

На правах рукописи



КОЖЕВНИКОВА Ирина Александровна

**РАЗРАБОТКА,
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ,
ИССЛЕДОВАНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ
ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОКАТКИ
ОСОБО ТОНКИХ СТАЛЬНЫХ ПОЛОС**

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Череповец – 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет».


- Научный консультант – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники
РФ Гарбер Эдуард Александрович
- Официальные оппоненты – **Бельский Сергей Михайлович**
доктор технических наук, ОАО «НЛМК», главный специалист по качеству
- **Роберов Илья Георгиевич**
доктор технических наук, ФГУП «НИИСУ», главный технолог
- **Чиченев Николай Алексеевич** доктор технических наук, профессор, НИТУ «МИСиС», профессор
- Ведущая организация – Ордена Трудового Красного Знамени Научно-исследовательский, проектный и конструкторский институт сплавов и обработки цветных металлов (ОАО «Институт Цветметобработка»)

Защита диссертации состоится 26 декабря 2012 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.060.02 при ФГБУН Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН) по адресу: 117334, г. Москва, Ленинский пр., 49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИМЕТ РАН.

Автореферат разослан «___» _____ 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

 Шелест А.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Под воздействием развития ряда отраслей машиностроения, особенно автомобильной промышленности, а также строительной индустрии, в сортаменте, технологии и оборудовании широкополосных станов горячей и холодной прокатки произошли большие изменения. Одно из них – уменьшение освоенной толщины как горячекатаных, так и холоднокатаных полос. На многих действующих станах стали прокатывать особо тонкие полосы, толщина которых меньше, чем было предусмотрено при их проектировании.

Так, на ряде широкополосных станов горячей прокатки освоили технологию производства стальных полос толщиной 0,8–1,5 мм, ранее относившихся к сортаменту станов холодной прокатки, так как многие предприятия машиностроения и строительной индустрии перешли на использование более дешевых тонких горячекатаных полос после того, как увеличились их прочность, пластичность и улучшилось качество поверхности. В 2010–2011 г.г. объем производства особо тонких горячекатаных полос на ЧерМК ОАО «Северсталь» составил 10–12% от общего объема выпускаемого металла. Следует отметить, что с 2008 г. спрос на горячекатаный прокат толщиной менее 1,5 мм увеличился в 2 раза.

На станах холодной прокатки, предназначенных для производства полос автомобильного и конструкционного сортамента с минимальной проектной толщиной 0,45–0,5 мм, например, на 5-клетевом стане «1700» ЧерМК ОАО «Северсталь», освоили прокатку особо тонких полос с конечной толщиной 0,2–0,3 мм. В общем объеме производства холоднокатаного металла выпуск полос указанных толщин стабилен и составляет 35–40%, в то время как полосы толщиной 0,5–0,8 мм производятся в объемах, не превышающих 25%.

На Череповецком металлургическом комбинате ОАО «Северсталь» особо тонкий горячекатаный прокат производится по европейскому стандарту EN 10025-2 и техническим условиям ТУ 14-105-767-06, особо тонкий холоднокатаный прокат – по российским стандартам ГОСТ 9045-93, ГОСТ 19904-90 и ряду зарубежных стандартов (EN 10130-91, ASTM A 620, JIS G3 141-90).

Одновременно с расширением сортамента тонколистовых станов, под воздействием требований потребителей продукции существенно уменьшены допуски на разнотолщинность и неплоскостность, установлены более жесткие нормативы чистоты поверхности полос.

Указанные изменения сортамента тонких листов и требований к показателям их качества привели к возникновению ряда проблем в эксплуатации действующих широкополосных станов. Отметим наиболее существенные из них.

1. Возросшие требования к точности размеров и плоскостности полос привели к необходимости повышения точности расчета режимов прокатки на

непрерывных станах. Эти расчеты основывались на методах теории прокатки, разработанных в 40^х–70^х годах прошлого века применительно к сортаменту и технологии того периода. Проверка их точности при прокатке особо тонких полос ранее не производилась.

2. Уменьшение освоенной толщины полос привело к росту суммарных и частных обжатий на действующих станах, что вызвало увеличение усилий прокатки и расхода энергии, при этом в ряде случаев нагрузки на узлы рабочих клеток и мощность двигателей главного привода повысились до значений, превышающих допустимые, указанные в конструкторской документации разработчиков и изготовителей оборудования.

Необходимо было проанализировать точность наиболее распространенных методов энергосилового расчета процессов тонколистовой прокатки, оценить их пригодность для изменившихся условий работы широкополосных станов, чтобы на основании этого анализа решать вопросы о допустимости использования действующих узлов главных линий привода рабочих клеток или о необходимости их замены. Подобный анализ точности классических методов энергосилового расчета на широком диапазоне марок стали, ширин и толщин полос сортамента современных станов ранее не проводился. Как правило, точность расчета энергосиловых параметров проверяли либо на натуральных моделях, либо на ограниченном объеме промышленных данных путем установки в рабочие клетки специальных датчиков и измерительной аппаратуры.

Большинство современных станов оснащены стационарными автоматизированными системами контроля и управления параметрами технологии, что открывает новые возможности для совершенствования методов их энергосилового и технологического расчетов при прокатке особо тонких полос.

3. Основываясь на практическом опыте совершенствования технологии тонколистовой прокатки, специалисты ЧерМК ОАО «Северсталь» совместно с учеными Череповецкого государственного университета выдвинули гипотезу о влиянии положения нейтрального сечения в очаге деформации рабочей клетки стана холодной прокатки на чистоту поверхности холоднокатаных полос. Перед учеными-прокатчиками была поставлена задача – проверить эту гипотезу в производственных условиях.

Для преодоления указанных проблем в эксплуатации и технологии широкополосных станов и для решения задачи повышения точности определения их технологических и энергосиловых параметров необходимо было разработать и применить для действующих станов такие методы расчета, которые определяли бы с минимальными погрешностями не только усилия и мощность прокатки, но и положения нейтральных сечений в их очагах деформации.

Теория прокатки, созданная работами выдающихся отечественных ученых, обеспечила конструкторов прокатных станов и технологов прокатных цехов надежными методами расчета технологии и оборудования, благодаря чему в 20 веке в России, Украине и других республиках бывшего

СССР были введены в действие и успешно работают высокопроизводительные прокатные станы, в том числе – широкополосные, производящие горячекатаные и холоднокатаные тонкие полосы.

Однако для решения изложенных выше новых задач листопрокатного производства потребовалось дальнейшее развитие теории листовой прокатки, особенно в части повышения точности расчета технологических и энергосиловых параметров широкополосных станов при производстве особо тонких полос. При этом необходимо было реализовать вновь открывшиеся возможности по использованию баз данных АСУ ТП действующих станов для отладки и обеспечения необходимой точности всех расчетных методик.

Цели работы.

1. Теоретическое обоснование и совершенствование методов энергосилового и технологического расчетов процессов горячей и холодной прокатки особо тонких широких полос.

2. Применение разработанных методов расчета для исследования и внедрения высокоэффективных технологий прокатки, обеспечивающих производство особо тонких высококачественных полос в необходимых объемах.

Задачи работы.

1. Анализ основных положений теории листовой прокатки для выявления причин, вызывающих уменьшение точности расчета энергосиловых и технологических параметров процессов производства наиболее тонких полос.

2. Разработка усовершенствованных методов расчета, обеспечивающих повышение точности вычисления технологических и энергосиловых параметров при горячей и холодной прокатке особо тонких полос на широкополосных станах.

3. Промышленная апробация и отработка усовершенствованных методов энергосилового и технологического расчетов процессов прокатки с использованием баз данных АСУ ТП действующих станов.

4. Исследование влияния основных факторов технологии на геометрические и энергосиловые параметры очагов деформации при прокатке особо тонких полос.

5. Использование результатов исследований и усовершенствованных методов расчета для разработки эффективных технологических режимов широкополосных станов, обеспечивающих экономию энергии и улучшение качества полос.

6. Испытания и внедрение на действующих станах эффективных технологических режимов.

Научная новизна результатов работы.

1. Разработана упругопластическая модель напряженно-деформированного состояния полосы в очаге деформации при прокатке тонких полос на непрерывных широкополосных станах. Установлено, что при переходе действующих широкополосных станов на прокатку особо тонких полос существенно возрастает длина упругих участков очагов

деформации рабочих клеток: при холодной прокатке до 50–70%, при горячей прокатке до 17–21% от общей длины очага деформации.

2. Разработаны уточненные методы расчета энергосиловых параметров непрерывных широкополосных станов горячей и холодной прокатки. Их отличие от известных методов состоит в том, что контактные напряжения и удельные работы прокатки определяются отдельно на каждом из участков очага деформации, при этом уравнение пластичности используется только на пластических участках, а на упругих участках оно заменено уравнением упругого состояния, структура которого впервые предложена в данной работе.

3. Установлено, что при холодной прокатке в промышленных условиях имеются такие очаги деформации, в которых зона опережения и нейтральное сечение отсутствуют. Предложены критерии идентификации типа очага деформации, позволяющие в процессе энергосилового расчета определить наличие или отсутствие в нем нейтрального сечения.

4. При холодной прокатке статистически достоверно доказана зависимость чистоты поверхности холоднокатаных полос от положений нейтральных сечений в очагах деформации рабочих клеток.

5. Получены математические выражения для соотношений между силами, действующими на узел рабочих валков, исключая резонансные вибрации в рабочей клетке. В отличие от работ зарубежных специалистов, предлагающих для борьбы с вибрациями методы конструктивного характера (изменение динамических свойств клетки путем введения демпфирующих устройств или активных элементов) и технологические мероприятия (подача дополнительной смазки, снижение скорости прокатки), представленная в данной работе методика позволяет разрабатывать режимы прокатки, полностью исключая возможность возникновения вибраций.

Практическая ценность результатов работы.

1. Разработана эффективная технология холодной прокатки на непрерывном стане, обеспечивающая повышение чистоты поверхности полос посредством корректировки режимных параметров по положению нейтрального сечения в очаге деформации.

2. Разработан способ холодной прокатки, обеспечивающий снижение энергозатрат на 3–8% посредством целенаправленной корректировки технологических параметров (перераспределения частных обжатий и натяжений между клетями).

3. Разработана технология холодной прокатки на 4-клетевом стане, обеспечивающая снижение обрывности, поверхностной загрязненности холоднокатаных полос и энергозатрат.

4. Разработаны усовершенствованные режимы холодной прокатки на непрерывном стане, обеспечивающие устранение резонансных вибраций и существенное повышение скорости прокатки.

5. Разработаны усовершенствованные режимы горячей прокатки, обеспечивающие снижение уровня контактных напряжений, расхода энергии при прокатке и повышение точности размеров горячекатаных полос.

6. Разработана усовершенствованная методика настройки скоростного режима непрерывных станов холодной прокатки, в которой скорости вращения валков рассчитаны с использованием представленных в работе формул коэффициентов опережения, при этом, за счет стабилизации скоростного режима, обеспечено уменьшение колебаний толщины полосы в 1,5–2 раза.

Обоснованность и достоверность основных положений и результатов диссертации подтверждена комплексом исследований и экспериментов на действующих широкополосных станах горячей и холодной прокатки, использованием современных методов исследования и корректных методов статистической обработки данных измерений и расчетов. Сформулированные научные положения отвечают современным представлениям о природе деформирования металлов, положениям теории пластичности и теории продольной прокатки, а также согласуются с известными работами по рассматриваемой проблеме.

