения условно-переменных затрат составляет 0,94 лат/т (1 лат = 57,4713 руб. по курсу ЦБ Латвии).

5. Результаты теоретических и экспериментальных исследований находят отражение при чтении лекций, проведении практических и семинарских занятий по курсам “Энергосберегающая технология в процессах ОМД”, “Совмещенные процессы в производстве проката”, “Проектирование технологических процессов ОМД и управление качеством продукции”, а также в КНИР и курсовом проектировании.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты статистических и экспериментальных исследований процесса формирования показателей качества мелкосортного арматурного проката из углеродистой и низколегированной стали с феррито-перлитной структурой.

2. Математическая модель и, разработанная на ее основе, компьютерная система проектирования технологических процессов производства мелкосортных профилей с заданной структурой и уровнем механических свойств.

3. Оригинальная установка термического упрочнения сортового проката с поступательно-вращательным принципом движения хладагента.

4. Технологические схемы получения периодических профилей для армирования железобетонных конструкций с высоким комплексом механических свойств класса А500С, А600С из свариваемой углеродистой стали в условиях АО “Лиепаяс Металургс”.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждались на следующих конференциях: 65-е дни науки студентов МИСиС: международные, межвузовские и институтские научно-технические конференции: – Москва, 2010; VIII международный конгресс прокатчиков: – Магнитогорск, 2010; XI International Scientific Conference “New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering”: – Czestochowa, 2010; 66-е дни науки студентов МИСиС: международные, межвузовские и институтские научно-технические конференции: – Москва, 2011; Международная научно-техническая конференция “Современные металлические материалы и технологии”: – Санкт-

Петербург, 2011; Международная научно-техническая конференция “Инновационные технологии обработки металлов давлением”, посвященная 100-летию со дня рождения проф. д.т.н., академика АН КазССР П.И. Полухина: – Москва, 2011; XII International Scientific Conference “New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering”: – Czestochowa, 2011; Международная научно-техническая конференция “Научно-технический прогресс в металлургии”: – Темиртау, 2011; 67-е дни науки студентов МИСиС: международные, межвузовские и институтские научно-технические конференции: – Москва, 2012; XIII International Scientific Conference “New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering”: – Czestochowa, 2012; II Международная научно-техническая конференция “Машины и пластическая деформация металлов”: – Запорожье, 2012.

Публикации

Основное содержание диссертации отражено в 11 печатных работах, из них 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК для опубликования результатов кандидатских и докторских диссертаций, и в 1 патенте на полезную модель.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов, 60 рисунков, 54 таблиц, 4 приложений, изложена на 170 страницах; библиографический список содержит 109 наименований источников российских и зарубежных изданий.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во введении дано обоснование актуальности темы, отражена цель, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе рассмотрены требования российских и зарубежных стандартов к показателям качества сортовых профилей. Проведен анализ работ, посвященных влиянию легирования стали и изменения технологических параметров процесса одно- и многониточной прокатки с последующим охлаждением на эффективность производства, формирование показателей качества свариваемых арматурных профилей по точности размеров и механическим свойствам. Проанализированы особенности структурообразования и формирования прочностных и пластических свойств сортового проката при высокотемпературной термомеханической обработке. Сделаны выводы о современном состоянии вопроса исследования, сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе приведена методика экспериментальных исследований по влиянию технологических параметров прокатки и ускоренного охлаждения на показатели качества сортовых профилей из свариваемых углеродистых и низколегированных сталей, которые в своей основе образуют марочный сортамент станов 350 и 350/250 АО “Лиепаяс Металургс”, включающие оценку точности размеров, структуры и механических свойств. В качестве основного объекта статистического анализа и экспериментальных исследований выбраны фер-

рито-перлитные стали марки 10Г2, Ст3Гпс, Ст3сп, 25Г2С и 35ГС с углеродным эквивалентом, в соответствии с ГОСТ Р 52544-2006, не превышающим верхний предел в 0,50 %. Оценено комплексное влияние концентрации с нижней до верхней границы следующих химических элементов – углерода, марганца, кремния в стали в пределах марочного и температуры окончания ускоренного охлаждения на механические свойства мелкосортных профилей.

Определение влияния ускоренного охлаждения на структуру и механические свойства проката проводили на специально разработанном, спроектированном и реализованном устройстве путем поочередного сравнения интенсивности охлаждения арматурных профилей, где движение воды в камере охлаждения осуществляется поступательно-вращательным способом (рисунок 1). Интенсивность охлаждения оценивали посредством измерения глубины мартенситного слоя поверхности проката после электроконтактного нагрева штанг и последующего термического упрочнения, в зависимости от времени охлаждения в устройстве и температуры окончания ускоренного охлаждения. Варьирование скоростью движения проката осуществляется изменением скорости подачи арматурных профилей трайб-аппаратом.

Испытания проката на статическое растяжение, по три образца на режим, выполнены на универсальных машинах по методике, приведенной в ГОСТ 1497-84 по различным схемам нагружения. Информация, полученная в результате экспериментальных исследований, подвергалась статистической обработке.

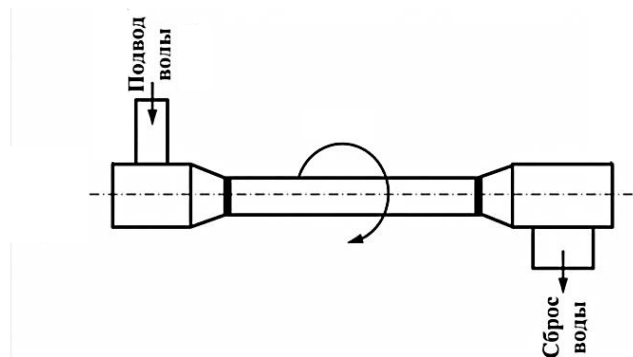


Рисунок 1 – Схема камеры охлаждения проходного типа с принудительным вращением охладителя

В третьей главе приведена впервые разработанная математическая модель процесса горячей сортовой одно- и многониточной прокатки с последующим последеформационным охлаждением. С использованием регрессионного анализа получена зависимость для определения величины уширения (β) при разработке деформационного режима горячей прокатки, описывающая форму очага деформации с помощью безразмерных параметров и учитывающая особенности многоручьевого процесса:

$$\beta = 0,910 \cdot \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^{0,351} \left(\frac{h_0}{D}\right)^{-0,064} \left(\frac{A_0 h_k b_k}{A_k h_0 b_0}\right)^{0,270} \left(\frac{b_k}{b_0}\right)^{0,051} \left(\frac{h_0}{b_0}\right)^{0,106} \left(\frac{ln_0}{ln_k}\right)^{-0,050} \left(\frac{b \partial_k}{b \partial_0}\right)^{-0,054} \left(\frac{hn_0}{hn_k}\right)^{0,100}, \quad (1)$$

где h_0/h_1 – коэффициент обжатия по дну калибра; h_0/D – относительный диаметр валков; A_0 – площадь поперечного сечения подката; A_k – площадь поперечного сечения калибра без учета зазора между валками; h_k и b_k – высота без учета зазора между валками и ширина калибра; b_k/b_0 – простор на уширение; h_0/b_0 – отношение осевых размеров, задаваемой в калибр полосы; ln_0 , bd_0 , hn_0 – ширина перемычки и дна, осевая высота перемычки, задаваемой в калибр полосы; ln_k , bd_k , hn_k – ширина перемычки и дна, осевая высота перемычки калибра. Химический состав прокатываемой стали должен соответствовать следующим значениям: $C \leq 0,28 \%$; $Mn = 0,4-0,8 \%$; $Si = 0,15-0,30 \%$.

