

На правах рукописи

Борисов Сергей Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ
ВЫСОКОПРОЧНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ СТАЛЕЙ**

Специальность 05.16.05 – «Обработка металлов давлением»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Липецкий государственный технический университет».

Научный руководитель: Мазур Игорь Петрович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Трайно Александр Иванович,
доктор технических наук, ФГБУН Институт
металлургии и материаловедения им.
А.А.Байкова РАН, ведущий научный
сотрудник

Ионов Сергей Михайлович,
кандидат технических наук, НИТУ МИСиС,
доцент

Ведущая организация: ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИчермет
им. И.П.Бардина»

Защита состоится 13 ноября 2013 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.060.02, созданного на базе ФГБУН Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН) по адресу: 117334, г. Москва, Ленинский пр., 49.

Автореферат диссертации и объявление о защите размещены на официальном сайте ИМЕТ РАН по адресу: <http://www.imet.ac.ru/ncd-4-15/news.html> и на сайте ВАК Минобрнауки России по адресу: <http://vak2.ed.gov.ru/catalogue/details/129271>.

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью) просьба отправлять по адресу: 117334, г. Москва, Ленинский пр., 49, Диссертационный совет Д 002.060.02. Копии отзывов в электронном виде направлять по e-mail: shelest99@mail.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Шелест А.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Главными критериями успешного развития предприятия и его конкурентоспособности являются постоянное расширение и варьирование сортамента производимой продукции в зависимости от запросов рынка при обеспечении высокой стабильности и производительности технологических процессов в сочетании с низкими издержками и высоким качеством.

В последние годы низколегированные высокопрочные стали (HSLA) находят широкое применение в машиностроении и автомобилестроении. Область их применения обусловлена высокими механическими свойствами (условный предел текучести до 520 МПа), что позволяет снижать вес металлоконструкций при сохранении их прочности (экономия металла по сравнению с конструкциями из малоуглеродистых сталей составляет 25...30 %).

Конечная геометрия (толщина, ширина, плоскостность) и качество поверхности полос из HSLA сталей, необходимые для автомобилестроения, достигаются в результате холодной прокатки. Производительность и стабильность процесса холодной деформации определяются составом оборудования стана и механическими свойствами стали. Упрочнение в результате наклепа сталей HSLA в процессе холодной тонколистовой прокатки может достигать 1000 МПа и более. Закономерности и интенсивность упрочнения HSLA сталей в процессе холодной деформации недостаточно изучены и слабо освещены в научной литературе. Поэтому при холодной прокатке низколегированных сталей возникают аварийные ситуации, приводящие к простоям, потере производительности стана и снижению качества проката. Наличие информации о сопротивлении деформации горячекатаного подката низколегированных сталей и знание параметров кривой упрочнения в процессе холодной прокатки способствует снижению издержек при выполнении заказов потребителей за счет предварительного выбора режимов обработки.

Все вышесказанное обуславливает актуальность научного исследования упрочнения низколегированных высокопрочных сталей при холодной пластической деформации, математического описания и компьютерного моделирования данных процессов на основе подходов теории прокатки.

Цель работы. Исследование упрочнения низколегированных высокопрочных сталей при холодной прокатке, получение новых данных по сопротивлению деформации для уточнения параметров начальной настройки прокатных станов при расширении марочного сортамента металлопродукции.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе решались следующие задачи:

1. Определение условного предела текучести горячекатаного подката из низколегированных высокопрочных автомобильных сталей в зависимости от химического состава и параметров горячей прокатки.

2. Экспериментальное исследование изменения сопротивления деформации при холодной прокатке, получение кривых упрочнения низколегированных высокопрочных сталей.

3. Исследование влияния температуры полосы в процессе холодной прокатки на изменение сопротивления деформации HSLA сталей.

4. Учет влияния температуры полосы и трения на стане при расчете параметров холодной прокатки путем адаптивного определения кривой упрочнения стали при известных данных по энергосиловым параметрам обработки.

Объект и предмет исследования.

Объектом исследования диссертационной работы является зависимость сопротивления деформации HSLA сталей от предшествующей обработки и условий холодной деформации, определяющая нагрузки на оборудование и качество полосы при холодной прокатке исследуемых сталей. В работе рассмотрены стали марок HC260LA, HC300LA, HC380LA, H400LA, HC420LA.

Предметом исследования настоящей работы является изменение условного предела текучести HSLA сталей при холодной деформации.

Научная новизна результатов исследования.

1. Регрессионные зависимости условного предела текучести горячекатаного подката из сталей HSLA от химического состава и параметров горячей прокатки, определяющие исходное сопротивление деформации холоднокатаного проката с учетом условий предшествующей обработки без необходимости проведения механических испытаний.

2. Коэффициенты кривой упрочнения уравнения А.В. Третьякова для сталей марок HC260LA, HC380LA, H400LA и HC420LA, описывающие зависимость величины наклепа от степени холодной деформации.

3. Результаты экспериментальных исследований влияния температуры полосы на упрочнение HSLA сталей при холодной прокатке. Уравнения, учитывающие изменение вида кривой упрочнения при холодной деформации HSLA сталей в диапазоне температур 25...150 °С.

4. Методика, учитывающая влияние температуры полосы и условий трения на стане при расчете параметров холодной прокатки. В отличие от существующих численных моделей алгоритм дополнен адаптивной процедурой вычисления коэффициентов кривой упрочнения при известных данных по энергосиловым параметрам обработки.

Практическая значимость работы.

Работа выполнена в рамках НИР «Разработка новых методов описания формообразования тонких полос из высокопрочной стали при прокатке на широкополосных станах для расширения прокатываемого сортамента» (номер государственной регистрации 01201264040).

1. Регрессионные зависимости сопротивления деформации низколегированных высокопрочных сталей от химического состава и параметров горячей прокатки использованы при разработке рекомендаций по ведению технологического процесса в условиях ОАО «НЛМК» (Новолипецкий металлургический комбинат). Полученные уравнения повышают точность определения исходного предела текучести и кривой упрочнения HSLA стали, которые используются в автоматизированной системе управления станом холодной прокатки для расчета технологических параметров прокатки заданного типоразмера.

2. Результаты исследования упрочнения HSLA сталей в процессе холодной деформации переданы в вычислительный центр и технический отдел «Производства холодного проката и покрытий» ОАО «НЛМК» и использованы в алгоритмах системы управления стана 2030 (АСУТП стана 2030 уровень 2), что подтверждено актом об использовании результатов диссертационной работы на ОАО «НЛМК» от 12.04.2012 г. Применение результатов позволило повысить стабиль-

ность и производительность процесса холодной прокатки низколегированных высокопрочных сталей.