Личный вклад соискателя. Личное участие автора выразилось в постановке задач исследований, в получении основных научных результатов, в разработке, исследованиях, испытаниях и внедрении эффективных технологий горячей и холодной прокатки особо тонких полос.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 21 международной научно-технической конференции, 6 из которых проходили за рубежом (см. список опубликованных работ).

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 67 статей, в том числе 19 в журналах, рекомендованных ВАК, 4 в журнале «Russian Metallurgy», 2 в монографии издательства «CRC Press Taylor & Francis Group» (США), 29 в сборниках трудов международных конференций, получено 3 патента на изобретения Российской Федерации и 1 патент на изобретение Украины, выпущена 1 монография и 3 учебных пособия с грифом Учебно-методического объединения по образованию в области металлургии, получено положительное решение по заявке на патент Российской Федерации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы из 223 наименований. Объем диссертации составляет 233 страницы машинописного текста, 42 рисунка, 60 таблиц и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Анализ технологии производства особо тонких полос на широкополосных станах горячей и холодной прокатки

Для выявления проблемных участков существующей технологии прокатки особо тонких полос и определения направлений ее совершенствования были собраны, систематизированы и проанализированы

данные, в том числе – содержащиеся в АСУ ТП, о фактических режимах и энергосиловых параметрах действующих непрерывных широкополосных станов горячей и холодной прокатки.

В результате анализа установлены следующие особенности технологии прокатки особо тонких горячекатаных и холоднокатаных полос:

1. Суммарные обжатия в чистовых группах клетей широкополосных станов горячей прокатки при освоении производства полос с конечной толщиной менее 1,5 мм увеличились с 88–92% до 94–97%, что привело к увеличению частных обжатий в трех первых рабочих клетях с 25–50% до 50–63%, а в трех последних – с 15–30% до 25–40%.

При холодной прокатке полос с конечной толщиной 0,2–0,3 мм диапазоны суммарных обжатий возросли до 80–83%. Для поддержания обжатия в последней клетке на уровне 2–5% увеличили до 35–40% частные обжатия в предыдущих клетях, что привело к их предельной загрузке. Уменьшить загрузку этих клетей можно, снизив суммарное обжатие, то есть применив для производства особо тонких холоднокатаных полос горячекатаный подкат толщиной менее 1,5 мм.

2. Величина межклетевых натяжений при горячей прокатке не превышает 2–5% от величины сопротивления металла деформации, вместо рекомендованных значений 10–15%, то есть стабилизирующая роль натяжений почти не используется.

При холодной прокатке полос толщиной менее 0,5 мм величины межклетевых удельных натяжений необходимо устанавливать в диапазоне 18–22% от предела текучести полосы в соответствующем межклетевом промежутке с целью снижения обрывности полос. Анализ базовой технологии показал, что на некоторых станах фактические величины удельных натяжений достигают 30–35% от предела текучести, что существенно превышает их оптимальные значения.

3. Фактическая температура подката перед чистовой группой на ряде станов горячей прокатки находится в диапазоне 980–1060 °С, что не позволяет в полной мере использовать температурный фактор для снижения контактных напряжений, усилий и мощности прокатки.

Рекомендованное значение температуры, позволяющее существенно снизить уровень контактных напряжений, не ухудшить микроструктуру и механические свойства готового проката толщиной менее 2,0 мм, составляет 1080 °С.

4. Нормальные контактные напряжения между полосой и валками в чистовых клетях станов горячей прокатки достигают значений 1300–1450 МПа, что соответствует уровню напряжений при холодной прокатке. Это существенно снижает стойкость рабочих валков, особенно в последних клетях.

5. При освоении производства особо тонких полос существенно увеличилась протяженность упругих участков в очагах деформации: при горячей прокатке – до 17–21%, при холодной прокатке – до 50–70% от общей длины очага деформации, что снизило точность расчетов режимов обжатий и

натяжений с помощью методов теории прокатки, использующих уравнение пластичности на всей протяженности очага деформации.

6. Процесс холодной прокатки полос толщиной менее 0,5 мм на непрерывных широкополосных станах по производству автомобильных и конструкционных листов нередко сопровождается вибрациями в рабочих клетях, которые вызывают дефекты на поверхности полос (типа «поперечной ребристости») и не позволяют увеличивать скорость прокатки до проектных значений.

Таким образом, в силу указанных особенностей производство особо тонких полос по традиционным технологиям характеризуется высокой энергоемкостью, снижением стойкости валков, ухудшением ряда показателей точности и качества металла, невозможностью в ряде случаев вести прокатку на максимальных рабочих скоростях, предусмотренных проектными характеристиками оборудования.

Для преодоления этих негативных тенденций необходима разработка эффективных технологических режимов прокатки, которые должны основываться на усовершенствованных методах энергосилового расчета, учитывающих отмеченные изменения в геометрии очагов деформации и в условиях контактного трения между полосой и валками, а также включать методы исключения вибраций в рабочих клетях.

Глава 2. Анализ известных методов энергосилового и технологического расчетов процессов тонколистовой прокатки

На основании анализа технологии производства особо тонких полос на действующих широкополосных станах, выполнен литературно-аналитический обзор научных работ в области теории и технологии тонколистовой прокатки.

Показан определяющий вклад в развитие теории и технологии листопрокатного производства, внесенный трудами разных поколений ученых и специалистов ВНИИМЕТМАШ, ЦНИИЧЕРМЕТ, МИСиС, ИМЕТ РАН, МГВМИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, СПГТУ, УГТУ, ЮУрГТУ, ЛГТУ, МГТУ им. Г.И. Носова, ЧГУ, Донецкого государственного технического университета, Новолипецкого металлургического комбината, Уралмашзавода.

Отмечено, что последние 15 лет ознаменованы серьезными достижениями в области энергосбережения, улучшения качества тонколистового проката, внедрения эффективных технологических и технических решений.

В аналитическом обзоре особое внимание уделено исследованиям, которые наиболее близки к тематике настоящей диссертации. Это – теоретические и экспериментальные исследования, позволившие принципиально оценить влияние упругого сжатия валков в контакте с полосой и упругой деформации полосы на границах очага деформации на основные характеристики процесса прокатки тонких полос и лент (широко известные работы В.К. Белосевича, Я.Д. Василева, А.В. Зиновьева,

А.А. Королева, С.Л. Коцаря, В.Л. Мазура, В.П. Полухина, С.Е. Рокотяна, Е.М. Третьякова, В.Н. Хлопонина).

Аналитический обзор показал, что технический прогресс листопрокатного производства, отмеченные выше тенденции изменения сортамента, выразившиеся в освоении производства на действующих станах горячей и холодной прокатки особо тонких полос с жесткими требованиями к качеству, к точности размеров и плоскостности, потребовали корректировки следующих положений теории тонколистовой прокатки:

– при расчете напряженно-деформированного состояния полосы условие пластичности, как правило, применяют для всей протяженности очага деформации, в том числе – для упругих участков, где оно не действует;

– в энергосиловом расчете процесса горячей прокатки коэффициент трения скольжения между полосой и валками используют на всей длине очага деформации, без учета того, что большую часть этой длины (от 79% до 99%) занимает зона прилипания, в которой трение скольжения между полосой и валками отсутствует, а напряжения трения зависят не от коэффициента трения скольжения, а от сопротивления чистому сдвигу материала полосы;

– в известных методиках отсутствует математический аппарат для определения геометрических и энергосиловых параметров очагов деформации рабочих клеток станов холодной прокатки, не имеющих нейтральных сечений.

– в энергосиловом расчете станов холодной прокатки отсутствует условие исключения резонансных вибраций в рабочих клетях;

– при расчете мощности прокатки в большинстве известных методов не учитывают работу сил, вызванных касательными напряжениями, противоположно направленными в зонах отставания и опережения.

Глава 3. Развитие теории процесса холодной прокатки

Теоретические положения и их обоснование

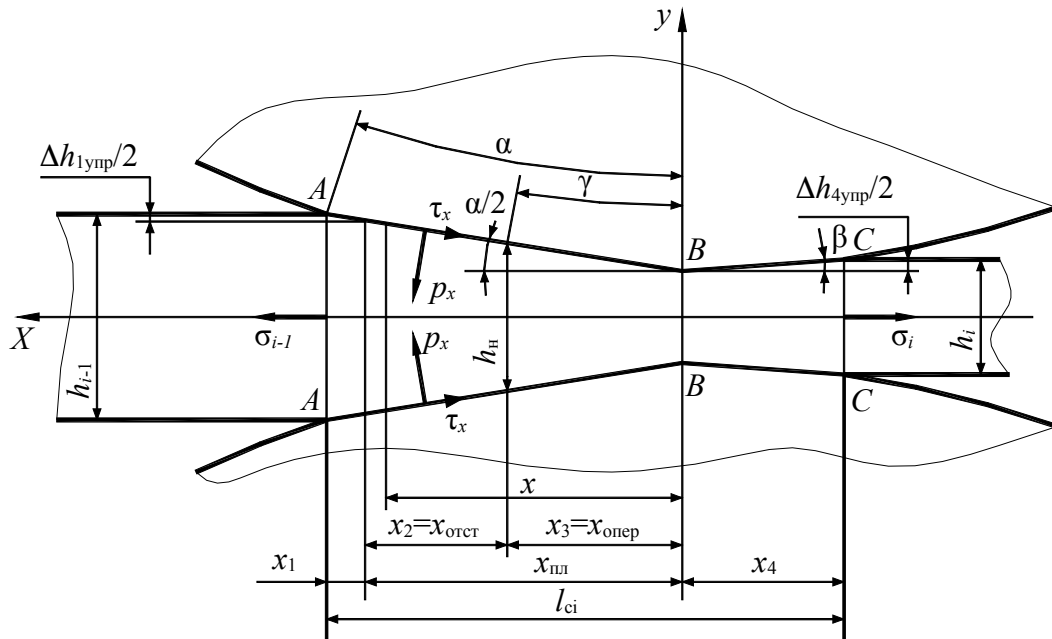
В теорию процесса холодной прокатки предложено ввести следующие положения:

а) Контактные напряжения рассчитываются отдельно на каждом упругом и пластическом участке очага деформации (рисунок 1).

Согласно представленной схеме, очаг деформации аппроксимирован двумя отрезками прямых AB и BC (такая аппроксимация для условий тонколистовой прокатки, когда угол захвата $\alpha \leq 3...8^\circ$, а соотношение $\Delta h_i/l_{ci} \leq 0,003-0,04$, не вносит сколько-нибудь существенных погрешностей в расчет) и состоит из трех участков:

- 1) упругого сжатия полосы длиной x_1 ;
- 2) пластической деформации длиной $x_{пл}$, включающего две зоны: отставания длиной $x_2 = x_{отст}$ и опережения длиной $x_3 = x_{опер}$;

3) упругого восстановления части толщины полосы на выходе из очага деформации длиной x_4 .



h_{i-1} , h_i — толщина полосы на входе и выходе из i -й клетки; h_n — толщина полосы в нейтральном сечении; σ_{i-1} , σ_i — заднее и переднее удельные натяжения; p_x , τ_x — нормальные и касательные контактные напряжения; α — угол захвата; β — угол, характеризующий участок упругого восстановления; γ — нейтральный угол; $\Delta h_{1упр}$, $\Delta h_{4упр}$ — максимальные величины абсолютных упругих деформаций полосы по толщине на участках с длинами x_1 и x_4

Рисунок 1 – Схема очага деформации

б) При расчете контактных напряжений на упругих участках, вместо условия пластичности, применено уравнение упругости.