Все типы калибров объединены в две группы: первого (рисунок 2–а, в) – границы которых описываются линейными функциями и второго порядка (рисунок 2–б, г) – с границами, определяемыми линейными и квадратичными функциями. Как показывает уравнение (1), для определения величины уширения металла, при известных (h_0 , b_0) и варьируемых компьютерной системой (s , bk , bd , ln , hn , геометрической высоте и ширине (h_{mn} и b_{mn})), неизвестным остается только площадь поперечного сечения калибра ($A_k = \int_{x_1}^{x_n} f(x)dx$). Остальные параметры, входящие в равенство (1), изменяются компьютерной системой от минимального до максимального, с определенным шагом, исходя из ограничений.

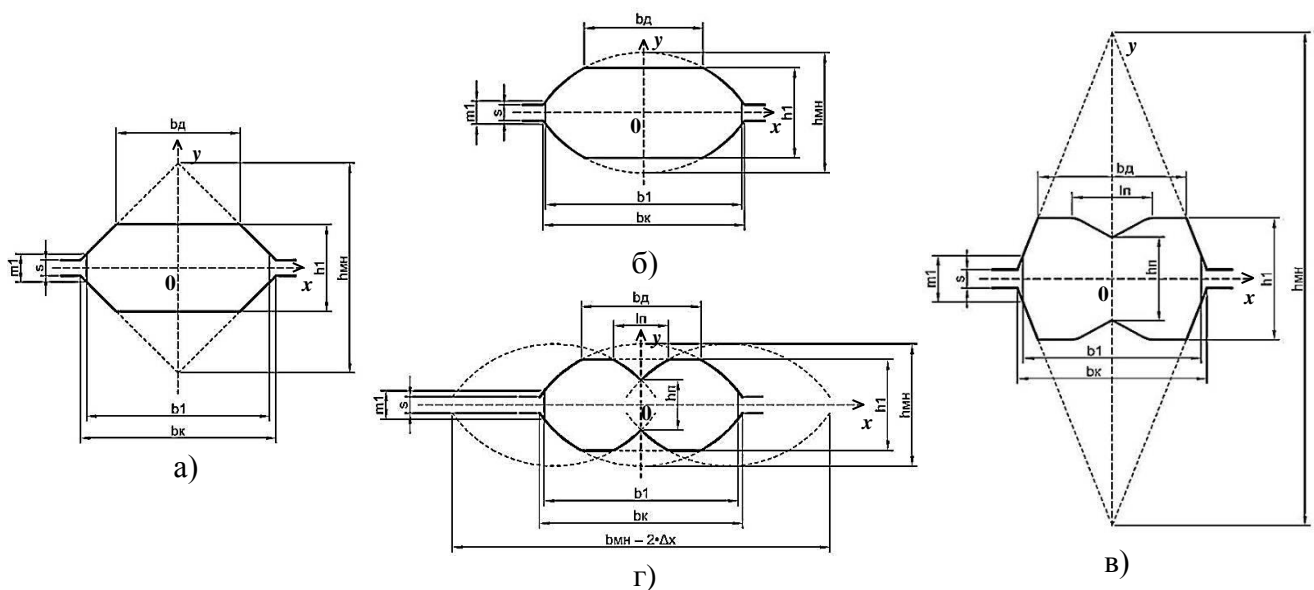


Рисунок 2 – Калибры одноручьевые: а – первого; б – второго порядка и двухручевые: в – первого; г – второго порядка (Δx – корень квадратичного уравнения, описывающего границу калибра)

По найденной величине уширения (β) находится ширина раската после деформации в калибрах ($b_1 = b_0 \cdot \beta$) и притупление металла (ml).

Температурное поле, как в очаге деформации, так и в межклетевом промежутке находится, при решении нестационарной задачи теплопроводности методом контрольного объема. Численное решение представляет собой набор значений температуры (T) по сечению ме-

талла, приведенном на рисунке 3-а, в каждой узловой точке объема (рисунок 3-б), где q – плотность теплового потока; c – теплоемкость металла; ρ – плотность стали; k – коэффициент теплопроводности металла. h_6 и h_{cp} – коэффициент теплоотдачи валкам и окружающей среде; T_6 и T_{cp} – температура валков и окружающей среды.

$$\rho c \int_{t_0}^t \int_{y_0}^y \int_{x_0}^x \frac{\partial T}{\partial t} dt dx dy = \rho c \Delta y \Delta x (T_p^1 - T_p^0), \text{ где верхние индексы 1 и 0 означают новые (неизвестные) и старые (заданные) соответственно значения температуры в узле Р (рисунок 3-б).}$$

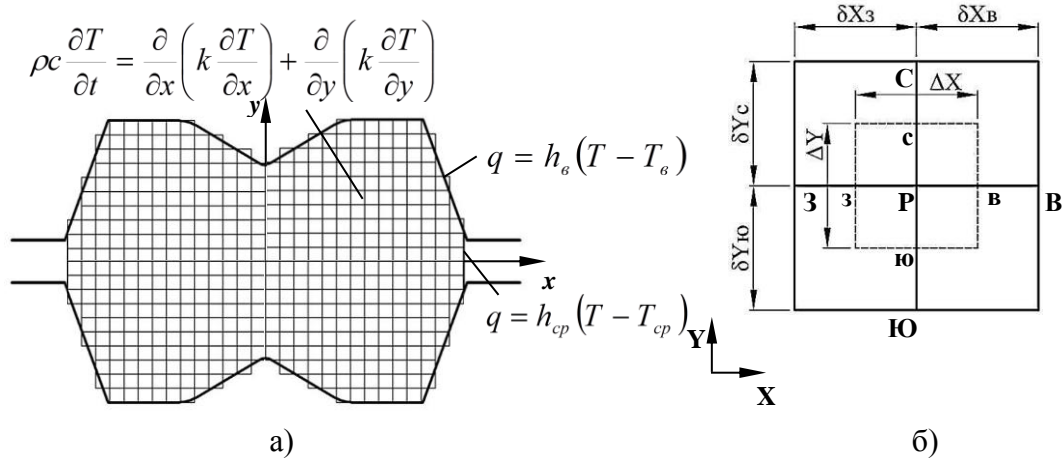


Рисунок 3 – Дискретная область с граничными условиями (а) и контрольный объем (область, ограниченная пунктирной линией) (б)

Рассматривая полностью неявную схему, предполагается, что $\int_t^{t+\Delta t} T_p dt = T_p^1 \Delta t$, тогда

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{y_0}^y \int_{x_0}^x \frac{\partial}{\partial t} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) dx dy dt = \left[\left(\frac{k_6(T_B^1 - T_P^1)}{\delta X_6} - \frac{k_3(T_P^1 - T_3^1)}{\delta X_3} \right) \Delta Y + \left(\frac{k_c(T_C^1 - T_P^1)}{\delta Y_c} - \frac{k_{ю}(T_P^1 - T_{ю}^1)}{\delta Y_{ю}} \right) \Delta X \right] \Delta t.$$

Двумерный дискретный аналог записывается в следующем виде:

$$a_P T_P = a_B T_B + a_3 T_3 + a_C T_C + a_{ю} T_{ю} + b, \quad \text{где} \quad a_B = \frac{k \Delta Y}{\delta Y}; a_3 = \frac{k \Delta Y}{\delta X}; a_C = \frac{k \Delta X}{\delta Y}; a_{ю} = \frac{k \Delta X}{\delta Y};$$

$$b = a_P^0 T_P^0; a_P^0 = \frac{(\rho c)_P \Delta X \Delta Y}{\Delta t}; a_P = a_B + a_3 + a_C + a_{ю} + a_P^0; \Delta t - \text{временной интервал.}$$