Полученные константы кривых упрочнения сталей HSLA могут быть использованы в качестве справочных в широком спектре теоретических и прикладных задач процессов холодной деформации.

3. Разработанная программа расчета параметров обработки и кривой упрочнения стали позволяет моделировать условия холодной прокатки по составу оборудования и режимам обработки. Позволяет адаптировать модель к условиям стана холодной прокатки путем коррекции коэффициентов кривой упрочнения, использована для проверки возможности обработки нового марочного сортамента на стане 2030.

4. Программа зарегистрирована в Общероссийском фонде алгоритмов и программ (свидетельство о регистрации № 50201250486), используется в учебном процессе при подготовке студентов направления 150400.68 «Металлургия» в курсе «Информационные технологии в металлургии», что подтверждено актом о внедрении в учебный процесс результатов НИР от 15.02.2013 г.

Апробация и реализация результатов диссертации.

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались в рамках: международной научно-технической конференции «Достижения и перспективы развития процессов и машин обработки давлением в металлургии и машиностроении», г. Краматорск, Украина, 21–24 апреля 2009 г.; научно-технической конференции «Прогрессивные технологии пластической деформации», г. Москва, 2009 г.; «VIII международной научно-технической конференции молодых специалистов», г. Новокузнецк, 16–20 апреля 2010 г.; научно-технической конференции «Прогрессивные технологии пластической деформации», г. Москва, 2009 г.; «International Conference on Physical and Numerical Simulation (ICPNS'2010)», November 16-19, 2010, Guilin, China; «20th Jubilee International Conference on Metallurgy and Materials METAL 2011», May 18-20, 2011, Brno, Czech Republic, European Union; международной научно-технической конференции «Инновационные технологии обработки металлов давлением», г. Москва, 18–20 октября 2011г.;

«21st International Conference on Metallurgy and Materials METAL 2012», May 23–25, 2012, Brno, Czech Republic, European Union.

Публикации.

Основное содержание и результаты работы опубликованы в 10 печатных трудах, в том числе 2 статьи в изданиях, входящих в перечень ведущих российских рецензируемых научных журналов [3, 8], рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 3 статьи в зарубежных изданиях, индексируемых в базе данных «Web of Science» [4, 5, 9].

Структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и библиографического списка (включающего 71 наименование). Работа изложена на 146 страницах машинописного текста, содержит 56 рисунков и 31 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель, научная новизна и практическая значимость исследования, дано общее описание работы.

В первой главе проведен аналитический обзор литературы, в котором дана характеристика высокопрочных низколегированных сталей (HSLA по EN 10268), указана область их применения, уровень конечных механических характеристик, механизмы упрочнения и структура, обуславливающие их свойства. Показаны проблемы, возникающие при тонколистовой холодной прокатке сталей HSLA, определены направления исследований, необходимые для их решения.

Представлен сравнительный анализ математических моделей очага деформации при холодной прокатке. Сделаны выводы по точности и применимости моделей. Математическое моделирование является инструментом, позволяющим спрогнозировать условия прокатки при известных свойствах материала и выбрать рациональный по энергосиловым параметрам режим обработки. В выводах по главе сформулированы задачи настоящего исследования.

Во второй главе представлены результаты исследования сопротивления деформации горячекатаного подката из сталей HSLA, достигаемого в зависимости от химического состава и параметров горячей прокатки.

Упрочнение в процессе холодной прокатки по уравнению А.В. Третьякова, выбранному в результате анализа применяемых в теории холодной прокатки зависимостей, определяется исходным пределом текучести стали и суммарной степенью холодной деформации, достигаемой при прокатке

$$\sigma_{0,2} = \sigma_{T0} + b\varepsilon_{\Sigma}^c, \quad (1)$$

где ε_{Σ} - суммарная степень деформации в клети при холодной прокатке; b, c - эмпирические коэффициенты кривой упрочнения; σ_{T0} - условный предел текучести горячекатаного подката.

На первом этапе исследований для определения исходного сопротивления деформации горячекатаного подката HSLA сталей проведен анализ массива данных по параметрам обработки партий из стали марок HC260LA HC300LA, HC380LA, HC420LA. За анализируемый период (2009–2011гг.) было прокатано 62 рулона из стали марки HC260LA, 89 рулонов из стали марки HC300LA, 124 рулона из стали марки HC380LA и 63 рулона из стали марки HC420LA. Эта выборка данных – репрезентативный массив параметров, необходимый для получения достоверных зависимостей между факторами технологии и механическими свойствами стали. Область варьирования факторов предшествующей обработки для стали HC380LA, охватываемая в планируемом эксперименте, представлена в таблице 1.

Таблица 1

Интервалы варьирования параметров эксперимента для стали HC380LA

Параметр		Кол-во партий	Среднее	Минимум	Максимум	СКО
Выходной параметр	Условный предел текучести горячекатаного проката, МПа	124	421	348	503	33,575 4
	$T_{кп}, ^\circ C$		848	839	861	4,9720
$T_{см}, ^\circ C$	641		615	651	5,6962	
Факторы	Углерод, масс. доля %		0,090	0,080	0,100	0,0046
	Марганец, масс. доля %		0,867	0,800	0,940	0,0486
	Ниобий, масс. доля %		0,044	0,040	0,050	0,0048

Данные были обработаны по методу множественной корреляции из стандартного пакета программ «Statistica 6.0». В таблице 1 представлены параметры, оказывающие наибольшее влияние на формирование условного предела текуче-

сти стали HC380LA. Интервалы варьирования факторов для сталей марок HC260LA, HC300LA, HC420LA приведены в диссертации. На основании проведенного анализа получено следующее ранжирование факторов по значимости их влияния на условный предел текучести горячекатаных полос из низколегированной высокопрочной стали: 1) содержание в стали углерода C (коэффициент парной корреляции с условным пределом текучести подката $r = 0,67 \dots 0,79$), марганца Mn ($r = 0,49 \dots 0,69$), ниобия Nb ($r = 0,72 \dots 0,76$); 2) температура конца прокатки ($r = -0,27 \dots -0,34$), температура смотки полос в рулоны ($r = -0,35 \dots -0,43$). В результате получены регрессионные уравнения для определения сопротивления деформации листовой стали перед холодной деформацией в виде линейных зависимостей от химического состава и технологических параметров горячей прокатки.