Для условий плоской деформации металла уравнение пластичности может быть записано в виде:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2\tau_s,$$

где σ_1 , σ_3 — главные нормальные напряжения; τ_s — сопротивление чистому сдвигу, $2\tau_s = 1,15\sigma_\phi$; σ_ϕ — сопротивление металла пластической деформации.

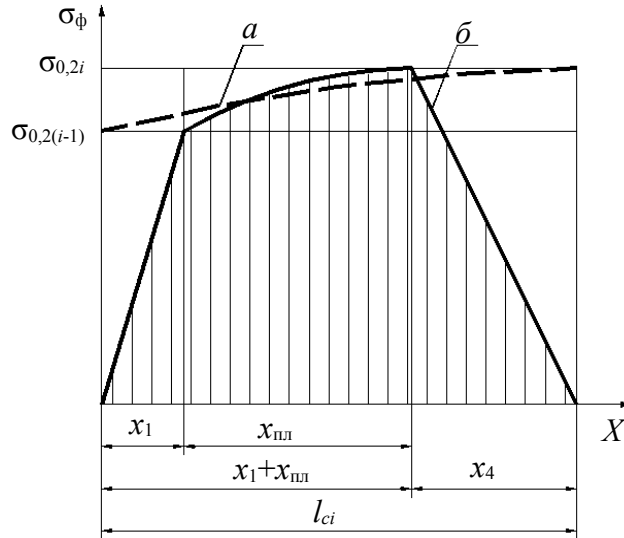
Так как угол захвата при тонколистовой прокатке мал, в качестве главных нормальных напряжений А.И. Целиков предложил принять: $\sigma_1 = -\sigma_x$, $\sigma_3 = -p_x$, тогда уравнение пластичности примет вид:

$$p_x - \sigma_x = 1,15\sigma_\phi. \quad (1)$$

Определение сопротивления металла деформации на упругих и пластических участках очага деформации в данной работе предложено выполнять на основе схематического графика изменения σ_ϕ по длине очага, представленного на рисунке 2 (ломаная б). Особенность этого графика состоит в том, что на упругих участках длиной x_1 и x_4 нет пластической деформации, там имеют место упругие деформации и изменение сопротивления деформации полосы на этих участках подчиняется закону Гука:

$$\sigma_{\phi 1}(h_x) = E_{II} \varepsilon_{h_x} = E_{II} \frac{\Delta h_x}{h_{i-1}}; \quad \sigma_{\phi 3}(h_x) = E_{II} \varepsilon_{h_x} = E_{II} \frac{\Delta h_x}{h_i}, \quad (2)$$

где E_{II} – модуль упругости материала полосы; Δh_x , ε_{h_x} – абсолютная и относительная упругие деформации полосы по толщине на упругих участках.



«а» – согласно существующим методикам; «б» – фактическая зависимость
Рисунок 2 – Изменение сопротивления деформации по длине очага деформации i -й клетки непрерывного стана

С учетом формул (2), уравнения упругости для участков упругого сжатия полосы длиной x_1 и упругого восстановления длиной x_4 могут быть выражены, по аналогии с уравнением пластичности, следующим образом:

$$p_x - \sigma_x = 1,15 E_{II} \left(1 - \frac{h_x}{h_{i-1}} \right); \quad p_x - \sigma_x = 1,15 E_{II} \left(1 - \frac{h_x}{h_i} \right). \quad (3)$$

На пластическом участке изменение сопротивления деформации представлено функцией, предложенной А.В. Третьяковым: $\sigma_{0,2}(\varepsilon) = \sigma_{0,2исх} + A\varepsilon^B$. С целью упрощения расчетов на этом участке значение сопротивления деформации усреднено:

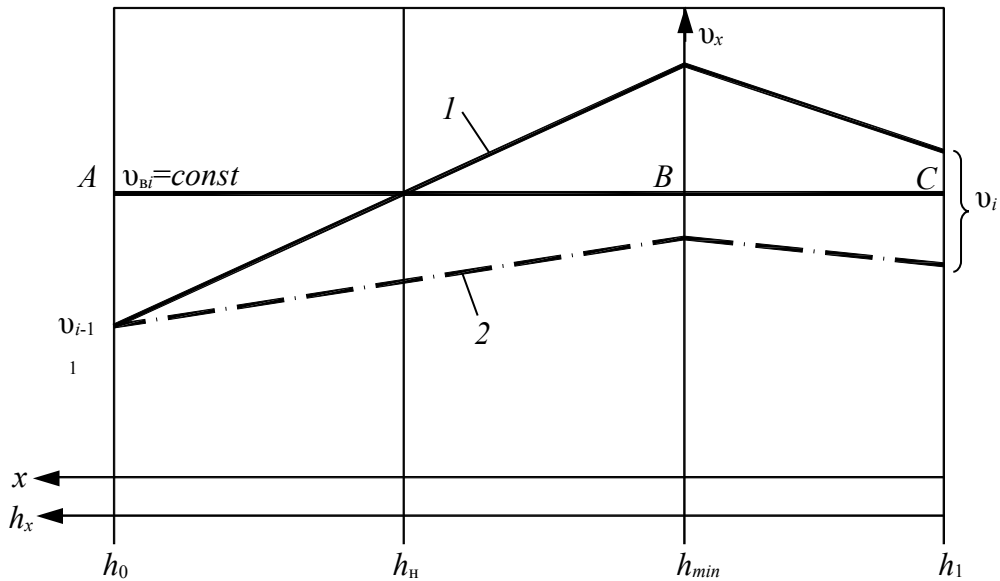
$$\sigma_{\phi 2} = \sigma_{0,2исх} + \frac{A}{B+1} \frac{\varepsilon_{\Sigma_i}^{B+1} - \varepsilon_{\Sigma_{i-1}}^{B+1}}{\varepsilon_{\Sigma_i} - \varepsilon_{\Sigma_{i-1}}}, \quad (4)$$

где $\sigma_{0,2исх}$ – предел текучести материала полосы в исходном, недеформированном состоянии; A , B – эмпирические величины, определяемые пластическими свойствами стали; ε_{Σ_i} , $\varepsilon_{\Sigma_{i-1}}$ – суммарное относительное обжатие за i -й и $(i-1)$ -й проходы.

в) В развитие существующих положений теории листовой прокатки, решена задача расчета контактных напряжений в очаге деформации не только с нейтральным сечением (рисунок 1), но и без нейтрального сечения.

Тип очага деформации определяет характер изменения средней в поперечном сечении скорости полосы по длине этого очага. Возможные варианты схематизированных графиков изменения средней по сечению

скорости полосы v_x представлены на рисунке 3, на этом же графике в виде прямой показана окружная скорость бочки валка v_{Bi} .



1 – с нейтральным сечением; 2 – без нейтрального сечения

Рисунок 3 – Изменение средней в поперечном сечении скорости полосы по длине очага деформации i -й клетки

Скорость полосы в любом поперечном сечении x очага деформации (рисунок 1) определяется из закона постоянства секундного объема:

$$v_x = v_i \frac{h_i}{h_x}, \quad (5)$$

где v_i – скорость прокатки в i -й клетки; h_i – толщина полосы на выходе из i -й клетки; h_x – толщина полосы в сечении с координатой x .

Согласно выражению (5), средняя в поперечных сечениях скорость полосы v_x увеличивается из-за уменьшения толщины от сечения AA до сечения BB (рисунки 1 и 3). Возможны следующие варианты увеличения скорости.

Вариант «А» – увеличение скорости происходит по линии 1. В этом случае скорость полосы v_x , увеличиваясь по мере обжатия, достигает величины $v_x = v_{Bi}$ на значительном удалении от сечения, проходящего через вертикальную осевую плоскость рабочих валков, в котором толщина полосы минимальна (h_{min}). На участке BC скорость полосы уменьшается из-за некоторого увеличения ее толщины вследствие упругого восстановления. Очаг при таком графике изменения скорости полосы имеет нейтральное сечение толщиной h_n и состоит из 4^х участков: двух упругих с длинами x_1 и x_4 и двух пластических – зон отставания и опережения с длинами $x_2 = x_{отст}$, $x_3 = x_{опер}$. Скорость полосы на выходе из валков v_i больше окружной скорости вращения валков v_{Bi} :

$$\frac{v_{max}}{v_{Bi}} > 1, \quad \frac{v_i}{v_{Bi}} > 1.$$

Критериями идентификации очага деформации по варианту «А» являются неравенства: $\frac{h_{н1}}{h_{\min}} > 1, \frac{h_{н1}}{h_i} > 1$.

Вариант «Б» – увеличение скорости происходит по линии 2. В данном случае скорость полосы, увеличиваясь от сечения AA к сечению BB , не успевает достичь величины, равной скорости валков, а на втором упругом участке скорость уменьшается из-за некоторого увеличения толщины полосы. Поэтому такой очаг деформации не имеет нейтрального сечения и зоны опережения, он состоит только из трех участков – тех же двух упругих и одного пластического длиной $x_{23} = x_{пл}$, а скорость полосы на выходе v_i меньше окружной скорости валков:

$$\frac{v_{\max}}{v_{vi}} < 1, \frac{v_i}{v_{vi}} < 1.$$

Критериями идентификации очага деформации по варианту «Б» являются неравенства: $\frac{h_{н1}}{h_{\min}} < 1, \frac{h_{н1}}{h_i} < 1$.

г) Установлено, что на современных станах холодной прокатки, использующих эффективные смазочно-охлаждающие жидкости новых поколений, зоны прилипания в очагах деформации рабочих клеток полностью отсутствуют, что, в отличие от станов горячей прокатки, позволило распространить закон трения скольжения на всю протяженность очага деформации.

Прилипание возникает в той части длины очага деформации, где касательные контактные напряжения τ_x , возрастающие пропорционально нормальным контактным напряжениям p_x по закону трения скольжения $\tau_x = \mu p_x$, достигают максимально возможной величины $\tau_{x\max} = \tau_s$. Расчеты показали, что максимальные значения касательных напряжений в очаге деформации при холодной прокатке в 4–17 раз меньше сопротивления чистому сдвигу материала полосы, это и является доказательством отсутствия зоны прилипания в очагах деформации современных станов холодной прокатки.

Методика определения протяженности участков очага деформации

Длина очага деформации в i -й клетки определяется по формуле:

$$l_{ci} = x_1 + x_{пл} + x_4.$$

Протяженности первого упругого и пластических участков можно определить, выполнив геометрические вычисления (рисунок 1):

$$\begin{aligned} x_1 + x_{н1} &= \sqrt{\frac{D_p}{2} \Delta h_i + x_4^2}; x_1 = \frac{\Delta h_{1\text{упр}}(x_1 + x_{н1})}{\Delta h_i + \Delta h_{4\text{упр}}}; \\ x_{н1} &= \sqrt{\frac{D_p}{2} \Delta h_i + x_4^2} - x_1; x_3 = \frac{(h_{н1} - h_i + \Delta h_{4\text{упр}})}{2 \operatorname{tg}(\alpha/2)}; x_2 = x_{пл} - x_3, \end{aligned} \quad (6)$$

где D_p – диаметр бочки рабочего валка; Δh_i – абсолютное обжатие в i -й клетки.