В ходе технологического процесса обработки металлов теплообмен между поверхностью проката и окружающей средой значительно изменяется. Коэффициент теплоотдачи h (Вт/м²·К) в камере с поступательно-вращательным движением воды в устройствах ускоренного охлаждения движущегося проката, определяется из следующего выражения:

$$h = 4,2 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{k_6 d_{np}}{v_6^2} \left[\left(\frac{V_{ном} d_{\kappa}}{d_{np}} \right)^2 + \left(\frac{V_{вращ} d_{\kappa}}{2} \right)^2 + \left(\sqrt{V_{ном}^2 + \left(\frac{V_{вращ} d_{np}}{2} \right)^2} - V_{np} \right)^2 \cdot \left(\frac{v_6}{v_{нас}} \right)^2 \right],$$

где k_{θ} , ν_{θ} – теплопроводность (Вт/м·К) и кинематическая вязкость воды ($\text{м}^2/\text{с}$), отнесенные к средней температуре воды в камере охлаждения; $\nu_{\text{нас}}$ – кинематическая вязкость воды ($\text{м}^2/\text{с}$) в пограничном слое с металлом, отнесенная к температуре насыщения при среднем давлении воды по длине камеры; $d_{\text{пр}}$, $d_{\text{к}}$ – диаметр проката (м) и камеры охлаждения (м); $V_{\text{пост}}$ – скорость поступательного движения охладителя (м/с); $V_{\text{вращ}}$ – скорость вращательного движения охладителя (рад/с); $V_{\text{пр}}$ – скорость прокатки (м/с).

При определении структурных составляющих, непосредственно во время прокатки, учитывается процесс динамической, после деформации – статической рекристаллизации и роста зерна до начала фазового превращения вследствие охлаждения.

В четвертой главе показаны результаты экспериментальных исследований и разработанная компьютерная система проектирования технологических процессов одно- и многониточной горячей прокатки и последеформационного охлаждения, позволяющая проектировать новые и выявлять резервы совершенствования действующих технологий производства арматурных профилей с заданными показателями качества.

При определении точности разработанного метода расчета деформационного режима при горячей сортовой многониточной прокатке осуществлена проверка сходимости Δ , приведенная в таблице 1, расчетных значений ширины раската в компьютерной системе с результатами, полученными путем горячей прокатки профилей различных диаметров из углеродистой стали марки СтЗсп из подката квадратной формы поперечного сечения.

Таблица 1 – Результаты сравнения расчетной (b_1 расч.) и полученной экспериментальным путем (b_1 эксп.) ширины раската при прокатке в двухручьевых калибрах

h_0 , мм	b_0 , мм	h_1 , мм	$h_{\text{к}}$, мм	$b_{\text{к}}$, мм	$b_{\text{до}}$, мм	$h_{\text{п0}}$, мм	$l_{\text{п0}}$, мм	$b_{\text{дк}}$, мм	$h_{\text{пк}}$, мм	$l_{\text{пк}}$, мм	β	b_1 расч., мм	b_1 эксп., мм	Δ , %
Калибр с ручьями ящичной формы														
11	11	10	9	12,4	11	10	5,5	9,9	6	5,7	1,288	14,2	13,3	6,8
10	13,3	9,8	8,8	13,8	9,9	6	5,7	7	2	7	1,345	17,9	17,0	5,3
Калибр с ручьями круглой формы														
25	25	17,8	14,8	37	24	23	8	18,2	8	18,2	1,262	31,6	33,8	6,5
17,8	33,8	17,2	16	39,6	18,2	8	18,2	20,3	1,2	20,3	1,023	34,6	37,1	6,7
22,4	22,4	15	12	31,1	22,4	21,4	7,5	15,5	7,5	15,5	1,269	28,4	29,2	2,7
15	29,2	14,7	13,5	33,8	15,5	7,5	15,5	17,4	1,2	17,4	1,019	29,8	31,8	6,3

Примечание: h_0 и b_0 – высота и ширина исходной заготовки; h_1 и $h_{\text{к}}$ – высота раската после прохода и калибра без учета межвалкового зазора; $b_{\text{к}}$ – ширина калибра; $b_{\text{дк}}$, $b_{\text{до}}$ – ширина дна калибра и исходной заготовки; $h_{\text{п0}}$, $h_{\text{пк}}$ – высота перемычки исходной заготовки и калибра; $l_{\text{п0}}$, $l_{\text{пк}}$ – ширина перемычки исходной заготовки и калибра; β – коэффициент уширения,

найденный по уравнению (1); b_1 расч. = $b_0 \cdot \beta$; $\Delta = \frac{|b_1 \text{ эксп.} - b_1 \text{ расч.}|}{b_1 \text{ эксп.}} \cdot 100\%$

Как свидетельствуют данные таблицы 1, ошибка результатов расчета деформационного режима при прокатке в двухручьевых калибрах находится в пределах 3–7 %.

Анализ структурного состояния углеродистой стали Ст3сп свидетельствует, что, в отличие от скорости деформации, температурные условия прокатки являются одним из основных определяющих факторов ВТМО в достижении требуемого уровня свойств, при неизменном деформационном режиме. Результаты исследования по влиянию технологических параметров прокатки на размер зерна аустенита приведены на рисунке 4.

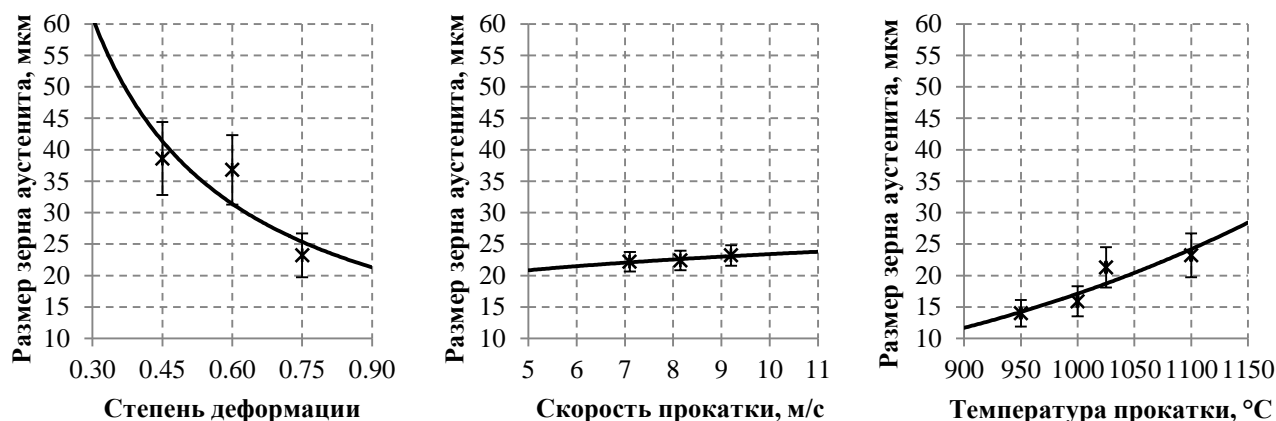


Рисунок 4 – Влияние технологических параметров горячей прокатки на размер зерна аустенита

Исследования показали, что значение в процессах структурообразования имеет значение и контролирование температурных условий прокатки и охлаждения.