Уравнение для стали марки HC380LA:

$$\sigma_{T0} = 2127,9 + 2627,25C + 86,42Mn + 3167,65Nb - 2,08T_{kn} - 0,62T_{cm}, \quad (2)$$

где σ_{T0} – условный предел текучести горячекатаного подката, МПа; C , Mn , Nb , – массовая доля содержания в плавке углерода, марганца и ниобия соответственно, %; T_{kn} – температура конца прокатки, °С; T_{cm} – температура смотки, °С. Для приведенной зависимости коэффициент множественной детерминации $R^2 = 76\%$.

Уравнение для стали марки HC260LA ($R^2 = 96\%$)

$$\sigma_{T0} = 1181,13 + 1101,89C + 63,24Mn + 3492,08Nb - 1,18T_{kn} - 0,098T_{cm}. \quad (3)$$

Уравнение для стали марки HC300LA ($R^2 = 76\%$)

$$\sigma_{T0} = 716,52 + 2902,43C + 534,39Mn + 957,467Nb - 0,743T_{kn} - 0,616T_{cm}. \quad (4)$$

Уравнение для стали марки HC420LA ($R^2 = 74\%$)

$$\sigma_{T0} = 954 + 4606,2C + 0,03(Mn/S) + 1266,86Nb - 0,825T_{kn} - 0,224T_{cm}, \quad (5)$$

где Mn/S – отношение массовой доли содержания в плавке марганца к сере, принятое для повышения точности уравнения и исключения взаимного влияния факторов друг на друга. Полученные уравнения не противоречат известным закономерностям влияния химического состава и параметров горячей прокатки на свойства сталей, представленным в работах Л.В. Андреюка.

Проверку уравнений (2) – (5) провели по результатам измерений условного предела текучести для четырех контрольных выборок трех марок стали, прокатан-

ных в 2012 г. Химический состав и параметры горячей прокатки соответствовали интервалам варьирования факторов в таблице 1. В таблице 2 представлены отклонения расчетных значений от фактических. Абсолютная ошибка прогнозируемого значения от измеренного составила 13,1...60,5 МПа, что укладывается в диапазоны остатков, определенные для построенных регрессионных уравнений.

Таблица 2

Измеренные и расчетные значения условного предела текучести горячекатаного подката из сталей HSLA

Марка стали	HC380LA		HC420LA	HC260LA
$\sigma_{T0изм.} / \sigma_{T0расч.}$, МПа	<i>Выборка 1</i>	<i>Выборка 2</i>	<i>Выборка 3</i>	<i>Выборка 4</i>
	484,0 / 470,9	483,0 / 422,5	612,0 / 588,8	334,0 / 351,4
Абс. откл.	13,1	60,5	23,2	17,4
Ошибка, %	2,7	12,5	3,8	5,2

Полученные зависимости позволяют прогнозировать условный предел текучести горячекатаного подката HSLA сталей с точностью 74...96 %. Таким образом, получена информация о сопротивлении деформации HSLA сталей перед холодной прокаткой в зависимости от предшествующей обработки, необходимая для описания упрочнения стали при холодной деформации. Уравнения позволяют оперативно определить исходный предел текучести HSLA сталей при изменении химического состава или условий горячей прокатки до результатов механических испытаний на растяжение, что требуется технологам для выбора начальных настроек параметров холодной прокатки с использованием автоматических систем управления технологическим процессом стана. Можно рекомендовать применение уравнений (2) – (5) для прогнозирования условного предела текучести в следующем диапазоне факторов технологии: $T_{кн} = 825...861^{\circ}\text{C}$, $T_{сн} = 535...656^{\circ}\text{C}$, $C = 0,035...0,01\%$, $Mn = 0,46...1,43\%$, $Nb = 0,01...0,06\%$.

Третья глава посвящена исследованию упрочнения низколегированных высокопрочных сталей при холодной деформации.

Для математического описания упрочнению HSLA сталей по уравнению (1) определялись эмпирические константы b, c в результате проведения экспериментальных исследований. Методика, материал и оборудование исследования упрочнения представлены ниже.

Исследование выполнено на базе HSLA сталей (марок HC260LA, HC380LA, H400LA и HC420LA) 15 различных плавок. Химический состав плавок, от которых производился отбор образцов, соответствовал требованиям EN 10268. Исследуемые партии обрабатывались на непрерывном широкополосном стане горячей прокатки 2000. Для усреднения эффектов неконтролируемых факторов (неоднородность химического состава и параметров предшествующей горячей прокатки) и минимизации их влияния на результат исследования проведена рандомизация порядка эксперимента. Для исследования отбирались образцы стали от партий с идентичными режимами горячей прокатки (различие температур за 5 клетью, температур конца прокатки и смотки в диапазоне не более $\pm 15^{\circ}\text{C}$) и близким химическим составом плавки. Карточки длиной 210-250 мм на всю ширину прокатываемой полосы вырубали на входе (разматывателе) стана холодной прокатки 2030. Каждая из проб была разделана на продольные образцы шириной 150 мм (для проведения механических испытаний) и 40 мм (под дальнейшую холодную прокатку).

Холодная прокатка горячекатаных образцов низколегированной стали в промежуточные толщины выполнена на лабораторном двухвалковом стане 250 с использованием концентрата высокоэффективного эмульсора, применяемого на стане 2030. При прокатке стали марки HC380LA максимальная суммарная степень деформации составила 83,16 % (прокатка с 2,85 на 0,48 мм), для стали HC420LA – 77,89 % (2,76→0,61 мм), для стали HC260LA – 84,11% (3,02→0,48 мм), для стали HC300LA – 83,33 % (2,46→0,41 мм). Каждый из образцов прокатывался в 12 - 15 промежуточных толщин.

Все холоднокатаные образцы подвергались механическим испытаниям на разрывной машине Z100 BT1-FR100SN. A2K («Zwick», Германия) по ГОСТ 1497-84 и EN 10268. По результатам испытаний определяли условный предел текучести, исследуемых сталей. Таким образом, был сформирован массив измерений условных пределов текучести при различных степенях суммарной деформации для исследуемых марок стали. Статистическую обработку результатов испытаний проводили в два этапа: на первом осуществлялся отсев грубых погрешно-

стей, на втором – проверка гипотезы нормальности эмпирического распределения данных измерений.

Определение кривой упрочнения HSLA сталей при холодной деформации

Для определения констант кривой упрочнения (b, c уравнения 1) низколегированной высокопрочной стали при холодной деформации значения условного предела текучести, полученные при испытаниях на разрыв, были сглажены по трехпараметрической зависимости А.В. Третьякова с использованием метода наименьших квадратов.