Протяженность второго упругого участка x_4 определяется с учетом реальных особенностей контакта полосы и валков по модифицированной формуле Герца:

$$x_4 = 8p_{cpi}R \left(\frac{1-\nu_B^2}{\pi E_B} + \frac{1-\nu_{II}^2}{\pi E_{II}} \right) \cdot K_i, \quad (7)$$

где p_{cpi} – среднее значение нормальных контактных напряжений; R – радиус бочки рабочего валка; ν_B, ν_{II} – коэффициент Пуассона материала валков и полосы; E_B – модуль упругости материала валков; K_i – поправочный коэффициент, введенный в данной работе с целью учета факторов, отличающих движущуюся полосу от неподвижного полупространства (наклеп полосы, ее толщину и коэффициент трения между полосой и валками):

– если $\Delta\sigma_{0,2i} \cdot h_i / \mu_i > 5200$ МПа·мм, то $K_i = 1$;

– если $\Delta\sigma_{0,2i} \cdot h_i / \mu_i \leq 5200$ МПа·мм, то K_i рассчитывается по регрессионному уравнению:

$$K_i = 0,718 - 0,024 \cdot \frac{\Delta\sigma_{0,2i}}{\Delta\sigma_{0,2\delta}} + 0,164 \cdot \frac{h_i}{h_{\min}} - 0,132 \cdot \left(\frac{\mu_i}{\mu_{\min}} \right)^2,$$

где $\Delta\sigma_{0,2i}$ – наклеп полосы; $\Delta\sigma_{0,2\delta}$ – базисное значение наклепа полосы, $\Delta\sigma_{0,2\delta} = 300$ МПа; h_{\min} – минимальная толщина прокатываемых полос, $h_{\min} = 0,2$ мм; μ_{\min} – минимальное значение коэффициента трения в очаге деформации, $\mu_{\min} = 0,03$.

Расчет нормальных контактных напряжений с отдельным учетом напряженного состояния на упругих и пластических участках

В соответствии с принятым подходом, для расчета контактных напряжений, по аналогии с методом А.И. Целикова, составляют систему трех уравнений, однако, в отличие от этого метода, делают это отдельно для каждого упругого и пластического участков:

Первое уравнение – дифференциальное уравнение равновесия полосы в очаге деформации.

Второе уравнение – закон трения скольжения Амонтона.

Третье уравнение – уравнение, выражающее условие упругости или пластичности (выражения (3), (1)).

В результате решения системы получают расчетные формулы нормальных контактных напряжений p_x .

Формулы для расчета средних значений нормальных контактных напряжений на каждом участке очага деформации получают путем интегрирования выражений $p_{x(j)}$:

$$p_j = \frac{\int_{h_{j-1}}^{h_j} p_{x(j)}(h_x) dh_x}{|h_j - h_{j-1}|}, \quad (8)$$

где p_j – среднее значение $p_{x(j)}$ на j -ом участке;
 h_{j-1}, h_j – толщины полосы на границах этого участка.

Анализ формул контактных напряжений на упругих участках показывает, что эти напряжения прямо пропорциональны модулю упругости материала полосы, а не сопротивлению пластической деформации, существенно зависят от коэффициента трения в очаге деформации и уменьшаются с ростом натяжений полосы. Сопротивление пластической деформации также влияет на величину средних удельных давлений на этих участках, но по сложной функциональной зависимости.

Анализ формул контактных напряжений для пластического участка показывает, что они прямо пропорциональны сопротивлению пластической деформации, в сложной зависимости растут при увеличении коэффициента трения и уменьшаются с ростом натяжений полосы. Эти выводы качественно (но не количественно) совпадают с результатами, известными из классического решения. Однако, в отличие от этого решения, новые расчетные формулы учитывают (через модуль упругости полосы) влияние на контактные напряжения в пластической области упругих деформаций на входе в очаг деформации и выходе из него.

По известным средним значениям нормальных контактных напряжений на каждом участке средние для каждой схемы очага деформации значения вычисляют по формулам:

– вариант «А» (с нейтральным сечением):

$$p_{cpi} = \frac{1}{l_{ci}} (p_1 x_1 + p_2 x_{омст} + p_3 x_{онер} + p_4 x_4);$$

– вариант «Б» (без нейтрального сечения): $p_{cpi} = \frac{1}{l_{ci}} (p_1 x_1 + p_{23} x_{nl} + p_4 x_4).$

Изложенную методику реализуют с помощью итерационного алгоритма.

Для расчета усилия прокатки используют известную формулу:

$$P = p_{cpi} l_{ci} b, \quad (9)$$

где b – ширина прокатываемой полосы.

Определение мощности прокатки

В отличие от известных методик, составляющие работы прокатки вычисляют отдельно для каждого из упругих и пластических участков очага деформации.

Работу нормальных и касательных сил на каждом участке, в соответствии с расчетной схемой (рисунок 4), вычисляют отдельно в горизонтальном (вдоль оси прокатки) и вертикальном (перпендикулярно к оси прокатки) направлениях, для чего находят проекции каждого из напряжений p_j, τ_j на указанные оси, а затем от проекций напряжений переходят к проекциям соответствующих сил и, найдя с помощью интегрирования для каждого участка путь соответствующей горизонтальной или вертикальной силы, определяют значения работы прокатки.

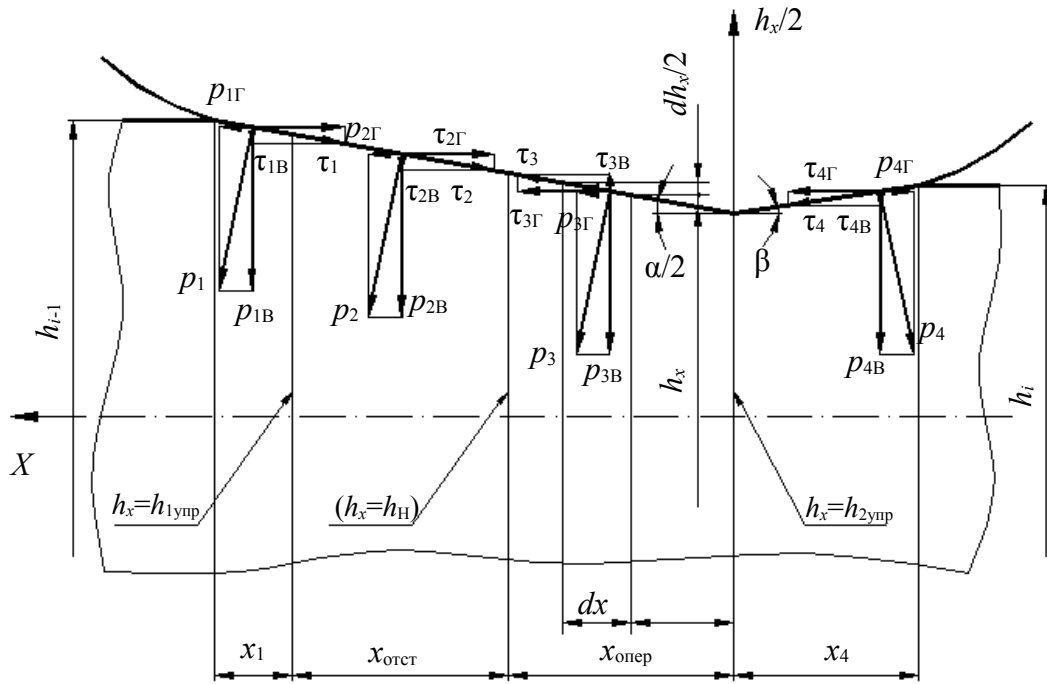


Рисунок 4 – Расчетная схема к определению мощности прокатки

Анализ полученных зависимостей дает основания для следующих выводов:

1) Работа и мощность прокатки зависят от касательных сил, вызванных касательными напряжениями; нормальные контактные напряжения влияют на мощность прокатки через принятый закон трения.

2) Полезную работу валки совершают только на первом упругом участке и в зоне отстаивания, а в зоне опережения и на втором упругом участке полоса возвращает валкам часть затраченной энергии (величины a_3 и a_4 отрицательны).

Удельную работу прокатки в целом для очага деформации i -ой клетки рассчитывают по формуле:

$$a_{\text{при}} = \sum_{j=1}^{j=4} a_j, \quad (10)$$

где a_j – удельная работа прокатки на j -м участке очага деформации.

Мощность прокатки полосы в i -й клетки вычисляют по формуле:

$$N_{\text{при}} = a_{\text{при}} \cdot v_i \cdot h_i \cdot b. \quad (11)$$

Определение коэффициентов опережения при прокатке

Коэффициент опережения характеризует количественную оценку расхождения скорости полосы и валков:

$$S_i = \frac{v_i}{v_{Bi}} - 1.$$

Если задана скорость прокатки в i -й клетки, то, зная величину коэффициента опережения S_i , можно определить скорость вращения валков:

$$n_i = \frac{60v_i}{(1 + S_i)\pi D_i}$$

Точность определения величины n_i зависит от погрешности расчета коэффициента опережения S_i .

Анализ наиболее известных методик расчета показал, что для очагов деформации с нейтральным сечением они позволяют вычислить S_i , но со значительными погрешностями, так как не учитывают напряженно-деформированное состояние полосы в упругих участках очага деформации. Для очага деформации без нейтрального сечения формулы для расчета S_i отсутствуют.

Для получения расчетных формул коэффициента опережения использовали изложенный выше метод энергосилового расчета. Преимущество этого метода состоит в том, что он позволяет с минимальными погрешностями определить толщину полосы в нейтральном сечении при его наличии в очаге деформации, а также рассчитать параметры очага деформации без нейтрального сечения.

Применив к нейтральному сечению и к выходному сечению закон постоянства секундных объемов полосы, получили расчетную формулу S_i для очага деформации с нейтральным сечением:

$$S_i = \frac{h_{ni}}{h_i \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\alpha/2)}} - 1.$$

Для очага деформации без нейтрального сечения применили закон постоянства секундных объемов полосы к выходному сечению и сечению с минимальной толщиной полосы. В результате получили формулу S_i для очага данного типа:

$$S_i = k \frac{h_{\min}}{h_i} - 1,$$

где k – коэффициент, зависящий от коэффициента трения в очаге деформации, $k = 0,96 \div 0,98$.

Глава 4. Развитие теории процесса горячей прокатки тонких широких полос

Теоретические положения и их обоснование

В теорию процесса горячей прокатки тонких широких полос предложено ввести теоретические положения, общие для горячей и холодной прокатки, обоснованные в главе 3, и ряд принципиально новых положений, следующих из особенностей напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации при горячей прокатке.

Общие положения следуют из того, что в рабочих клетях широкополосных станов горячей прокатки очаг деформации состоит, как и в клетях станов холодной прокатки, из двух упругих участков и пластического,

расположенного между ними. Поэтому контактные напряжения рассчитывают отдельно по участкам, причем в упругих участках, вместо уравнения пластичности, используют уравнения упругости (3).

В очаге деформации широкополосного стана горячей прокатки всегда есть нейтральное сечение, то есть по классификации, предложенной в главе 3, этот очаг относится к варианту «А».

Главное же отличие метода энергосилового расчета процесса горячей прокатки на широкополосных станах следует из существенной особенности напряженного состояния полосы, состоящей в том, что большая часть протяженности очага деформации при горячей прокатке представляет собой зону прилипания, в которой действует трение покоя, а не трение скольжения¹.

Исходя из изложенных положений, в данной работе принята схема напряженного состояния полосы в очаге деформации широкополосного стана горячей прокатки, согласно которой очаг состоит из трех участков (рисунок 5):

- 1) упругого сжатия полосы на входе в валки длиной $x_{1\text{упр}}$;
- 2) пластической деформации длиной $x_{\text{пл}}$, представляющего целиком зону прилипания;
- 3) упругого восстановления части толщины полосы на выходе из валков длиной x_2 .

По отношению к средней скорости по толщине полосы пластический участок состоит из двух зон – отставания длиной $x_{\text{пл.отст}}$ и опережения длиной $x_{\text{пл.опер}}$.