Согласно рисунку 5–а, требования класса прочности А-II по ГОСТ 5781-82 горячекатаных арматурных профилей при содержании углерода – 0,22 % в стали гарантированно достигаются при концентрации марганца не менее 0,65 % и кремния – 0,35 %.

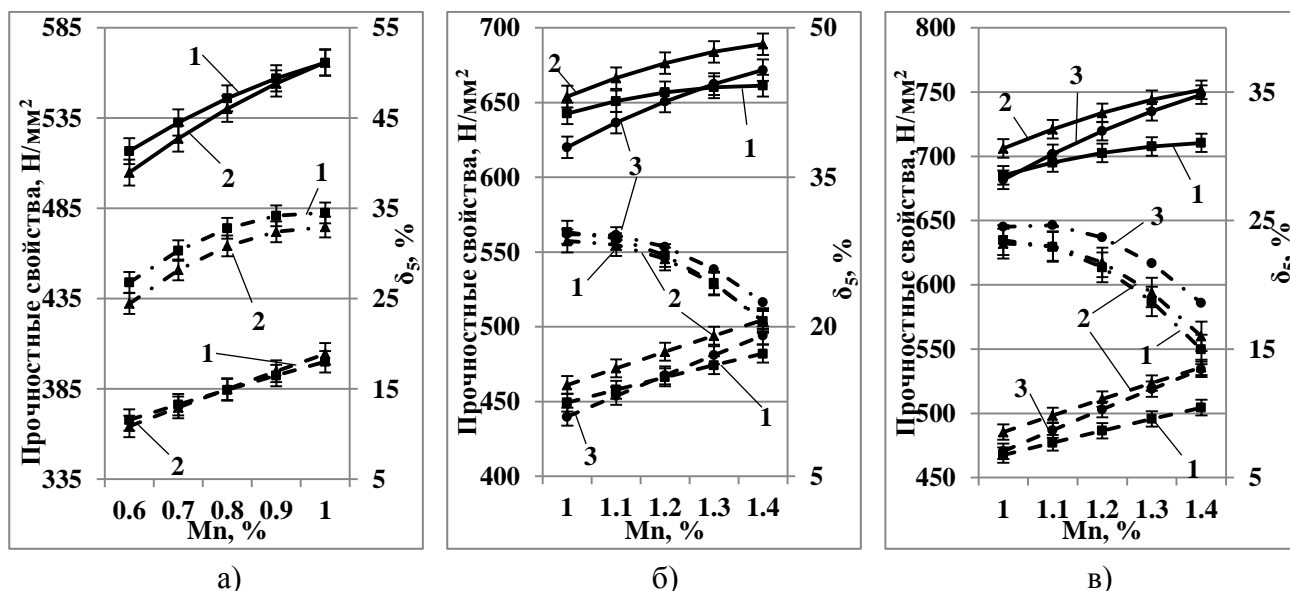


Рисунок 5 – Влияние химического состава на механические свойства профилей:
— σ_b , --- σ_t , ... δ_5 ; а – 0,22% С; б – 0,30% С; в – 0,37% С; 1 – 0,35% Si; 2 – 0,55% Si; 3 – 0,75% Si

При увеличении количества углерода в стали до 0,30 %, что соответствует нижнему пределу для ограниченно свариваемой стали 35ГС, и концентрации марганца и кремния не

менее 1 % и 0,35 % соответственно, обеспечиваются требования класса прочности А-III (рисунок 5–б), равно как и при использовании стали 25Г2С. Получения высокопрочного состояния А-IV по ГОСТ 5781-82 путем легирования стали 35ГС, содержащей 0,37 % углерода, марганцем и кремнием является недостаточным (рисунок 5–в).

Экономически наиболее рациональным способом достижения высокопрочного состояния стали является производство периодических профилей с наименьшей долей легирующих элементов из углеродистых сталей при ускоренном охлаждении проката в потоке стана. В работе проведено исследование по влиянию температуры окончания ускоренного охлаждения арматурного проката из углеродистой и низколегированной стали различных, в пределах ГОСТ 380-2005 химических композиций, профилей диаметром от 8 до 16 мм на изменение предела текучести ($\sigma_{0,2}$), временного сопротивления разрыву (σ_B) и относительного удлинения (δ_5) при температуре окончания деформации 1000 °С. Ускоренное охлаждение проводили до 610–650 °С. После достижения указанной температуры металл охлаждался на воздухе. Результаты исследования приведены на рисунке 6.

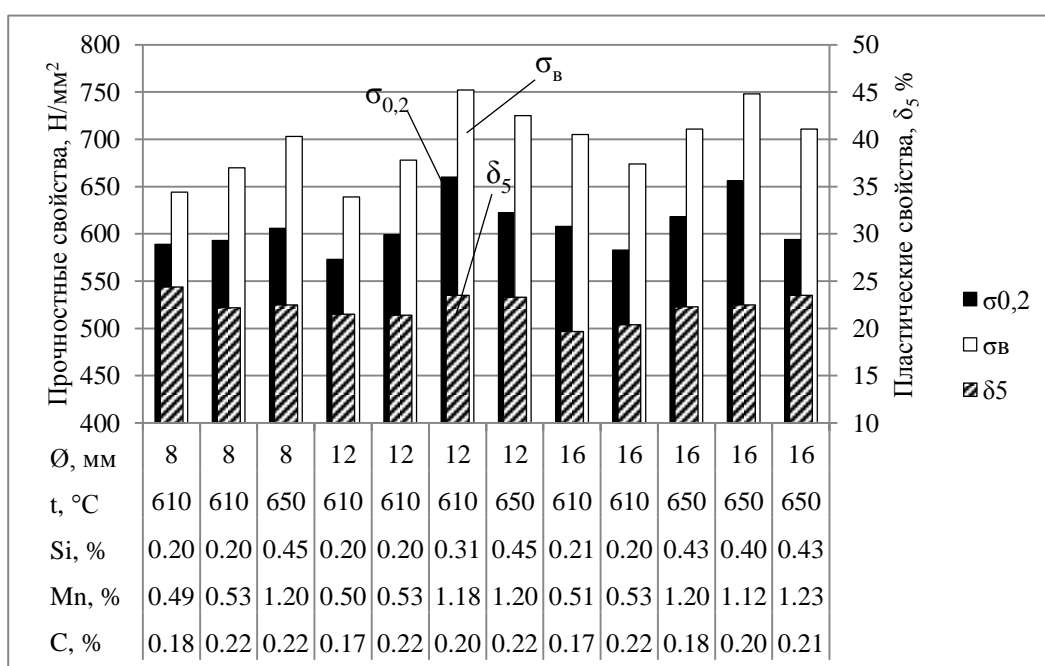


Рисунок 6 – Влияние углерода (C), марганца (Mn), кремния (Si) и температуры окончания ускоренного охлаждения (t) на механические свойства профилей различного диаметра (Ø)

Как показывают исследования, для производства арматурных профилей класса прочности А500С достаточно использовать углеродистую сталь Ст3сп, с соблюдением температурного режима окончания ускоренного охлаждения в 650 °С. Для получения высокопрочного арматурного проката класса А600С с сохранением повышенной пластичности δ_5 равной 14 %, отвечающей требованиям класса А500С по СТО АСЧМ 7-93, достаточно, при производстве термоупрочненных арматурных профилей, использовать сталь марки 25Г2С по ГОСТ 5781-82 с соблюдением температурного режима окончания ускоренного охлаждения в 610 °С, для профилей размером от 12 до 16 мм.