В результате, с учетом данных об исходном сопротивлении деформации, представленных в главе 2, определили неизвестные ранее уравнения зависимости условного предела текучести от суммарной степени деформации при холодной тонколистовой прокатке для сталей марок HC260LA, HC380LA, H400LA и HC420LA. Точность уравнений составила от 96 % до 99 % (табл. 3).

Таблица 3

Упрочнение низколегированной стали HSLA при холодной деформации

Марка	Зависимость условного предела текучести (МПа) от суммарной степени деформации*	Коэффициент корреляции уравнения
HC260LA	$\sigma_T = 312 + 32,118 \cdot \varepsilon_\Sigma^{0,612}$	0,996
HC380LA	$\sigma_T = 483 + 19,026 \cdot \varepsilon_\Sigma^{0,75}$	0,963
HC420LA	$\sigma_T = 612 + 23,138 \cdot \varepsilon_\Sigma^{0,689}$	0,977
H400LA	$\sigma_T = 670 + 14,678 \cdot \varepsilon_\Sigma^{0,856}$	0,996

*При температуре испытаний 25 °С

Исследование влияния температуры полосы в процессе холодной прокатки на изменение сопротивления деформации HSLA сталей

Проведена оценка температуры полос из стали HSLA при холодной прокатке. Бесконтактным пирометром измерена температура полосы по длине рулона при холодной прокатке 298 партий из стали HC260LA и 63 партий из стали HC300LA. Установлено, что при скоростях прокатки около 16 м/с и суммарном относительном обжатии 66% температура полос HSLA сталей в среднем на 32,6°С выше, чем стали 08Ю. Характерное изменение температуры и скорости полосы при холодной прокатке HSLA сталей на стане 2030 представлено на (рис. 1).

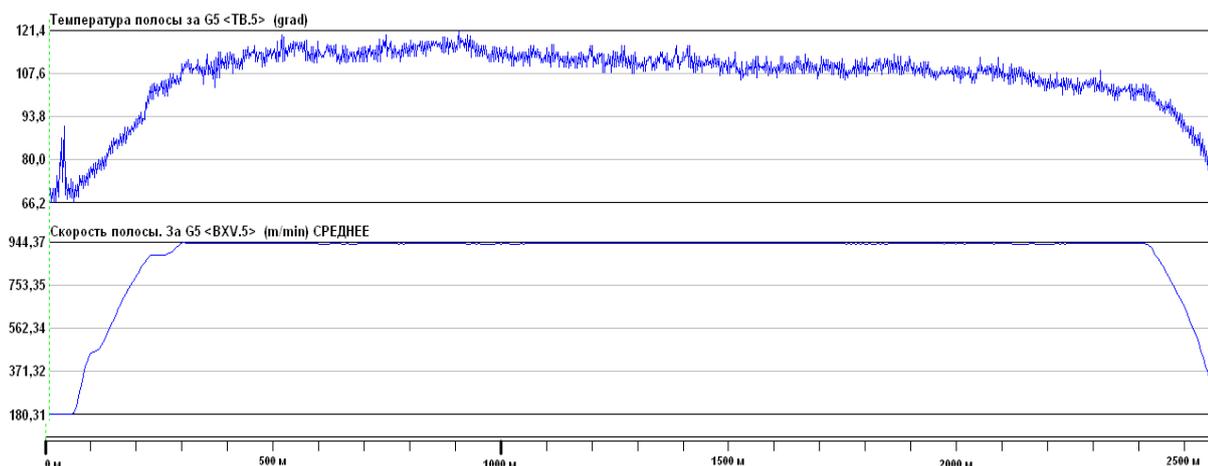


Рис. 1. Температура и скорость полосы по длине рулона при холодной прокатке стали марки HC300LA (2,7→1,0×996 мм)

Верхний уровень температуры исследований установили 150 °С на основании максимально достигаемой за 5 клетью стана 2030 температуры проката.

Образцы стали марок HC260LA, HC300LA дополнительно испытывались на растяжение при температурах в диапазоне 25...150 °С с шагом по нагреву 25 °С согласно ГОСТ 9651–84. Нагрев образцов проводили в температурной камере типа ЕС 2084 (Zwick, Германия). Определялся условный предел текучести для шести значений температуры нагрева недеформированных и наклепанных холоднокатаных образцов при фиксированной суммарной степени деформации. Усредненные данные измерений при каждой исследуемой температуре, полученные в результате испытаний на разрыв, представлены на рис. 2, 3.

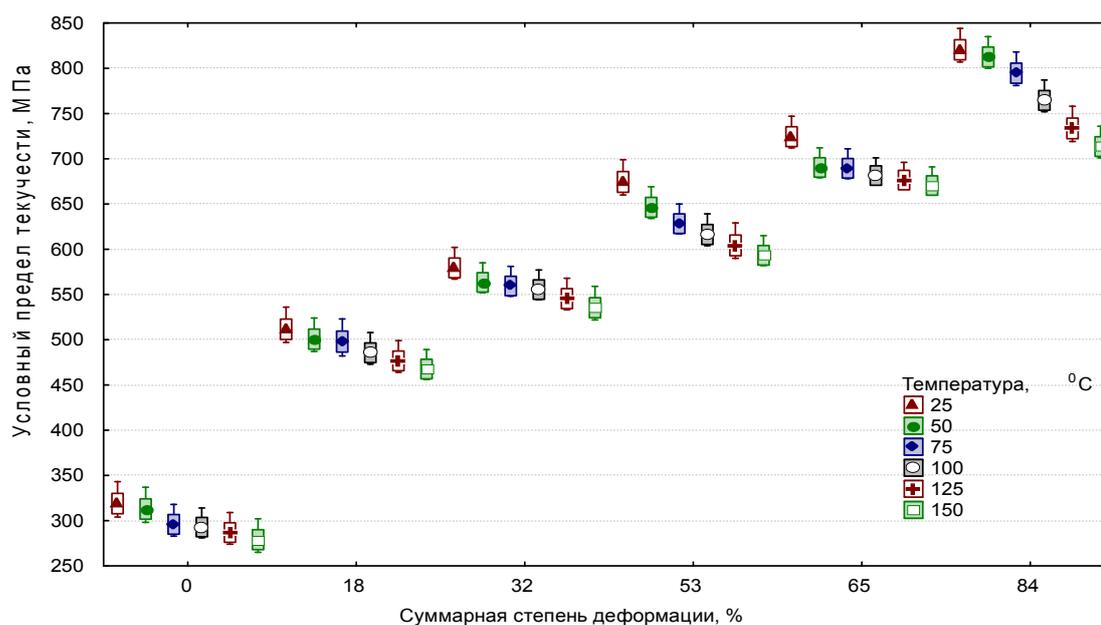


Рис. 2. Зависимость условного предела текучести стали HC260LA от температуры и суммарной степени деформации (диапазоны измерений)