Протяженность первого упругого и пластических участков очага деформации определяется по формулам (6), протяженность второго упругого участка определяется по формуле (7) при $K_i = 1$.

Определение сопротивления деформации

Сопротивление деформации при горячей прокатке зависит от химического состава материала полосы, деформационных, температурных и скоростных параметров процесса. Точность определения этого параметра обуславливает точность прогнозирования контактных напряжений и, следовательно, энергосиловых, а через них геометрических и кинематических параметров процесса.

Изменение сопротивления деформации по длине очага в данной работе принято следующим образом:

- на упругих участках, как и при холодной прокатке (рисунок 2), сопротивление деформации изменяется линейно (по закону Гука);
- на пластическом участке среднее значение сопротивления остается постоянным, так как по мере продвижения полосы происходит его изменение одновременно по двум противоположным направлениям: из-за обжатия

¹ Н.А. Соболевским, А.И. Целиковым и А.А. Королевым в работах 1930–40-х годов было отмечено, что зона прилипания при определенных условиях может простирается по всей дуге захвата.

сопротивление растет в результате наклепа, а из-за высокой температуры уменьшается в результате рекристаллизации.

Для определения сопротивления деформации на пластическом участке использована формула Л.В. Андреюка, ее достоинства заключаются в очень широком наборе марок сталей и сплавов и возможности подсчитать сопротивление деформации по химическому составу стали:

$$\sigma_{\phi} = S\sigma_{od}u^a(10\varepsilon_i)^b(t_i/1000)^c,$$

где S , a , b , c – постоянные числа, определяемые для каждой марки стали по результатам испытаний на пластометре; σ_{od} – базисное значение сопротивления деформации; u – скорость деформации; t_i – температура полосы на выходе из i -й клетки.

Принятый закон распределения напряжений трения по длине очага деформации

Особенностью условий трения в зоне прилипания является то, что нормальные и касательные контактные напряжения в ней не зависят от коэффициента трения скольжения, а определяются величиной сопротивления чистому сдвигу материала полосы и разностью между средней в поперечных сечениях скоростью полосы и окружной скоростью бочки валков.

С учетом этого в данной работе принят схематизированный график изменения напряжений трения в очаге деформации при горячей прокатке (см. рисунок 5):

– на упругих участках очага деформации действует закон трения скольжения Амонтона:

$$\tau_x = \mu p_x; \quad (12)$$

– на пластическом участке, согласно работам Е.П. Унксова, касательные напряжения изменяются линейно от максимального значения $\tau_{x\max} = \tau_s$ до минимального значения $\tau_x = -\tau_s$, проходя через значение $\tau_x = 0$ в нейтральном сечении, в соответствии с выражением:

$$\tau_x = \tau_s \left(\frac{h_x - h_u}{h_{1\text{упр}} - h_u} \right), \quad (13)$$

где $h_{1\text{упр}}$ – толщина полосы на границе первого упругого и пластического участков.

Определение нормальных контактных напряжений и усилия прокатки

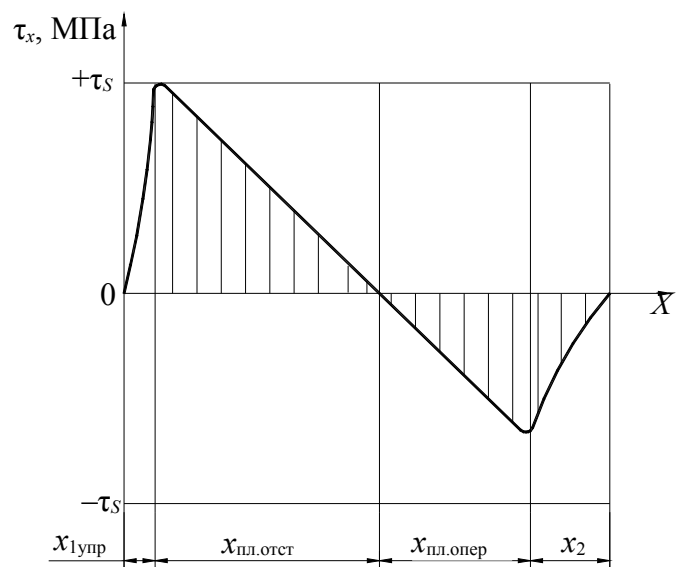


Рисунок 5 – Изменение касательных контактных напряжений в очаге деформации

Для расчета нормальных контактных напряжений, возникающих в очаге деформации при горячей прокатке, использован подход, обоснованный в главе 3, однако, в отличие от процесса холодной прокатки, где касательные контактные напряжения на протяжении всего очага деформации подчиняются закону трения скольжения, при горячей прокатке изменение касательных напряжений по длине очага принято по закону, выраженному формулой (13), в соответствии с графиком рисунка 5.

По известным средним значениям напряжений на каждом из трех участков среднее для всего очага деформации нормальное контактное напряжение вычисляют по формуле:

$$p_{срi} = \frac{1}{l_{ci}} (p_1 x_{1_{ynp}} + p_2 x_{нi} + p_3 x_2).$$

Изложенную методику реализуют с помощью итерационного алгоритма, расчет усилия прокатки производят по формуле (9).

Определение мощности прокатки

Методика расчета мощности горячей прокатки аналогична методике, разработанной для станов холодной прокатки (см. главу 3), однако, ее основное отличие состоит в принятом законе изменения касательных напряжений по длине очага деформации.

Средние значения касательных напряжений на упругих участках вычисляются на основе закона трения (12):

$$\tau_1 = \mu_i p_1, \tau_4 = -\mu_i p_4.$$

Знак минус в выражении для определения τ_4 указывает на противоположное по отношению к первому участку направление касательных напряжений.

По той же причине средние значения касательных напряжений на пластическом участке определяют в каждой из зон отдельно путем интегрирования в соответствующих границах выражения (13):

$$\text{в зоне отставания: } \tau_2 = \frac{\tau_s}{2};$$

$$\text{в зоне опережения: } \tau_3 = -\frac{\tau_s}{2} \left(\frac{h_u - h_{2_{ynp}}}{h_{1_{ynp}} - h_u} \right).$$

Удельная работа прокатки полосы при прохождении ее через валки i -й клетки представляет собой сумму удельных работ, вычисленных для каждого участка очага деформации:

$$a_{np} = a_1 + a_2 + a_3 + a_4.$$

Мощность прокатки полосы в i -й клетки вычисляют по формуле (11).

Глава 5. Оценка точности методов энергосилового расчета процессов горячей и холодной прокатки

Точность методов, изложенных в главах 3 и 4, проверяли путем сопоставления расчетных и измеренных усилий прокатки и мощности

двигателей главного привода рабочих клеток чистовой группы полунепрерывного комбинированного стана «2800/1700» производства горячекатаного проката, 4-клетевого и 5-клетевого непрерывных станов «1700» производства холоднокатаного проката ЧерМК ОАО «Северсталь» (Россия, г. Череповец), 4-клетевого стана холодной прокатки «1700» ММК им. Ильича (Украина, г. Мариуполь), и статистического анализа погрешностей расчета – расхождений между рассчитанными и измеренными значениями.

Для определения фактических усилий прокатки и мощностей двигателей использовали базы данных АСУ ТП указанных станов. Всего было использовано около 1000 фактических данных об усилиях и мощностях по станам холодной прокатки и около 200 аналогичных данных по станам горячей прокатки.

Результаты статистической оценки точности разработанных методов энергосилового расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Погрешности расчета усилий прокатки и мощностей двигателей главного привода рабочих клеток станов горячей и холодной прокатки, %

Параметр	Значение погрешности	Тип прокатки	
		горячая	холодная
Усилие прокатки	среднее	4,8	5,7
	максимальное	11,1	12,7
Мощность электродвигателей	среднее	5,7	7
	максимальное	12,9	14,9

Из таблицы 1 видно, что усовершенствованные методы обеспечивают точность вычисления энергосиловых параметров процессов горячей и холодной прокатки особо тонких полос с максимальными погрешностями 11–15%, что в 4–20 раз меньше погрешностей расчета с применением известных методов, использующих условие пластичности на всей протяженности очага деформации.

В работе выполнено сопоставление результатов расчета геометрических и силовых параметров очагов деформации при горячей прокатке особо тонких полос в клетях чистовых групп, полученных с применением усовершенствованного метода и метода конечных элементов, реализованного в модуле DEFORM-3D. В процессе сопоставительного анализа установлено, что расхождения в расчетах геометрических параметров очагов деформации двумя методами не превышают 15%, а в расчете усилий прокатки – 10%.

Таким образом, представленные в работе методы обеспечивают достаточную для практики точность и оперативность расчета геометрических и энергосиловых параметров процессов горячей и холодной прокатки, что позволяет использовать их для разработки энергоэффективных технологий производства особо тонких полос.

Глава 6. Исследование влияния основных факторов процессов горячей и холодной прокатки на геометрические и энергосиловые параметры очагов деформации

С помощью разработанных моделей процессов горячей и холодной прокатки на непрерывных широкополосных станах выполнен комплекс исследований влияния параметров процесса прокатки (коэффициента трения, межклетевых натяжений, относительного обжатия, температуры подката) на геометрические и энергосиловые параметры очагов деформации.

Горячая прокатка

Стойкость рабочих валков последних клеток непрерывных широкополосных станов горячей прокатки и, частично, расход энергии на деформацию определяются уровнем контактных напряжений.

В результате исследований установлено, что при горячей прокатке наиболее эффективными средствами воздействия на контактные напряжения и усилия являются относительные обжатия и температура подката. Варьирование и перераспределение обжатий между клетями широкополосных станов горячей прокатки, увеличение температуры подката позволяют снизить напряжения в последних клетях на 20–30%.

Межклетевые натяжения, почти не влияя на силовые параметры (их увеличение даже в 2 раза приводит к снижению p_{cp} всего лишь на 1–2%), оказывают значительное воздействие на расход энергии, позволяя изменить мощность привода рабочей клетки на 6–17%.

Холодная прокатка

Чистота поверхности холоднокатаных полос и расход энергии на процесс пластической деформации определяются положением нейтрального сечения в очаге деформации, которое характеризуется параметром $X_i = \frac{x_{отст}}{x_{пл}}$

($x_{отст}$ – длина зоны отставания; $x_{пл}$ – полная длина пластического участка):

- при X_i приближающемся к $X_{max} = 1$, зона отставания занимает преобладающую часть пластического участка очага деформации, что благоприятно отражается на чистоте поверхности холоднокатаных полос;

- при X_i стремящемся к минимальному значению $X_{min} = 0,55$, протяженность зон отставания и опережения становится примерно одинаковой, что приводит к снижению расхода энергии на прокатку, за счет возврата в зоне опережения валкам части энергии, затраченной на деформацию полосы в зоне отставания.

В результате исследований установлено, что во всех клетях непрерывного стана значения параметра X_i увеличиваются при снижении коэффициента трения и переднего натяжения и при увеличении заднего натяжения. С ростом частного относительного обжатия значения

исследуемого параметра увеличиваются для первой и промежуточных клеток, а в последней клетки – уменьшаются.

Регулировать положение нейтральных сечений в очагах деформации рабочих клеток с помощью коэффициента трения не представляется возможным, поскольку на его величину влияет много разнообразных факторов. Наиболее эффективными средствами воздействия на геометрию очага деформации являются межклетевые натяжения и относительные обжатия. Особенно эффективно регулирование переднего натяжения, обеспечивающее самый широкий диапазон воздействия на положение нейтрального сечения.