В данной работе приведены рассчитанные с помощью компьютерной системы различные режимы охлаждения арматурных профилей диаметром 16 мм из углеродистой стали Ст3сп. Исходные данные и результаты расчета приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Исходные данные и результаты расчета параметров микроструктуры и механических свойств

Исходные данные	Технологический режим	I	II	III
	Прокатываемый материал	Ст3сп		
	Диаметр готового профиля, мм	16		
	Температура нагрева металла, °С	1100		
	Температура окончания деформации, °С	1000		
Результаты расчета	Температура окончания ускоренного охлаждения, °С	610	560	510
	Диаметр зерна аустенита, мкм	25,3	25,3	25,3
	Доля феррита, %	71,7	64,9	61,0
	Диаметр зерна феррита, мкм	4,4	4,3	3,9
	Доля перлита, %	28,3	35,1	39,0
	Межпластиночное расстояние феррито-карбидной смеси, мкм	0,22	0,20	0,14
	Доля мартенсита от всего количества структурных составляющих, %	35,1	37,1	42,0
	Временное сопротивление разрыву, Н/мм ²	701	739	810
	Предел текучести, Н/мм ²	581	613	702
	Относительное удлинение δ_5 , %	18,4	15,9	13,9

Установлено, что понижение температуры окончания ускоренного охлаждения до 560 °С приводит к повышению прочностных свойств, но требования класса прочности А600С по СТО АСЧМ 7-93 к временному сопротивлению не достигаются. Дальнейшее снижение температуры окончания охлаждения до 510 °С приводит к изменению пластических свойств арматурного проката до 13,9 % – неудовлетворяющих требованиям класса А500С.

Проведенные экспериментальные исследования влияния деформационных, скоростных и температурных параметров ВТМО позволили установить закономерности формирования структуры и механических свойств углеродистой стали Ст3сп. Оценка влияния параметров ВТМО позволила определить технологические параметры и направление их изменения, наиболее существенно влияющие на структуру и механические свойства. Проверка корректности результатов расчета процессов горячей одно- и многониточной прокатки и последовательного охлаждения показала, что математическая модель в пределах допустимой ошибки 10 % адаптирована к реальным технологическим процессам.

В пятой главе приведены результаты опытно-промышленного исследования внедрения технологий, разработанных с помощью компьютерной системы, на основе математической модели, в условиях комбинированного полунепрерывного прокатного стана 350/250. Рассчитаны деформационно-скоростные и температурно-временные параметры прокатки периодических профилей №12, №14 и №16. На рисунке 7, в качестве примера, приведена калибровка валков для производства арматурного профиля №12.

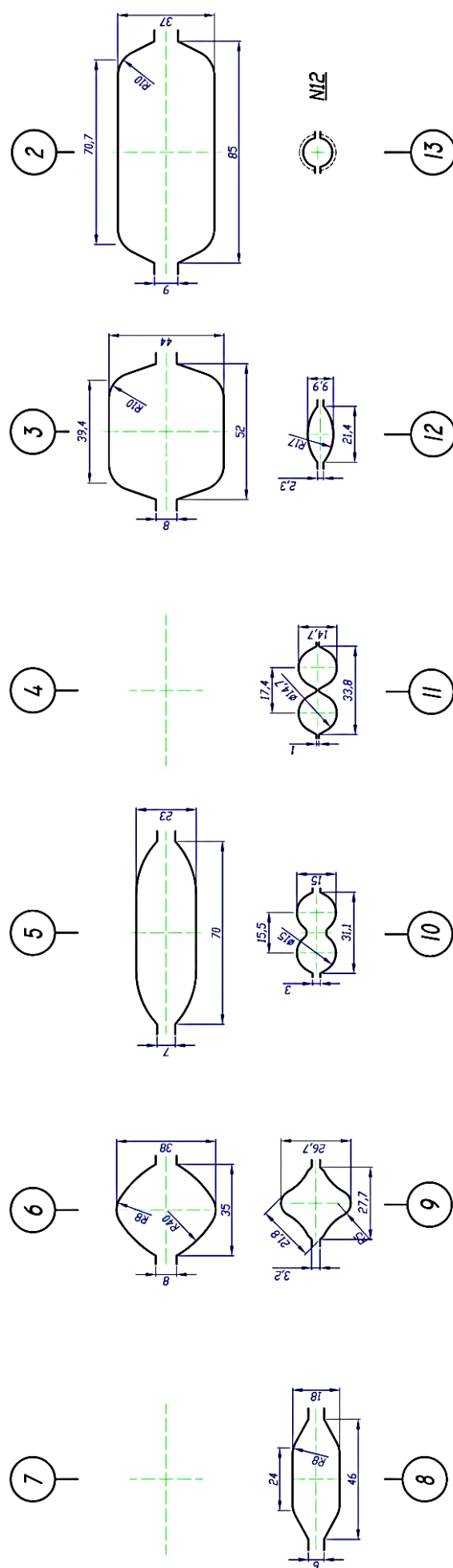


Рисунок 7 – Калибровка валков для прокатки-разделения арматурного профиля диаметром 12 мм (в круге указан номер клетки) из подката квадратного сечения 66×66 мм

В отличие от действующей технологии, применение процесса многоручьевой прокатки-разделения позволяет сократить число проходов на 2 (без клетей №4 и №7). Деформационный, скоростной, температурный режим и энергосиловые параметры прокатки арматурных профилей №12 из стали марки СтЗсп на стане 350/250 с продольным делением раската приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Деформационный, скоростной, температурный режим и энергосиловые параметры прокатки арматурного профиля №12 из стали СтЗсп

№	n	H ₀ мм	B ₀ мм	F ₀ мм ²	H ₁ мм	B ₁ мм	F ₁ мм ²	s мм	T _{пр} °C	v _{пр} м/с	μ	α _з °	n _в мин ⁻¹	σ _s Н/мм ²	P кН	M _{пр} кН·м	η _{ред}	N _{дв} кВт
2	1	66,0	66,0	4270,0	37,0	82,0	2884,0	9,0	1000	0,79	1,481	22	38	110,8	757,6	56,04	3,97	219
3	1	82,0	37,0	2884,0	44,0	51,0	2015,0	8,0	1001	1,14	1,431	25	55	117,2	515,4	41,99	3,16	238
5	1	44,0	51,0	2015,0	23,0	68,0	1390,0	7,0	997	1,65	1,450	18	76	131,3	704,1	43,50	2,02	341
6	1	68,0	23,0	1390,0	38,0	34,0	944,0	8,0	996	2,42	1,472	22	114	133,7	329,9	21,70	1,00	255
8	1	34,0	38,0	944,0	18,0	46,0	695,0	6,0	981	3,29	1,358	16	151	153,6	528,9	27,85	1,00	433
9	1	46,0	18,0	695,0	26,7	26,0	423,0	3,2	980	5,41	1,643	18	251	159,9	255,3	12,40	1,00	320
10	1	21,8	21,8	423,0	15,0	30,0	362,0	3,0	985	6,32	1,169	10	290	151,2	199,4	6,70	1,00	200
11	1	15,0	30,0	362,0	14,7	32,0	347,0	1,0	982	6,60	1,043	2	303	65,2	17,6	0,14	1,00	4
12	2	14,7	15,5	173,0	9,9	19,0	153,0	2,3	971	7,46	1,131	11	529	172,8	206,9	4,73	1,00	257
13	2	19,0	9,9	153,0	12,0	12,0	113,0	1,5	973	10,10	1,354	13	722	183,9	162,8	4,39	1,00	325

Примечание: № – номер клетки; n – число одновременно прокатываемых ниток; H₀, B₀, F₀ и H₁, B₁, F₁ – высота, ширина, площадь раската до и после прохода соответственно; s – межвалковый зазор; T_{пр} и v_{пр} – средняя по сечению температура и скорость прокатки; μ – коэффициент вытяжки; α_з – угол захвата металла валками; n_в – число оборотов валков; σ_s – сопротивление металла деформации; P и M_{пр} – усилие и момент прокатки; η_{ред} – передаточное число редуктора; N_{дв} – мощность, развиваемая двигателем

Отклонение фактических размеров раската от рассчитанной калибровки валков для прокатки арматурных периодических профилей №12 не превышает допустимого значения в 7 %. В частности, высота и ширина профилей после продольного деления в клетях 11 отличается от размеров проката, получаемых по действующей на стане схеме производства на 4 %.