Установлено, при нагреве образцов в недеформированном состоянии до температуры 150 °С суммарное снижение условного предела текучести составило 40 МПа у стали HC260LA; 36 МПа у стали HC300LA. При деформации образцов из стали HC260LA до 50 % снижение предела текучести при температуре 150 °С было 44 МПа, тогда как у стали HC300LA это снижение составило 54...68 МПа. Для образцов, продеформированных более чем на 50 % (из стали HC260LA – на 84 %, из стали HC300LA – на 83 %), при разогреве до температуры 150 °С снижение предела текучести составило 54...107 МПа у стали HC260LA и 76...165 МПа – у HC300LA.

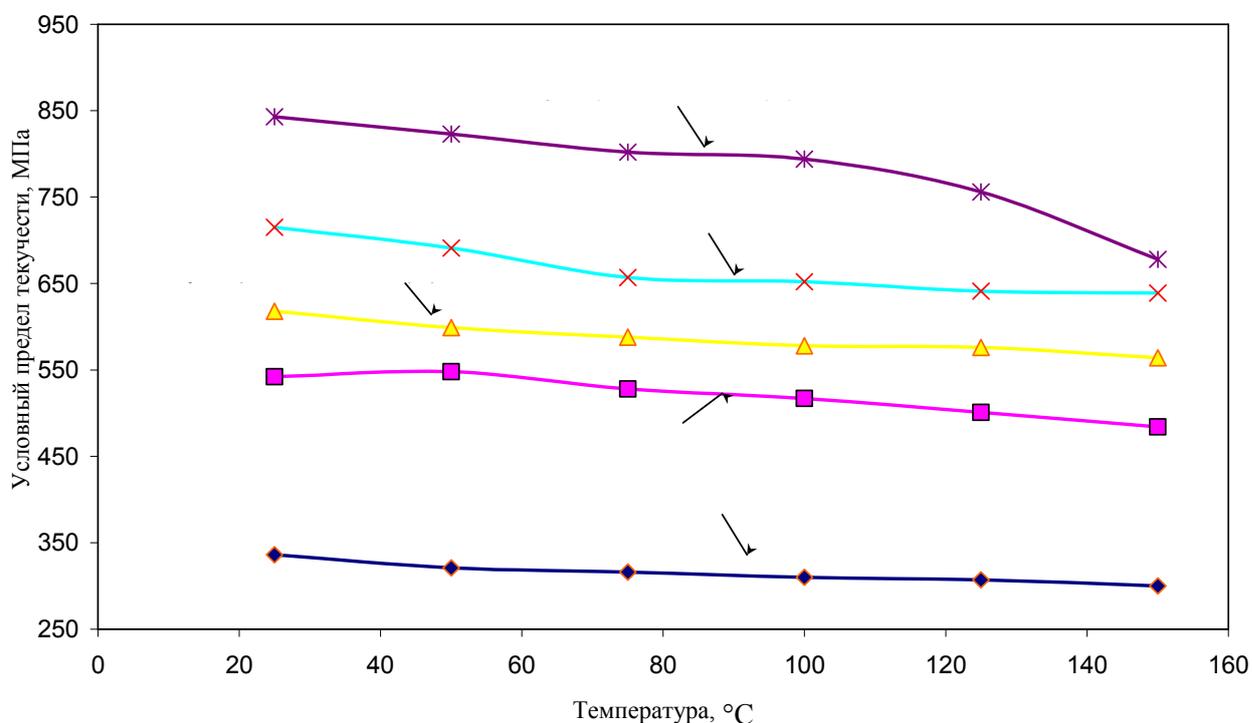


Рис. 3. Зависимость условного предела текучести стали HC300LA от температуры и суммарной степени деформации

Как установлено в настоящей работе, при достижении суммарной степени деформации выше 50 % влияние температуры деформационного нагрева на снижение предела текучести составляет для сталей HC260LA, HC300LA 54...165 МПа. Что экспериментально подтверждает влияние деформационного разогрева на сопротивление деформации в процессе холодной прокатки сталей HSLA в диапазоне температур 100...150 °С. Установленное разупрочнение согласуется с теорией процессов релаксации напряжений и представлениями о динамическом возврате, протекающем в ходе холодной пластической деформации. Для стали марки

HC300LA, в сравнении с маркой HC260LA, повышение температуры вызывает большее (на 22...58 МПа) снижение уровня пластических свойств. При холодной тонколистовой прокатке влияние температурных факторов считается постоянным за счет выравнивания температуры полосы путем теплоотдачи валкам и смазочно-охлаждающей жидкости. Снижение сопротивления деформации за счет деформационного нагрева при холодной прокатке – это уменьшение нагрузки на оборудование, увеличение частных и суммарных обжатий, повышение скорости прокатки и производительности стана. Таким образом, большее по сравнению с прокатом углеродистых сталей сопротивление деформации низколегированных сталей характеризуется большим деформационным нагревом при холодной прокатке, вызывающим релаксационное разупрочнение, что позволяет снизить потери производительности из-за вынужденного снижения скорости обработки.

Для учета влияния температуры в рамках уравнения (1) проведена оценка изменения вида кривой наклепа, путем построения функции констант кривой упрочнения от температуры проката. С использованием метода наименьших квадратов определены константы кривых упрочнения стали HC260LA при шести температурах. Таким образом, сформирован массив коэффициентов (b, c уравнения (1)) и температур, при которых построена кривая упрочнения. Полученное изменение коэффициентов упрочнения в зависимости от температуры может быть учтено следующими выражениями (рис. 4):

$$b = 11,209 + 0,278 \cdot t + 0,038 \cdot t^2 - 7,743 \cdot e^{-4} \cdot t^3 + 5,482 \cdot e^{-6} \cdot t^4 - 1,335 \cdot e^{-8} \cdot t^5, \quad (6)$$

$$c = 1,163 - 0,035 \cdot t + 6,484 \cdot e^{-4} \cdot t^2 - 5,917 \cdot e^{-6} \cdot t^3 + 2,624 \cdot e^{-8} \cdot t^4 - 4,523 \cdot e^{-11} \cdot t^5, \quad (7)$$

где t – температура полосы при холодной прокатке, °С.