Наиболее существенные новые закономерности изменения мощности прокатки, установленные благодаря учету показателя X_i , заключаются в следующем.

– С ростом коэффициента трения мощность не обязательно увеличивается; в зависимости от изменения типа очага деформации она может уменьшаться, оставаться постоянной или скачкообразно изменяться. Такой, на первый взгляд, парадоксальный характер зависимости $N_{пр}$ от μ объясняется тем, что при определенном значении коэффициента трения в очаге деформации может исчезнуть нейтральное сечение.

– При увеличении переднего удельного натяжения полосы мощность прокатки снижается, что не противоречит известным закономерностям, однако, если показатель $X_i < 1$, темп снижения мощности многократно больше, чем получается при расчете по известным методикам.

Глава 7. Применение разработанных методов энергосилового расчета для совершенствования технологии прокатки на листовых станах

Влияние положения нейтрального сечения в очаге деформации на качество холоднокатаных листов

Источниками снижения чистоты поверхности являются продукты износа поверхностных слоев полосы и валков в очаге деформации и продукты разложения смазочно-охлаждающей жидкости. Главные причины появления этих продуктов – контактное трение и высокий уровень нормальных контактных напряжений.

В производстве холоднокатаного проката ЧерМК ОАО «Северсталь» был выполнен комплекс исследований с целью установить влияние технологических параметров прокатки на чистоту поверхности полос. Основой исследований являлась гипотеза о зависимости чистоты поверхности полос от положения нейтральных сечений в очагах деформации рабочих клеток. Это предположение объясняется тем, что в зоне отставания напряжения трения направлены по ходу прокатки, в результате чего продукты износа и разложения активно выносятся валками из очага деформации, который тем самым непрерывно самоочищается; в зоне опережения напряжения трения направлены против хода прокатки, поэтому вынос из очага деформации этих продуктов затруднен, они накапливаются в

очаге, приводя к увеличению количества грязи на полосе (рисунок 6, а). Следовательно, обеспечивая максимально возможный сдвиг нейтрального сечения в сторону выхода полосы из валков, можно добиться лучшей чистоты поверхности полосы (рисунок 6, б).

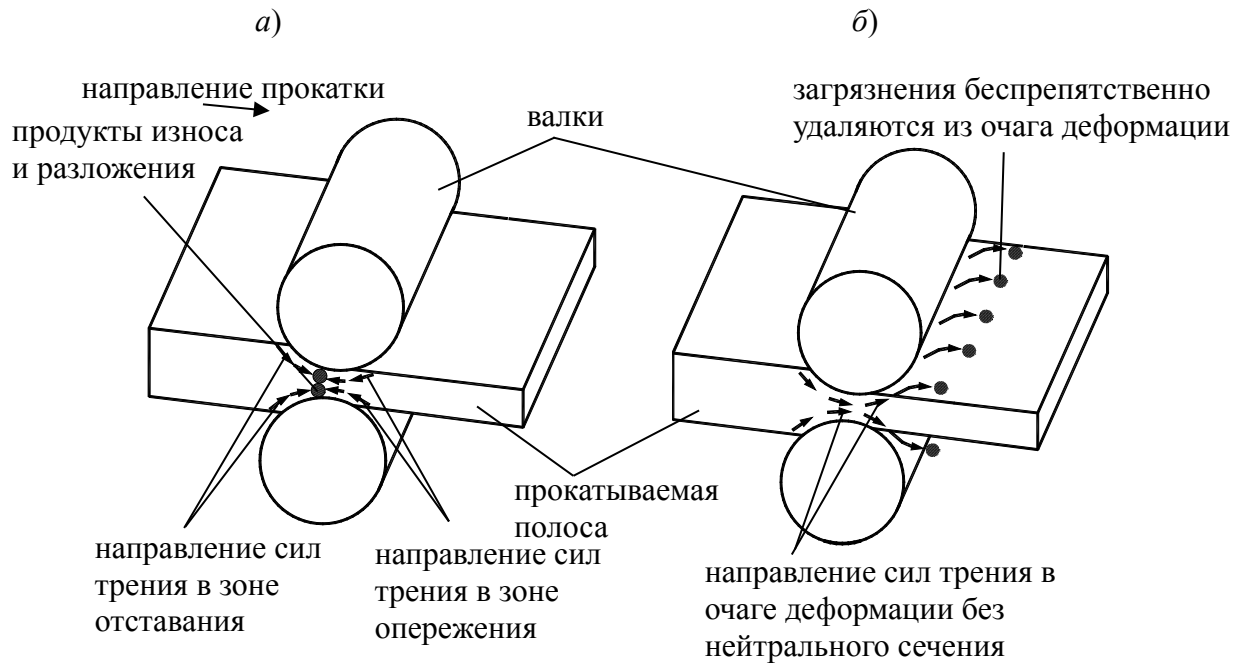


Рисунок 6 – Влияние направлений сил трения на самоочищение очага деформации

Для проверки гипотезы был проведен регрессионный анализ факторов технологического процесса, оказывающих наибольшее влияние на загрязненность холоднокатаных полос, в результате получены регрессионные уравнения в виде зависимостей степени отражения светового потока $(C_i)^2$, характеризующей чистоту поверхности полосы, от факторов технологического процесса.

Регрессионные зависимости от значимых факторов представлены в таблице 2.

Итоговое регрессионное уравнение для определения чистоты поверхности готовой полосы, объединяющее все 4 уравнения таблицы 2, имеет вид:

$$C_4 = 3,4 \frac{k}{k_{\sigma}} + 3,5 \frac{C}{C_{\max}} + 10,8X_2 + 9,1X_3 + 19,8X_4.$$

Таблица 2 – Степень отражения светового потока после каждой клетки $(C_i, \%)$ в функции параметров процесса прокатки на 4-клетевом стане «1700»

Номер	Регрессионное уравнение	Примечание
-------	-------------------------	------------

² Чистоту поверхности полосы в процентах отражения светового потока определяют с помощью рефлектометра. Сущность метода состоит в следующем: скотч наклеивают на поверхность полосы, затем снимают и наклеивают на чистый белый лист бумаги, подносят рефлектометр и направляют на скотч световой поток, так как на скотч перешли загрязнения с поверхности полосы, то от него отражается только часть светового потока, которая улавливается прибором и высвечивается на цифровом табло в процентах (100 % – абсолютно чистая поверхность).

клетки (<i>i</i>)		
1	$C_1 = 31,9 \frac{k}{k_0} + 32,3 \frac{C}{C_{\max}}$	k – число омыления эмульсола; k_0 – базисное значение числа омыления эмульсола, $k_0 = 95$ мг КОН на 1 г;
2	$C_2 = 35,3 \frac{C_1}{C_{\max}} + 34,9 X_2$	C – степень отражения светового потока на подкате;
3	$C_3 = 64,8 \frac{C_2}{C_{\max}} + 19,6 X_3$	C_{\max} – максимальное значение степени отражения светового потока, $C_{\max} = 100\%$;
4	$C_4 = 46,7 \frac{C_3}{C_{\max}} + 19,8 X_4$	X_i – показатель, характеризующий положение нейтрального сечения.

Разработка и внедрение в производство режимов прокатки, обеспечивающих повышение чистоты поверхности холоднокатаных полос

На основе результатов проведенных исследований были разработаны усовершенствованные режимы прокатки, в которых значения X_i максимально приближены к 1.

Эти режимы были успешно апробированы на действующих 4-клетевом и 5-клетевом станах «1700» ЧерМК ОАО «Северсталь». После апробации была проведена работа по внедрению новой технологии в производство.

Первоначально была выполнена корректировка промышленных режимов обжатий и натяжений для всего сортамента непрерывных станов «1700» по критерию $X_i = \max$ с использованием новой модели очага деформации и определение допустимых отклонений от оптимальных параметров прокатки, не приводящих к ухудшению чистоты поверхности полосы.

Прокатку по усовершенствованным режимам производили на 4-клетевом и 5-клетевом станах «1700». Контроль качества металла по чистоте поверхности полос осуществляли по данным отдела технического контроля (ОТК) ЧерМК ОАО «Северсталь».

Оценку эффективности выполняли путем сопоставления данных ОТК о загрязненности металла, прокатанного за одинаковые периоды времени до внедрения и после внедрения усовершенствованных режимов. Результаты этой оценки представлены в таблицах 3 и 4.

Из таблиц 3 и 4 видно, что усовершенствованные режимы прокатки, по сравнению с базовыми, обеспечивают значительное снижение среднего количества механических загрязнений на поверхности холоднокатаных полос и общее сокращение металла, оцененного по 4^{му} баллу загрязненности.

Таблица 3 – Среднее количество механических загрязнений на поверхности холоднокатаного отожженного металла, мг/м²

Показатель	Место контроля	Базовый	Усовершенст–
------------	----------------	---------	--------------

загрязненности		режим	вованный режим
Среднее количество механических загрязнений, мг/м ²	травленный подкат	103	162
	5-клетевой стан	95	81
	4-клетевой стан	349	279
Разность количества загрязнений холоднокатаного и травленого металла, мг/м ²	5-клетевой стан	- 8	- 81
	4-клетевой стан	+ 246	+ 117

Таблица 4 – Данные ОТК о распределении холоднокатаного отожженного металла по баллам загрязненности, %

Баллы загрязненности	Место контроля	Базовый режим	Усовершенствованный режим	Изменение количества металла, %
1 ^й -2 ^й баллы C = 70–100%	5-клетевой стан	32,1	31,4	- 2,2
	4-клетевой стан	16,8	20,7	+ 23
3 ^й балл C = 45–69%	5-клетевой стан	66,7	68,3	+ 2,4
	4-клетевой стан	63,5	76,8	+ 21
4 ^й балл C < 45%	5-клетевой стан	1,2	0,3	- 75
	4-клетевой стан	19,7	2,5	- 87

Экономический эффект от внедрения мероприятий в производство холоднокатаного проката ЧерМК ОАО «Северсталь» составил 2 млн.руб./год.

На способ прокатки, положенный в основу усовершенствованных режимов, получен патент Российской Федерации № 2238809.

Разработка и промышленная апробация на 5-клетевом стане «1700» ЧерМК ОАО «Северсталь» режимов прокатки, обеспечивающих экономию энергии двигателей главного привода рабочих клеток

Из работ В.Н. Выдрин и др. известно, что в зоне опережения очага деформации валки не затрачивают энергию на пластическую деформацию полосы, напротив, полоса возвращает валкам часть энергии, полученной ею при прохождении зоны отставания, то есть расход энергии в рабочей клетки зависит от соотношения длин зон отставания и опережения: чем длиннее последняя, тем меньше мощность прокатки и расход энергии. Эффективное воздействие на это соотношение можно оказать, изменяя частное обжатие, заднее и переднее натяжения полосы.

Учитывая эту особенность процесса холодной прокатки, был разработан и оформлен в виде заявки на патент Российской Федерации метод усовершенствования технологического режима непрерывного стана, сущность которого состоит в том, чтобы, целенаправленно изменяя распределение между клетями частных обжатий и межклетевых натяжений,

уменьшить протяженность зон отстаивания в наиболее энергоемких рабочих клетях и тем самым обеспечивать экономию энергии при прокатке. Критерием усовершенствования является стремление значения X_i к $X_{\min} = 0,55$.

При разработке указанного метода учитывали, что другой критерий усовершенствования – повышение чистоты поверхности полос – требует противоположного воздействия, сдвига нейтрального сечения в сторону выхода полосы из валков.