Как свидетельствуют гистограммы, приведенные на рисунке 8, отражающие распределение коэффициентов вытяжек и углов захвата металла валками по проходам равномерно, как при действующей за 12 проходов, так и при разработанной технологии производства арматурного проката №12 за 10 проходов. Данные, приведенные на рисунке 9, указывают, что усилие и мощность, развиваемая двигателем, при прокатке арматурных профилей №12 по разработанной технологии, снижены и распределены равномерно.

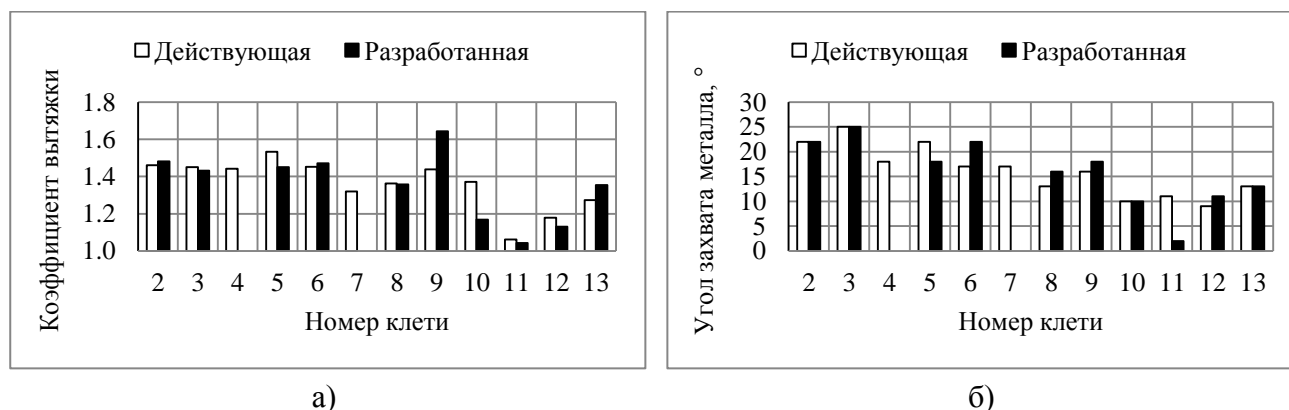


Рисунок 8 – Сравнение коэффициентов вытяжек (а) и углов захвата (б) при прокатке арматурных профилей №12 по действующей и разработанной технологии

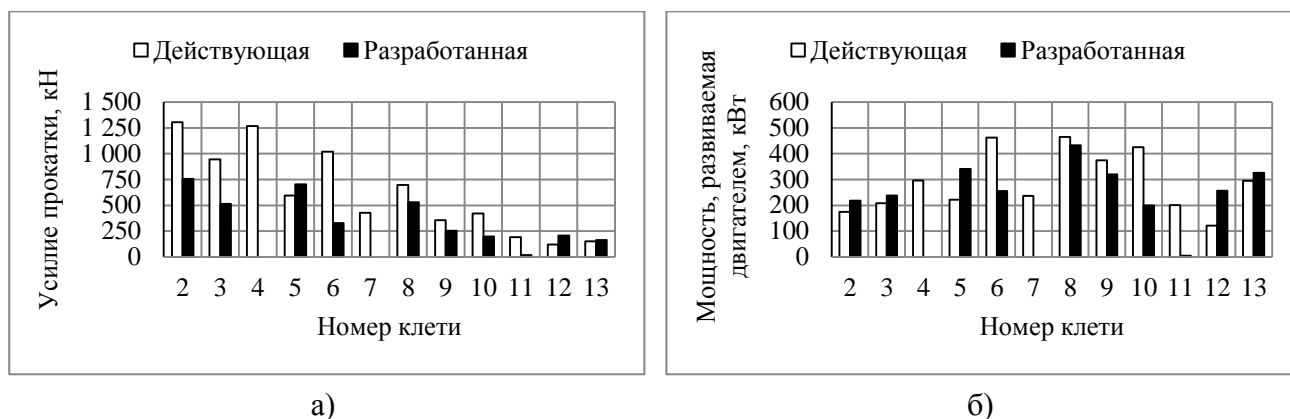


Рисунок 9 – Сравнение усилий (а) и мощности, развиваемой двигателем (б) при прокатке арматурных профилей №12 по действующей и разработанной технологии

Проведены статистические исследования по наличию поверхностных и внутренних дефектов на прокатанных профилях. По результатам проверки 700 тонн продукции (7-ми плавок) дефектов не обнаружено.

Исследования структуры поверхностного слоя проката (рисунок 10–а), термически упрочненного с температуры 950 °С с применением технологии принудительного вращения охладителя в устройстве и при поступательном движении воды в установке показали, что критические скорости охлаждения достигнуты на глубине на 0,26 мм (22 %) большей при винтовом движении охладителя.

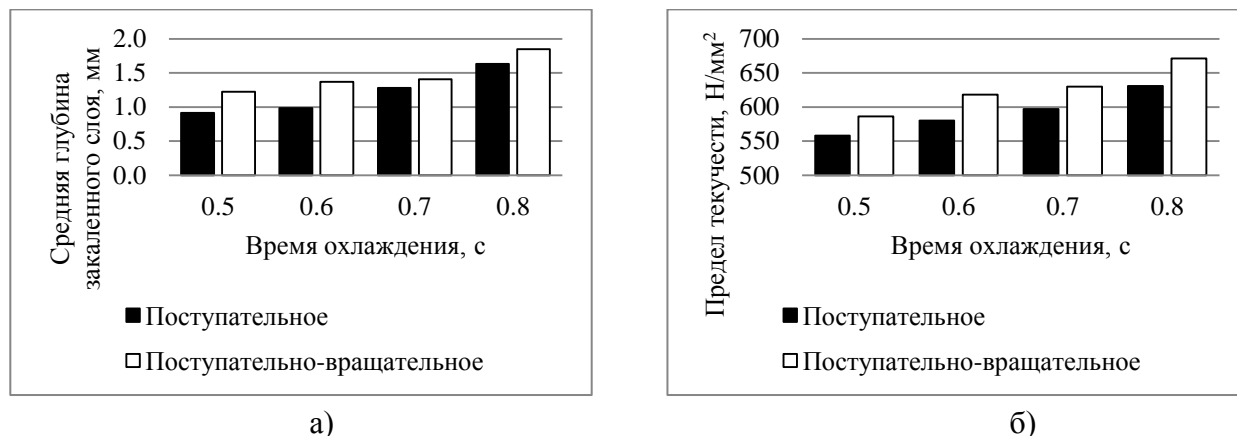


Рисунок 10 – Сравнительный анализ предела текучести (а) и глубины закаленного поверхностного слоя (б) образцов Ø 16 мм из стали марки Ст3сп

При поступательно-вращательном движении воды отклонения глубины мартенситного слоя от среднего значения на 0,027 мм (12 %) меньше, чем при поступательном движении воды.