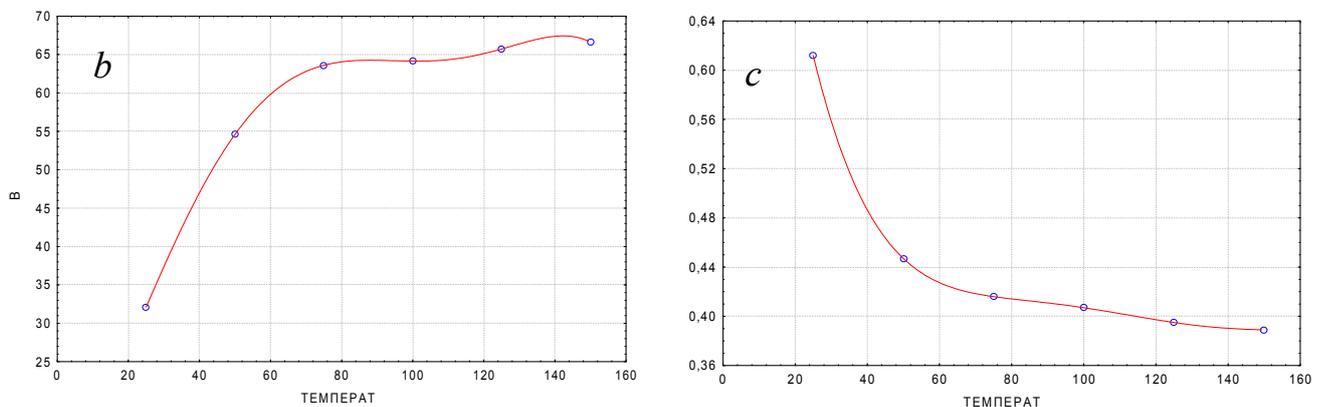


Рис. 4. Зависимость коэффициентов упрочнения стали HC260LA от температуры

Введение данных выражений в уравнение (1) позволяет учесть установленное экспериментально влияние температуры на разупрочнение стали HC260LA в диапазоне температур 100...150 °С и повысить точность прогноза сопротивления деформации при холодной прокатке.

Четвертая глава посвящена расчету параметров холодной прокатки сталей в условиях стана 2030 с использованием разработанной программы и кривых упрочнения, полученных в результате экспериментальных исследований.

Математический аппарат и структура модели процесса холодной деформации выбраны исходя из соображений максимального учета всех влияющих на процесс прокатки параметров. При построении модели использованы известные уравнения теории процесса холодной прокатки А.И. Целикова, П.И. Полухина, В. Робертса, А.А. Королева, А.В. Третьякова. Для вычисления параметров процесса холодной прокатки и обеспечения требуемого уровня соответствия расчетных значений фактическим параметрам обработки в промышленных условиях, в представленной работе выбрана модель прокатки, основанная на численном решении дифференциального уравнения равновесия сил в очаге деформации Кармана.

Согласно принятой модели для определения частной производной изменения усилия прокатки по длине очага деформации используется следующее выражение:

$$\pm \frac{dP_x}{dx} = -4C \cdot B_x \cdot x \cdot (C_x - x^2)^{c-1} + \frac{4x \cdot K_x \pm 2\mu \cdot p_x \cdot R_c}{h_1 \cdot R_c + x^2}, \quad (8)$$

$$K_x = A_x + B_x \cdot (C_x - x^2)^c; \quad C_x = R_c (H_n - h_1); \quad (9)$$

$$A_x = 0,575\sigma_{T0}; \quad B_x = 0,575b \left(\frac{100}{H_n \cdot R_c} \right)^c; \quad R_c = l_c^2 / \Delta h, \quad (10)$$

где P_x - удельное давление металла на валки в сечении x ; l_c - длина дуги контакта с учетом упругого сплющивания валков; x - координата интегрирования; σ_{T0}, b, c - параметры кривой упрочнения; μ - коэффициент трения ($\mu = 10^{-3} e^{5.48v^{-0.055}}$, где v - скорость прокатки); R_c - радиус упруго сплющенного валка; H_n - толщина подката; h_1 - толщина полосы на выходе из клетки; Δh - абсолютное обжатие.

Краевые условия для расчета удельного контактного давления: удельное давление для зоны отставания равняется $p_{x0} = 2K_0 - \sigma_0$; для зоны опережения – $p_{x1} = 2K_1 - \sigma_1$, где K_0 , K_1 - сопротивление чистому сдвигу на входе (выходе) очага деформации определяется по формуле (9), а σ_0 , σ_1 - заднее (переднее) удельное натяжение полосы на стане.

В отличие от существующих, в предлагаемой методике разработана и реализована процедура определения кривой упрочнения прокатываемой стали, позволяющая адаптировать модель к условиям холодной прокатки конкретного стана. Суть процедуры – итерационный подбор на входе и выходе в каждую из клеток стана методом наименьших квадратов значений коэффициентов кривой упрочнения b, c уравнения (1), определяющих расчет контактного давления, до совпадения расчетных значений усилия и момента прокатки с известными фактическими параметрами обработки.

Алгоритм расчета, реализованный в виде компьютерной программы, позволяет моделировать условия холодной прокатки сталей, как по составу оборудования, так и режимам обработки. Программа рассчитывает полное усилие прокатки, момент прокатки, мощность прокатки каждой из клеток стана, кривую упрочнения стали при деформации и визуализирует расчетные данные в виде графиков и диаграмм.

С использованием разработанной программы выполнены расчеты параметров прокатки для низколегированных высокопрочных сталей марок Н400LA и НС380LA различных типоразмеров и адаптация модели к условиям пятиклетевого стана 2030 с диаметром бочки валков 600 мм.

На первом этапе (без проведения адаптации к условиям стана) проверили адекватность выбранной модели с использованием экспериментальных кривых упрочнения путем сравнения результатов расчета с фактическими значениями энергосиловых параметров прокатки, полученными из автоматизированной системы слежения за технологическими параметрами стана 2030 (табл. 4).