В связи с этим было решено распределить между рабочими клетями непрерывного стана функции обеспечения чистоты поверхности полос и экономии энергии следующим образом. В последних клетях (для 5-клетевого стана – в клетях №№ 4 и 5), от которых в наибольшей степени зависит чистота поверхности, сдвигать нейтральное сечение к выходу из валков, максимально, с учетом технологических ограничений, приблизив показатель X_i к 1, тем самым повысить чистоту поверхности полос.

В первой и промежуточных клетях, обладающих максимальной энергоемкостью, следует сдвигать нейтральное сечение назад, уменьшая показатель X_i , и тем самым снижая суммарные затраты энергии на стане.

Некоторое ухудшение чистоты поверхности полос на выходе из промежуточных клеток, являющееся следствием такого воздействия, компенсируется и исправляется в последних клетях.

На основе этого метода были разработаны и успешно испытаны усовершенствованные режимы прокатки.

В таблице 5 приведены данные АСУ ТП 5-клетевого стана «1700» о затратах энергии при прокатке полос толщиной 0,48 мм и 0,9 мм по базовому и усовершенствованному режимам, из которых видно, что усовершенствование обеспечивает реальную экономию электроэнергии в диапазоне 4,1–8%.

Таблица 5 – Фактический расход энергии на 5-клетевом стане «1700»

Профилеразмер	Тип режима	$A_{уд}$, кВт·ч/т	$\Delta A_{уд}$, %
2,1→0,48	Базовый	59,5	4,1
	Усовершенствованный	57,06	
3,0→0,9	Базовый	58,3	8,00
	Усовершенствованный	53,63	

Примечание. $A_{уд}$ – удельный расход энергии, кВт·ч/т; $\Delta A_{уд}$ – изменение удельного расхода энергии, %.

Планируемый экономический эффект от внедрения способа в производство холоднокатаного проката составляет более 100 млн.руб./год.

Моделирование и усовершенствование режимов прокатки на 4-клетевом стане «1700» «ММК им. Ильича»

Прокатка металла на 4-клетевом стане «1700» ОАО «ММК им. Ильича» (Украина, г. Мариуполь) по фактическим режимам, характеризующимся высоким уровнем межклетевых натяжений и частных относительных обжатий в последней клетке, сопровождалась повышенной обрывностью полос, значительной отсортировкой металла по чистоте поверхности и высокими энергозатратами на процесс пластической деформации.

Для устранения этих негативных явлений были проведены следующие технологические мероприятия:

- относительное обжатие в 1^й клетке установлено, исходя из условия загрузки электродвигателей главного привода по мощности в диапазоне 80–95% от максимального паспортного значения мощности этих двигателей;
- относительное обжатие в 4^й клетке установлено в диапазоне 5–15%;
- оставшаяся часть суммарного обжатия распределена поровну между 2^й и 3^й клетками;
- удельные натяжения полосы на выходе из 1^й клетки установлены в диапазоне 18–20% от предела текучести в этой клетке;
- удельные натяжения полосы на выходе из 2^й и 3^й клеток установлены в диапазоне 21–22% от предела текучести в этих клетках.

На основе изложенных рекомендаций были рассчитаны, а затем испытаны и внедрены в производство усовершенствованные режимы холодной прокатки.

Внедрение эффективной технологии холодной прокатки обеспечило снижение обрывности полос в 4 раза; уменьшение загрязненности поверхности на 15–19%; уменьшение расхода электроэнергии на процесс прокатки на 12–17%.

На способ прокатки, обеспечивающий повышение чистоты поверхности холоднокатаных полос и экономию энергии при прокатке на 4-клетевом стане, получены патент Российской Федерации № 2325241 и патент Украины № 20060869.

Разработка и промышленная апробация режимов прокатки, исключаящих возникновение резонансных колебаний в рабочих клетях

Прокатка полос толщиной 0,25–0,5 мм со скоростью выше 15 м/с сопровождается повышением колебаний основных технологических параметров: межклетевых натяжений, усилий прокатки до 25%. Такая нестабильность технологического процесса приводит к перемещению рабочих валков с подушками в пределах зазоров в окнах станин и возникновению вибраций. Для их исключения необходимо, чтобы подушка валка была постоянно прижата к передним или задним вертикальным плоскостям окна станин, то есть направление горизонтальных сил, действующих на подушки рабочих валков, должно быть неизменным (рисунок 7).

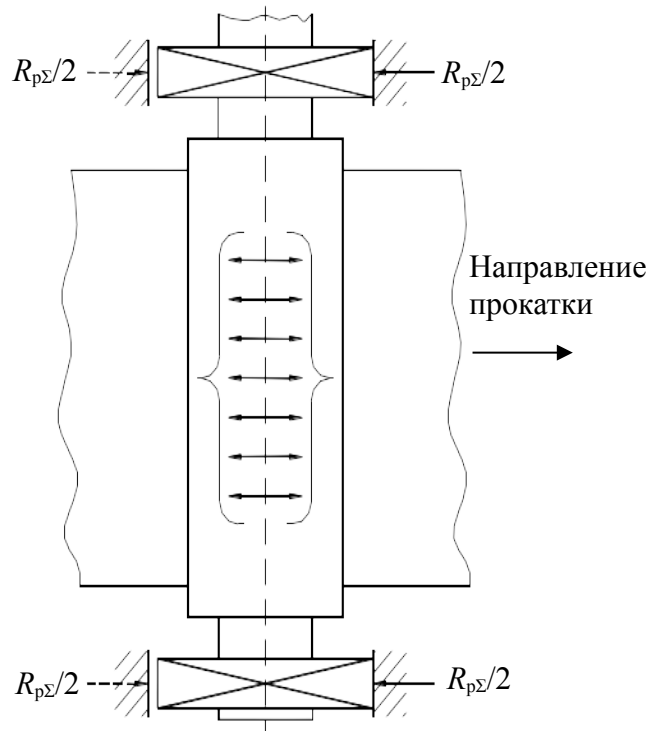


Рисунок 7 – Узел рабочих валков с подушками

Условие исключения вибраций, предложенное в данной работе на основе анализа устойчивости положения рабочих валков с подушками в пределах зазоров в окнах станин и учитывающее колебания основных технологических параметров, имеет вид:

$$R_{p\Sigma\min} = P \cdot (1 - \delta) \cdot (1 - k_p) \cdot \operatorname{tg}(\theta + \gamma) - \frac{T_{i-1}(1 + k_T) - T_i(1 - k_T)}{2} - \delta F_{гор} > 0,$$

где $R_{p\Sigma\min}$ – минимально возможная суммарная сила, действующая на подушки рабочего валка; δ – погрешность расчета усилия прокатки; T_{i-1} , T_i – заднее и переднее полные натяжения полосы; k_p , k_T – коэффициенты неустойчивости усилия прокатки и межклетевых натяжений; $\delta F_{гор}$ – максимальное приращение горизонтальной силы $F_{гор}$, действующей на валки в очаге деформации.

Для его использования в инженерной практике получено выражение горизонтальной силы, действующей на полосу в очаге деформации, путем суммирования горизонтальных проекций нормальных и касательных сил на каждом участке очага деформации, рассчитанных на основе упруго–пластической модели напряженно-деформированного состояния полосы в очаге деформации.

С помощью усовершенствованной модели процесса холодной прокатки и методики расчета горизонтальных сил в очаге деформации была разработана методология устранения резонансных вибраций, заключающаяся в том, чтобы в рабочей клетки, наиболее склонной к вибрациям, были проведены следующие мероприятия:

- увеличено частное относительное обжатие до предела, установленного с учетом ограничений по усилию, мощности прокатки и критериям, связанным с качеством продукции;
- уменьшено заднее удельное натяжение до нижней границы нормативного диапазона;
- увеличено переднее удельное натяжение до верхней границы нормативного диапазона;
- максимально ограничены колебания натяжений и усилий прокатки, с учетом возможностей систем автоматического регулирования, которыми оснащен стан;
- увеличено ускорение разгона стана с учетом возможностей и особенностей линий главного привода.

Согласно этой методике были разработаны и внедрены в производство усовершенствованные режимы прокатки в 4^й клетки 5-клетевого стана «1700», наиболее склонной к вибрациям.

Это мероприятие позволило увеличить скорость прокатки полос проблемного сортамента с 10–12 м/с до 17–20 м/с и за счет этого увеличить часовую производительность стана на 23%. Экономический эффект составил более 8 млн.руб./год.

На способ прокатки, исключая возникновение резонансных колебаний в рабочих клетях стана холодной прокатки, получен патент Российской Федерации № 2259896.

Совершенствование настройки скоростного режима непрерывных станов холодной прокатки

Настройка скоростного режима – одна из основных функций АСУ ТП непрерывного стана. Ее задача – по заданной скорости полосы на выходе из последней клетки, исходя из режима обжатий и закона постоянства секундных объемов, рассчитать скорости полосы в каждой клетки, а затем – с учетом опережений – определить и задать скорости вращения валков.

Опыт настройки непрерывных станов холодной прокатки показал, что алгоритмы АСУ ТП, как правило, не обеспечивают точного определения скоростей вращения валков. Погрешности их расчета в отдельных клетях приводят к нарушениям закона постоянства секундных объемов и – как следствие – к нестабильности межклетевых натяжений полосы. Колебания натяжений приводят к изменениям усилий прокатки и упругих деформаций валков, в результате увеличивается продольная и поперечная разнотолщинность, а также нарушается плоскостность полос.

Для устранения этих погрешностей операторы корректируют скорости вручную, в процессе указанных корректировок часть длины полос прокатывают с увеличенными отклонениями от заданных размеров и плоскостности.

Как отмечалось в главе 3, скорость вращения валков может быть определена через скорость прокатки в i -й клетки с учетом коэффициента

опережения, следовательно, точность определения скорости валков зависит от точности расчета этого коэффициента.

В главе 3 представлены новые формулы для расчета коэффициента опережения, которые позволили достоверно рассчитать скоростной режим прокатки полосы из стали марки 08пс шириной $b = 1242$ мм с исходной толщины $h_0 = 2,00$ мм на конечную толщину $h_5 = 0,51$ мм.

Для определения эффективности усовершенствованного (опытного) скоростного режима были проведены промышленные эксперименты.

Анализ экспериментальных данных показал, что при опытном скоростном режиме диапазоны колебаний натяжений в межклетевых промежутках уменьшились, по сравнению с рабочим режимом, на 5,7–60,9% (в среднем на 35,8%). Несмотря на то, что при опытном режиме колебания толщины подката составляли 0,075 мм, а при рабочем режиме 0,065 мм, колебания толщины полосы при прокатке по опытному скоростному режиму уменьшились, по сравнению с рабочим, в клетях №№ 1, 2, 3 на 2,3–14,4%, а в клетях №№ 4 и 5 – на 45,4 и 56% (в среднем на 35,3%).

В абсолютных значениях колебания толщины готовой полосы при рабочем режиме составили 0,022–0,056 мм, а при опытном режиме 0,015–0,03 мм, то есть в 1,5–1,9 раза меньше.

Разработка и промышленные испытания эффективных режимов горячей прокатки особо тонких полос в чистовой группе клеток полунепрерывного комбинированного стана «2800/1700» ЧерМК ОАО «Северсталь»

При освоении производства особо тонкого горячекатаного проката в чистовой группе клеток полунепрерывного комбинированного стана «2800/1700» ЧерМК ОАО «Северсталь» технологи столкнулись с рядом проблем, связанных с ростом затрат энергии на процесс прокатки, ухудшением качества поверхности готового проката и снижением стойкости рабочих валков последних клетей.