Как показывают результаты исследования, приведенные на рисунке 10–б, при ускоренном охлаждении сортового проката с применением технологии принудительного вращения воды в устройстве термоупрочнения, происходит существенное повышение предела текучести проката, вплоть до требуемого классом А600С по СТО АСЧМ 7-93, при незначительном снижении пластических свойств. Указанный уровень прочности арматурных профи-

лей из углеродистой стали СтЗсп удалось достичь при использовании уникального прямо- точного устройства проходного типа для охлаждения движущегося проката водой с прину- дительным вращением охладителя внутри камеры. Это приводит к интенсификации отвода тепла от поверхности движущегося проката.

Исследованиями установлено, что на интервале температур от 490 до 610 °С и скоро- сти охлаждения от 460 до 510 °С/с пластические свойства сортовых профилей диаметром до 16 мм из стали СтЗсп соответствуют требованию класса прочности А600С по СТО АСЧМ 7- 93. По результатам испытаний на растяжение построены зависимости, отражающие влияние температурно-временных параметров ускоренного охлаждения проката до 650 °С и ниже на комплекс прочностных свойств. Кривые 1 и 2, приведенные на рисунке 11, отражают влия- ние скорости и температуры окончания ускоренного охлаждения на предел текучести и вре- менное сопротивление проката.



Рисунок 11 – Влияние ускоренного охлаждения на структуру и механические свойства арматурного проката диаметром до 16 мм из углеродистой стали:

1 – температура окончания ускоренного охлаждения, °С; 2 – скорость охлаждения, °С/с

Установлено, что достичь, требуемых классом прочности А600С по СТО АСЧМ 7-93 значений предела текучести ($\sigma_{0,2}$), возможно в диапазоне температур окончания термического упрочнения от 470 до 560 °С. Скорость охлаждения должна быть не ниже критической для закалки стали марки СтЗсп на мартенсит. Кривые 2 показывают, что минимальная скорость охлаждения составляет 410 °С/с. Установлено, что достижение высоких значений временного сопротивления разрыву (σ_B) возможно при соблюдении температурного режима от 470 до 520 °С при скорости охлаждения от 410 до 460 °С/с.

Данные, приведенные на рисунке 11 свидетельствуют, что диапазоны изменений скорости и температуры окончания ускоренного охлаждения для достижения значений $\sigma_B > 740 \text{ Н/мм}^2$ ($\Delta_{2,4}$) оказались более узкими, по сравнению с возможностью варьирования температурно-временными параметрами термического упрочнения проката с $\sigma_{0,2} > 600 \text{ Н/мм}^2$ ($\Delta_{1,3}$). Поэтому ускоренное охлаждение профилей следует вести с температуры 950 до 520 °С со скоростью 460 °С/с.

В таблице 4 отражено сравнение механических свойств и количества перлита и феррита в структуре арматурных профилей диаметром 12 мм, произведенных по действующей и предложенной технологии.

Таблица 4 – Сравнение механических свойств и количества структурных составляющих арматурных профилей №12, произведенных по действующей и предложенной технологии

Технология	Феррит+карбид / феррит, %	Предел текучести ($\sigma_{0,2}$), Н/мм ²	Временное сопротивление (σ_B), Н/мм ²	$\sigma_B/\sigma_{0,2}$	Относительное удлинение (δ_5), %
Действующая	20/80	558	627	1,12	21,3
Предложенная	40/60	687	769	1,12	19,0

Из таблицы 4 видно, что содержание феррито-карбидной смеси в структуре профилей, произведенных по предложенной технологии, в 2 раза выше, чем при действующей, и как следствие, получен на 20 % более высокий комплекс прочностных свойств проката.

Как показывают данные, приведенные на рисунке 12, при указанном выше температурно-временном режиме охлаждения арматурных профилей с температуры 950 °С из углеродистой стали Ст3сп, происходит промежуточное превращение аустенита в бейнит. Это оказывает положительное воздействие на повышение прочностных свойств проката без значительного снижения пластических.

При охлаждении арматурных профилей из углеродистой стали Ст3сп с температуры 1000 °С (рисунок 12, желтая и красная сплошные стрелки) и при сохранении времени охлаждения раската постоянным, центр проката (рисунок 12, красная штриховая стрелка) достигает температуры 550–600 °С, при которой, в зависимости от содержания углерода, промежуточного превращения практически не происходит.

При увеличении времени охлаждения с целью снижения до оптимальной, с точки зрения протекания промежуточного бейнитного превращения, температуры сердцевинной части арматурных профилей в 500–550 °С, бейнитное превращение протекает на протяжении короткого промежутка времени (рисунок 12, желтая штриховая стрелка).

При интенсивном отводе тепла от поверхности раската за короткий промежуток времени, центральная часть профиля (рисунок 12, синяя штриховая стрелка) по предложенной технологии достигает оптимальной температуры в 500–550 °С с большим и значительным запасом времени на превращение аустенита в бейнит.

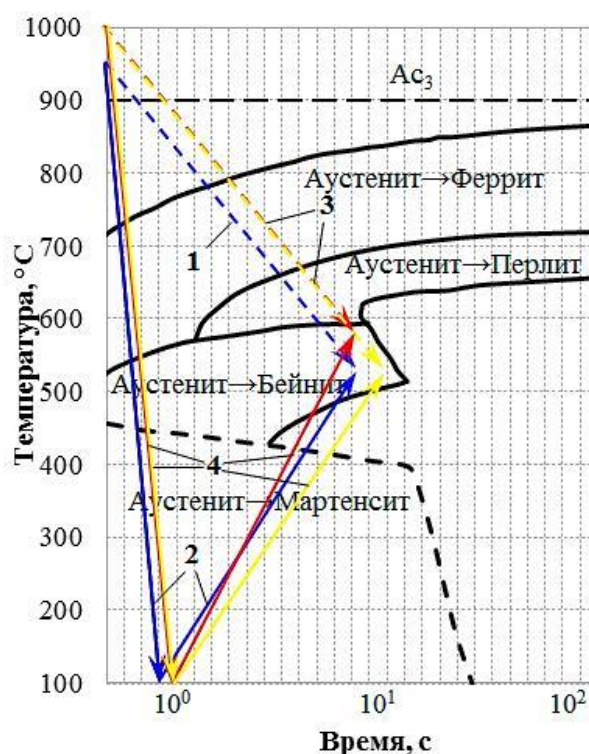


Рисунок 12 – Различные режимы ускоренного охлаждения арматурных профилей из стали СтЗсп:

1 – центр раската, охлаждение с 950 °C; 2 – поверхность, охлаждение с 950 °C; 3 – центр, охлаждение с 1000 °C; 4 – поверхность, охлаждение с 1000 °C

Как показывают результаты расчета режимов ускоренного охлаждения с температуры 950 °C (рисунок 12, синяя сплошная стрелка) в камере с принудительным вращением хладагента арматурного проката диаметром 16 мм из стали СтЗсп до температуры 520 °C, приведенные в таблице 5, уровень механических свойств профилей удовлетворяет требованиям класса прочности А600С по СТО АСЧМ 7-93 (технологический режим I).