Таблица 4

Параметры холодной прокатки полос из стали марки Н400LA на стане 2030

№ режи- ма	Данные	Усилие, МН					Момент прокатки, кНм				
		кл.1	кл.2	кл.3	кл.4	кл.5	кл.1	кл.2	кл.3	кл.4	кл.5
I	Измеренные	12,72	17,53	15,64	15,47	13,01	6,58	136,25	138,83	133,54	111,60
	Расчетные	10,86	19,35	17,05	17,40	11,26	5,44	153,40	154,00	153,74	93,88
	Погрешность = (изм.- расч.)/изм.*100 %	14,64	-10,39	-9,03	-12,46	13,42	17,29	-12,59	-10,93	-15,13	15,88
II	Измеренные	15,50	17,61	14,81	16,01	11,65	27,60	107,01	117,99	107,76	102,99
	Расчетные	13,35	19,27	16,33	17,59	9,99	23,07	119,22	132,64	120,63	85,69
	Погрешность = (изм.- расч.)/изм.*100 %	13,89	-9,43	-10,25	-9,86	14,21	16,42	-11,41	-12,42	-11,94	16,80
III	Измеренные	17,58	17,30	18,55	16,23	9,81	25,70	189,33	178,90	197,50	83,83
	Расчетные	14,69	18,93	20,45	17,67	8,32	20,71	210,94	201,12	218,67	68,77
	Погрешность = (изм.- расч.)/изм.*100 %	16,45	-9,43	-10,25	-8,86	15,21	19,40	-11,41	-12,42	-10,72	17,96

Для всех приведенных режимов обработки стали H400LA распределение расчетных параметров по клетям стана качественно совпадает с данными, полученными из системы измерения и наблюдения за полосой стана 2030. Погрешность определения усилий с использованием полученных в работе (глава 3, табл. 3) уравнений упрочнения не превышает 15 %. Что говорит о достоверности используемых уравнений упрочнения и адекватности модели.

Далее по предложенному алгоритму коррекции коэффициентов кривой упрочнения проведена адаптация модели холодной прокатки и выполнено сравнение расчетной (адаптированной) кривой упрочнения стали H400LA с эмпирической зависимостью условного предела текучести от обжатия (табл. 1). Сравнение представлено в таблице 5.

Таблица 5

Упрочнение стали H400LA при холодной прокатке*

Параметр		Номер клетки				
		1	2	3	4	5
	ε_{Σ} , %	12,30	30,87	46,74	55,87	56,52
Расчет по регрессионной формуле	$\sigma_{0,2}$ эмп., МПа	795,8	946,5	1064,3	1129,4	1134,0
		2	1	8	6	5
Обратный пересчет	$\sigma_{0,2}$ теор., МПа	740,1	899,1	1131,4	1235,7	1258,7
		2	8	6	0	9
Погрешность	$(\sigma_{0,2} \text{ эмп.} - \sigma_{0,2} \text{ теор.})/\sigma_{0,2} \text{ эмп.} * 100 \%$	7,00	5,00	-6,3	-9,41	-11,00

*исходный условный предел текучести равен 670 МПа

Процедура адаптации позволяет повысить точность расчетной модели для условий конкретного стана путем коррекции коэффициентов уравнения (1). После адаптации модели расхождение между расчетной и эмпирической кривыми упрочнения составило 5...11%. Данная поправка учитывает влияние температуры деформационного нагрева на сопротивление деформации низколегированных сталей, которое установлено в рамках исследования (глава 3), а также неточности определения коэффициентов трения в клетях.

Таким образом, с использованием математического моделирования продемонстрирована достоверность кривых упрочнения HSLA сталей (табл. 3), полученных в результате экспериментальных исследований. Реализован адаптивный метод определения коэффициентов кривой наклепа, позволяющий применять программу для решения инженерных задач, связанных с проверкой возможности обработки различных типоразмеров полос как низколегированных высокопрочных сталей, так и других сталей при заданном составе и характеристиках оборудования с целью расширения марочного сортамента проката. Алгоритм учитывает погрешности модели, связанные с разупрочнением HSLA сталей при деформации в диапазоне температур 100...150 °С и изменение условий трения.

После подтверждения полученных экспериментальных данных (глава 2, 3) посредством математического моделирования, коэффициенты кривых упрочнения были использованы в автоматизированной системе управления стана 2030 для расчета параметров начальной настройки при прокатке низколегированных высокопрочных сталей. Сравнение режимов до и после уточнения кривой упрочнения приведено на рис. 5.

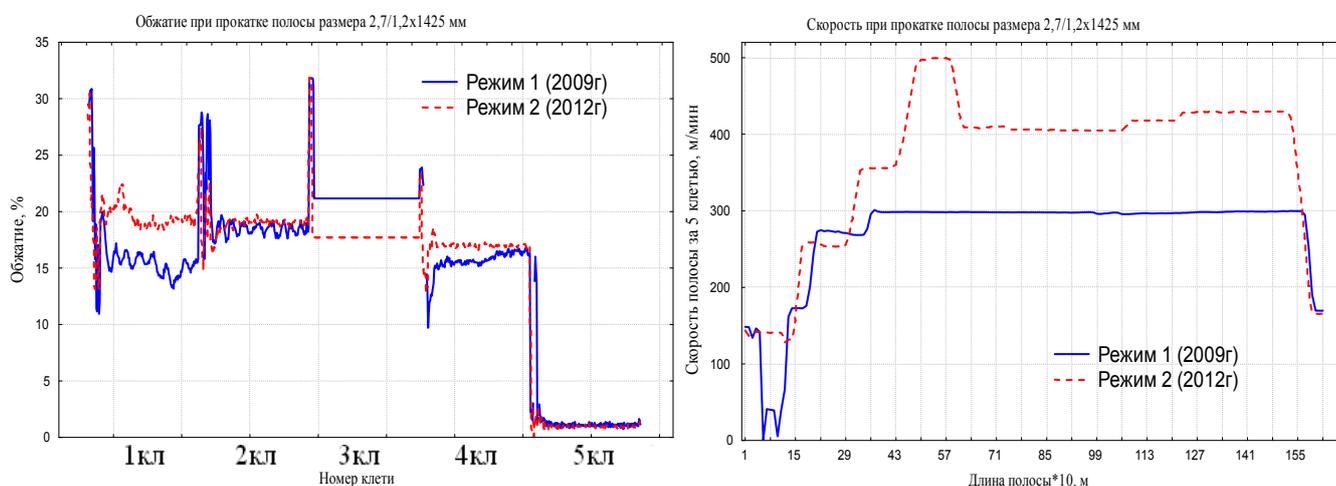


Рис. 5. Параметры холодной прокатки стали марки HC380LA

Перераспределение обжатий способствовало стабилизации натяжения перед первой клетью и увеличению скорости прокатки при обработке низколегированных высокопрочных сталей на стане 2030, что повысило производительность стана (повышение скорости прокатки на 2...5 м/с) и качество листового проката (выход годного по результатам холодной прокатки увеличился до 85 %).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. По итогам экспериментальных исследований и практического опыта производства построены регрессионные уравнения для определения механических свойств горячекатаного подката листовой стали марок HC260LA, HC300LA, HC380LA, HC420LA в зависимости от химического состава и параметров горячей прокатки. Данные уравнения позволяют оперативно (без проведения механических испытаний) прогнозировать условный предел текучести подката высокопрочных низколегированных автомобильных сталей, необходимый для назначения технологических параметров начальной настройки стана холодной прокатки. Достоверность регрессионных зависимостей составляет 74...96 %.

2. На основе результатов испытаний образцов на растяжение определены пластические свойства сталей марок HC260LA, HC300LA, HC380LA и HC420LA: установлены зависимости для расчета сопротивления деформации сталей применительно к условиям холодной прокатки; определены константы упрочнения b, c уравнения А.В. Третьякова, которые являются справочными коэффициентами, используемыми при решении теоретических и прикладных задач процессов холодной деформации. Точность уравнений составила 96...99 %.

3. Исследовано изменение сопротивления деформации низколегированных высокопрочных сталей в результате деформационного нагрева полосы при холодной прокатке и установлено, что при нагреве проката в диапазоне температур от 25 до 150 °С и суммарной степени деформации свыше 50 % наблюдается снижение предела текучести сталей HC260LA, HC300LA на 54...165 МПа (около 19,6 % относительно условного предела текучести, измеренного при температуре 25 °С). Предложено обобщенное уравнение упрочнения, учитывающее экспериментально установленное влияние температурного фактора на сопротивление деформации при холодной прокатке.

4. Разработана численная методика расчета параметров холодной прокатки, дополненная процедурой адаптивного определения коэффициентов кривой наклепа прокатываемой стали и основанная на экспериментальных данных, подтвержденных практическим опытом. Процедура адаптации учитывает влияние на энергосиловые параметры прокатки условий трения стана и изменение пластических свойств стали от температуры полосы. Методика позволяет рассчитать усилие прокатки, момент прокатки, мощность прокатки каждой из клетей стана, кривую упрочнения стали при деформации, предназначена для инженерной оценки возможности обработки различных

типоразмеров проката, как низколегированных высокопрочных сталей, так и других сталей при заданном составе и характеристиках оборудования.

5. С использованием кривых упрочнения и регрессионных уравнений проведено моделирование и исследование режимов холодной прокатки полос низколегированных высокопрочных автомобильных сталей. Предложено уменьшить относительные обжатия в клетях 1-3 на 3...10% при увеличении обжатия в клетях 4 и 5 на 1...5%, что способствовало снижению межклетьевых натяжений в среднем на 3,3 т и сокращению количества случаев обрыва сварных швов. Уточненные уставки усилий прокатки позволили стабилизировать колебания натяжений перед первой клетью в диапазоне 9,2...10,3 т и сократить количество простоев, связанных с отключением привода тянущей станции.

6. Результаты работы внедрены в производственную деятельность ОАО «НЛМК» и состоят в следующем:

- Рассчитаны рациональные параметры холодной прокатки низколегированных высокопрочных сталей в условиях стана 2030. Разработаны рекомендации по начальной настройке стана, определены управляющие уставки процесса холодной прокатки высокопрочных автомобильных сталей, создан отдельный класс прочности для труднодеформируемых марок стали, данные внесены в автоматизированную систему управления технологическим процессом.

- Внедрение результатов работы позволило расширить марочный сортамент стана 2030, повысить качество листового проката; выход годного за счет уменьшения дефектов связанных с холодной прокаткой (продирь, риски, разнотолщинность), увеличился с 56 % до 85 %; это обеспечило экономический эффект, выразившийся в снижении себестоимости производства низколегированных сталей до 1500...3000 руб./т. в зависимости от марки стали.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Мазур И.П., Борисов С.С. Исследование процесса холодной прокатки высокопрочной стали на непрерывном пятиклетевом стане 2030 / Материалы научно-техн. конф. «Прогрессивные технологии пластической деформации». М: МИСиС, 2009. С. 356-358.

2. Мазур И.П., Долматов А.П., Борисов С.С., Математическое моделирование процессов холодной прокатки на непрерывных широкополосных станах // Обработка

материалов давлением: Сб. научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2009. №1 (20). С. 97 - 103.

3. Мазур И.П., Долматов А.П., Борисов С.С., Математическое моделирование процесса холодной прокатки высокопрочной стали на непрерывном пятиклетевом стане 2030 / Изв. вузов. Черная металлургия. 2010. № 5. С. 41-44.

4. Mazur Igor P., Dolmatov A.P., Borisov S.S. Investigation and Numerical Modeling of the Process of Cold Rolling HSLA Steels / Materials Science Forum. Vols. 704-705. Trans Tech Publications, Switzerland. 2011/Dec/06, P. 832-841. (URL: doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.704-705.832).

5. Borisov Sergey S., Mazur Igor P. Determination of hardening curves of HSLA steel in the process of cold rolling / 20th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials. May 18-20, 2011. Brno, Czech Republic, EU. ISBN 978-80-87294-24-6 (for indexing in Thomson Reuters Web of Knowledge). P.370–375.

6. Борисов С.С., Мазур И.П., Кавалек А. Исследование упрочнения труднодеформируемой стали HSLA при холодной прокатке / Сб. докладов межд. конф. «Инновационные технологии обработки металлов давлением». – М.: Изд. дом МИСиС, 2011. С. 212-220.

7. Мазур И.П., Борисов С.С., Кавалек А. Упрочнение стали HSLA при холодной прокатке / Научно-технический прогресс в металлургии (сборник научных трудов). – Алматы: РИК по учебной и методической литературе, 2011. С. 186-193. ISBN 978-601-7103-58-3.

8. Мазур И.П., Борисов С.С., Кавалек А. Исследование упрочнения труднодеформируемой стали HSLA при холодной прокатке / Производство проката. 2012. №7. С. 8-13.

9. Borisov Sergey S., Mazur Igor P. HSLA steel hardening in the process of cold rolling / International Conference on Metallurgy and Materials. May 23-25, 2012. Brno, Czech Republic, EU. ISBN 978-80-87294-24-6 (for indexing in Thomson Reuters Web of Knowledge). P. 370–375.

10. Борисов С.С., Мазур И.П. Программа расчета энергосиловых параметров холодной прокатки. – М: ВНТИЦ. Инв. № 50201250486. Дата приоритета 22.04.2012г.