Таблица 5 – Исходные данные и результаты расчета параметров микроструктуры и механических свойств

Исходные данные	Технологический режим	I	II
	Прокатываемый материал	СтЗсп	
	Диаметр готового профиля, мм	16	
	Температура нагрева металла, °C	1000	
	Температура окончания деформации, °C	950	
	Температура окончания ускоренного охлаждения, °C	520	490
Результаты расчета	Диаметр зерна аустенита, мкм	23,0	23,0
	Доля феррита, %	67,8	64,9
	Диаметр зерна феррита, мкм	3,7	3,7
	Доля перлита, %	32,2	35,1
	Межпластиночное расстояние феррито-карбидной смеси, мкм	0,19	0,16
	Доля мартенсита от всего количества структурных составляющих, %	40,0	42,9
	Временное сопротивление разрыву, Н/мм²	772	816
	Предел текучести, Н/мм²	660	708
	Относительное удлинение δ ₅ , %	17,6	14,1

Дальнейшее понижение температуры окончания ускоренного охлаждения до 490 °С приводит к повышению, за счет мартенситного превращения, временного сопротивления до 816 Н/мм², предела текучести до 708 Н/мм² при сохранении относительного удлинения δ_5 на уровне требований класса прочности A500С в 14 % (технологический режим II).

Таким образом, разработаны режимы ТМО, обеспечивающие повышение комплекса прочностных свойств на 15–30 % ($\sigma_{0,2} > 600$ Н/мм², $\sigma_B > 740$ Н/мм²) при достаточном уровне пластичности ($\delta_5 > 14$ %), гарантированно удовлетворяющих требованиям российских и европейских стандартов.

По разработанной технологии прокатано 93,7 тыс. тонн профиля №12; 79,5 тыс. тонн №14 и 103,5 тыс. тонн №16. Снижение себестоимости готовой продукции при производстве высокопрочных периодических профилей №16 из стали СтЗсп за счет увеличения часовой производительности стана на 36,6 % составляет 2,23 лат/т. Себестоимость производства арматурного проката №12 и №14 также снижена на 0,19 лат/т за счет уменьшения условно-переменных затрат.

Выводы

1. Разработана методика, выполнены статистические и экспериментальные исследования путем варьирования технологическими параметрами процесса прокатки и охлаждения в широких пределах в лабораторных и промышленных условиях. В результате, определены факторы, наиболее существенно влияющие на точность размеров, структуру и уровень механических свойств сортовых профилей из феррито-перлитных сталей.

2. Установлена закономерность поперечного течения металла, учитывающая форму очага деформации и особенности технологического процесса многоручьевой прокатки, позволяющая рассчитывать уширение с предельным отклонением размеров до 7 % от экспериментально полученных значений.

3. Разработана математическая модель горячей одно- и многониточной прокатки и охлаждения, включающая расчет показателей микроструктуры и механических свойств мелкосортных профилей. Создана и реализована в компьютерной системе методика расчета технологических режимов производства сортового проката с заданными показателями качества, характеризующаяся возможностью корректировки деформационно-скоростных, температурно-временных параметров горячей прокатки и последеформационного охлаждения сортовых профилей в режиме “онлайн”.

4. Создана оригинальная установка ускоренного охлаждения арматурных профилей с поступательно-вращательным движением охладителя, позволяющая изменять скорость и температуру окончания охлаждения в широких пределах, и получать более однородное по длине прутка распределение температуры металла (патент на полезную модель № 122047 (РФ), В21В 43/10 от 20.11.2012).

5. Усовершенствована технология и внедрены новые технологические схемы производства периодических профилей для армирования железобетонных конструкций диаметром от 12 до 16 мм с высоким комплексом механических свойств из углеродистой стали СтЗсп, согласно требованиям ГОСТ Р 52544-2006, СТО АСЧМ 7-93 и DIN 488-2009 на полунепрерывном стане 350/250 АО “Лиепаяс Металургс”.

6. Срок окупаемости (6 месяцев) свидетельствует о высокой экономической эффективности разработанной технологии производства высокопрочных арматурных профилей №12, №14, №16, отвечающих требованиям классов А500С, А600С по СТО АСЧМ 7-93. Суммарный годовой экономический эффект составляет 177 тыс. лат, вследствие снижения себестоимости готовой продукции на 0,94 лат/т.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Экспериментальное исследование влияния технологических параметров горячей прокатки на структурообразование углеродистых сталей. / В.А. Трусов, М.Б. Зинкевич, И.В. Смарыгина, А.В. Зиновьев. // Труды восьмого конгресса прокатчиков, Магнитогорск, 2010. – с. 431–436.

2. Experimental researches of the technology of high-tensile re-bar profiles production with the set complex of mechanical properties. / V.A. Trusov, M.B. Zinkevich and others // XI International Scientific Conference “New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering”, Czestochowa, 2010. – p. 99–105.

3. Badania eksperymentalne nad technologia produkcji wysoko wytrzymałych pretów o zmiennym przekroju ze stali niskowęglowej dla konstrukcji żelbetonowych. / V.A. Trusov, M.B. Zinkevich, H. Dyja, A. Kawalek. // Hutnik. Wiadomości Hutnicze. – 2011. – №5. – p. 433–436.

4. Трусов В.А., Зинкевич М.Б. Разработка метода расчета деформационного режима при сортовой прокатке. // Сборник докладов Международной научно-технической конференции “Инновационные технологии обработки металлов давлением”. – М.: Изд. Дом МИ-СиС, 2011. – с. 325–333.

5. Trusov V.A., Zinkevich M.B., Zinoviev A.V. Theoretical and an experimental research of the re-bar profiles cooling with forced rotation of a coolant. // XII International Scientific Conference “New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering”, Czestochowa, 2011. – p. 366–372.

6. Исследование влияния параметров горячей прокатки на формирование структуры низкоуглеродистых марок сталей. / В.А. Трусов, А.В. Зиновьев, И.В. Смарыгина, М.Б. Зинкевич. // Труды VI Международной научно-практической конференции “Научно-технический прогресс в металлургии”, Темиртау, 2011. – с. 287–292.

7. Трусов В.А., Зинкевич М.Б. Исследование технологии производства периодических профилей для железобетонных конструкций из низкоуглеродистой стали по различным клас-

сам прочности. // Труды VI Международной научно-практической конференции “Научно-технический прогресс в металлургии”, Темиртау, 2011. – с. 298–304.

8. Трусов В.А., Зинкевич М.Б. Разработка метода расчета деформационного режима при сортовой прокатке. // Производство проката. – 2012. – №2. – с.7–11.

9. Трусов В.А., Зинкевич М. Б. Ускоренное охлаждение сортового проката с принудительным вращением охладителя. // Черные металлы. – 2012. – №7. – с.10–14.

10. Trusov V.A., Zinkevich M.B. Development of the method of a multi-strand rolling deformation mode calculation. // XIII International Scientific Conference “New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering”, Czestochowa, 2012. – p. 537–545.

11. Трусов В.А., Зинкевич М.Б., Новожилов И.С. Метод расчета температурного режима при сортовой прокатке // Известия вузов. Черная металлургия. – 2012. – № 7. – с. 38–41.

12. Патент на полезную модель № 122047 (РФ), В21В 43/10 Установка ускоренного охлаждения сортового проката / В.А. Трусов, М.Б. Зинкевич, И.С. Новожилов // Б.И. 2012. №32.