Устранение этих негативных явлений осуществлялось учеными Череповецкого государственного университета путем усовершенствования режимов обжатий, межклетевых натяжений, а также температурного режима прокатываемых полос.

Усовершенствование режима обжатий заключается в уменьшении в 4^й, 5^й и 6^й клетях частных обжатий на 10–30% относительно значений, принятых по существующей технологии, что приводит к снижению в них максимальных контактных напряжений на 20–60%, то есть до менее опасного уровня 800–1200 МПа. Чтобы сохранить при этом толщину подката и суммарное обжатие, увеличили частные обжатия в трех первых клетях на 2–10%. Это не представляет опасности для валков, так как контактные напряжения в первых трех клетях в два-три раза меньше, чем в трех последних.

Температуру подката увеличили до максимально возможного значения 1080 °С, не ухудшающего микроструктуру и механические свойства готового

проката толщиной до 2,0 мм.

Межклетевые удельные натяжения увеличили до 10–15% от величины сопротивления деформации, это мероприятие за счет повышения устойчивости движения полосы, способствует лучшему ее удержанию на оси прокатки и оказывает дополнительное влияние на уменьшение разноширинности полос.

На основе изложенных рекомендаций, с помощью метода расчета технологических и энергосиловых параметров процесса горячей прокатки, представленного в главе 4, были разработаны, а затем испытаны усовершенствованные режимы прокатки. В результате испытаний установлено, что усовершенствованная технология горячей прокатки, по сравнению с базовой, обеспечила снижение уровня нормальных контактных напряжений в среднем на 16%; суммарной мощности двигателей главного привода стана на 3–8%; продольной разнотолщинности и разноширинности полос в 1,7–2 раза и колебаний усилий прокатки почти в 2 раза.

Планируемый экономический эффект от внедрения усовершенствованных режимов только на одном широкополосном стане составил более 200 млн.руб./год. По заявке на патент Российской Федерации «Способ горячей прокатки тонких полос в непрерывной чистовой группе клетей широкополосного стана» получено положительное решение № 2009100429/02(000561) от 27.02.2009 г.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработан ряд новых научных положений и практически значимых решений, которые в совокупности представляют собой теоретическое обоснование и решение проблемы разработки эффективной технологии прокатки особо тонких высокоточных широких горячекатаных и холоднокатаных полос на непрерывных станах, имеющей важное значение для российского листопрокатного производства. Разработанные технологические решения защищены патентами на изобретения РФ и Украины.

2. Выполнен литературно-аналитический обзор научных работ в области теории и технологии тонколистовой прокатки, в результате установлено, что технический прогресс листопрокатного производства, тенденции изменения сортамента, ужесточение требований к качеству, к точности размеров и плоскостности полос, потребовали корректировки ряда положений теории тонколистовой прокатки в части повышения точности расчета технологических и энергосиловых параметров широкополосных станов при производстве особо тонких полос.

3. Предложена упругопластическая модель напряженно-деформированного состояния полосы в очаге деформации при прокатке тонких полос на непрерывных широкополосных станах. На основе этой модели разработаны усовершенствованные методы расчета технологических и энергосиловых параметров процессов горячей и холодной прокатки.

4. Выполнена промышленная апробация усовершенствованных методов с целью оценки их точности и достоверности. Для этого созданы базы данных, содержащие информацию о более чем 260 фактических режимах прокатки на непрерывных станах. С использованием статистических методов доказано, что усовершенствованные методы обеспечивают точность вычисления усилий прокатки со средней погрешностью 4,8–5,7%, мощностей электродвигателей главного привода рабочих клетей – 5,7–7%, что в 4–20 раз меньше погрешностей расчета с применением известных методов, использующих условие пластичности на всей протяженности очага деформации.

5. С использованием разработанных упругопластических моделей напряженного состояния полосы и основанных на них методов расчета энергосиловых параметров установлены закономерности, уточняющие и корректирующие ряд представлений теории листовой прокатки о влиянии основных технологических параметров на усилие и мощность прокатки, на чистоту поверхности холоднокатаных полос.

6. Получены математические зависимости для соотношений между силами, действующими на узел рабочих валков, исключая резонансные вибрации в рабочей клетке. Разработанная методика позволяет моделировать режимы прокатки, полностью исключая возможность возникновения вибраций.

Внедрение усовершенствованных режимов в производство холоднокатаного проката ЧерМК ОАО «Северсталь» позволило повысить скорость прокатки на 5-клетевом стане «1700» с 10–13 м/с до 17–20 м/с, увеличить производительность стана на 23 %.

7. С использованием усовершенствованной математической модели процесса холодной прокатки разработана, испытана и внедрена эффективная технология, обеспечивающая снижение обрывности холоднокатаных полос в 4 раза, поверхностной загрязненности на 15–20%, расхода энергии на процесс пластической деформации на 4–17%.

8. Разработаны и реализованы усовершенствованные режимы настройки скоростного режима непрерывных станов холодной прокатки, в которых скорости вращения валков рассчитаны с использованием предложенных зависимостей коэффициентов опережения, за счет стабилизации скоростного режима обеспечено, уменьшение колебаний толщины полосы в 1,5–2 раза.

9. На основе усовершенствованных теоретических положений и математической модели процесса горячей прокатки разработаны и успешно испытаны эффективные режимы, обеспечивающие снижение уровня контактных напряжений на 16 %, расхода энергии при прокатке на 3–8% и повышение точности размеров особо тонкого горячекатаного проката в 1,7–2 раза.

10. Суммарный экономический эффект от внедрения технических решений (за девять лет использования разработок на ЧерМК ОАО «Северсталь») составил более 90 млн.руб. Планируемый экономический эффект от внедрения испытанных разработок составляет 300 млн.руб./год.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах

Публикации в научных журналах, рекомендованных ВАК

1. Кожевникова, И.А. К вопросу о контактном трении при прокатке / И.А. Кожевникова // Вестник ЧГУ. – 2011. – № 4. Т 3. – С. 17–21.
2. Кожевникова, И.А. Проблемные вопросы развития методов энергосилового расчета процессов тонколистовой прокатки (в порядке обсуждения) / И.А. Кожевникова, Э.А. Гарбер // Производство проката. – 2010. – № 12. – С.23–34.
3. Гарбер, Э.А. Энергосиловые параметры процесса холодной прокатки стальных полос толщиной менее 0,5 мм / Э.А. Гарбер, И.А. Шадрунова³ // Производство проката. – 2002. – № 3. – С. 13–18.
4. Гарбер, Э.А. Эффективность уменьшения диаметра рабочих валков и переноса главного привода на опорные валки станов холодной прокатки / Э.А. Гарбер, И.А. Шадрунова³ // Производство проката. – 2003. – № 4. – С. 9–14.
5. Гарбер, Э.А. Сопоставительный анализ напряженно-деформированного состояния металла и энергосиловых параметров процессов горячей и холодной прокатки тонких широких полос / Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова // Производство проката. – 2008. – № 1. – С. 10–15.
6. Гарбер, Э.А. Анализ очага деформации и уточненный расчет усилий холодной прокатки полос толщиной менее 0,5 мм на непрерывных станах / Э.А. Гарбер, И.А. Шадрунова³, А.И. Трайно, В.С. Юсупов // Металлы. – 2002. – № 4. – С. 32–38.
7. Гарбер, Э.А. Улучшение качества поверхности холоднокатаных полос путем воздействия на положения нейтрального сечения в очаге деформации / Э.А. Гарбер, И.А. Шадрунова³, В.В. Кузнецов, Д.И. Никитин, Е.В. Дилигенский // Производство проката. – 2003. – № 2. – С. 16–19.
8. Гарбер, Э.А. Расчет усилий горячей прокатки тонких полос с учетом напряженно-деформированного состояния в зоне прилипания очага деформации / Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова, П.А. Тарасов // Производство проката. – 2007. – № 4. – С. 7–15.
9. Гарбер, Э.А. Уточненный расчет мощности двигателей главного привода широкополосных станов горячей прокатки / Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова, П.А. Тарасов // Производство проката. – 2007. – № 10. – С. 5–12.
10. Гарбер, Э.А. Повышение качества поверхности листовой стали на основе новых решений в теории холодной прокатки / Э.А. Гарбер, С.И. Павлов, И.А. Кожевникова, М.А. Тимофеева, В.В. Кузнецов // Вестник ЧГУ. – 2010. – № 2. – С. 76–86.
11. Гарбер, Э.А. Влияние химического состава и упругих свойств полосы и валков на энергосиловые параметры широкополосных станов горячей

³ С 23 июля 2004 г. Кожевникова И.А.

прокатки / Э.А. Гарбер, И.Д. Поспелов, И.А. Кожевникова // Производство проката. – 2011. – № 8. – С. 2–7.

12. Гарбер, Э.А. Энергосилового расчёт широкополосных станов горячей прокатки с учётом влияния температуры на упругие свойства горячекатаных тонких полос / Э.А. Гарбер, И.Д. Поспелов, И.А. Кожевникова // – Вестник ЧГУ. – 2011. – № 3. Т 1. – С. 9–13.

13. Гарбер, Э.А. Расчет мощности процесса холодной прокатки с учетом работы переменных сил трения по длине очага деформации / Э.А. Гарбер, Д.И. Никитин, И.А. Шадрунова³, А.И. Трайно // Металлы. – 2003. – № 4. – С. 60–67.

14. Гарбер, Э.А. Моделирование напряженного состояния полосы при холодной прокатке в очаге деформации с двумя нейтральными сечениями / Э.А. Гарбер, Д.Л. Шалаевский, И.А. Кожевникова, А.И. Трайно // Металлы. – 2007. – № 4. – С. 41–53.

15. Гарбер, Э.А. Совершенствование силового расчета процесса холодной прокатки на основе нового метода учета упругого сплющивания в очаге деформации / Э.А. Гарбер, Д.Л. Шалаевский, И.А. Кожевникова // Производство проката. – 2008. – № 5. – С. 13–18.

16. Гарбер, Э.А. Расчет мощности процесса холодной прокатки с учетом количества нейтральных сечений в очаге деформации. / Э.А. Гарбер, Д.Л. Шалаевский, И.А. Кожевникова // Производство проката. – 2008. – № 8. – С. 8–17.

17. Гарбер, Э.А. Исследование, моделирование и устранение вибраций в рабочих клетях станов холодной прокатки / Э.А. Гарбер, А.В. Кожевников, В.П. Наумченко, И.А. Шадрунова³, С.И. Павлов // Производство проката. – 2004. – № 6. – С. 34–41.

18. Гарбер, Э.А. Моделирование контактных напряжений и усилий горячей прокатки тонких широких полос с учетом зоны прилипания и упругих участков очага деформации / Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова, П.А. Тарасов, А.А. Завражнов, А.И. Трайно // Металлы. – 2007. – № 2. – С. 26–34.

19. Гарбер, Э.А. Эффективные режимы горячей прокатки тонких полос на широкополосных станах / Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова, П.А. Тарасов // Производство проката. – 2009. – № 1. – С. 10–16.

Монография

20. Кожевникова, И.А. Развитие теории тонколистовой прокатки для повышения эффективности работы широкополосных станов: Монография / И.А. Кожевникова, Э.А. Гарбер. – Череповец: ГОУ ВПО ЧГУ, 2010. – 275 с.

Патенты на изобретения

21. Патент № 2238809 Российская Федерация, МПК⁷ В21В 1/28. Способ непрерывной прокатки тонких полос на многоклетевом стане / Гарбер Э.А., Шадрунова³ И.А., Кузнецов В.В. и др. – № 2003100674/02; заявлено 08.01.2003; опубл. 27.10.2004, Бюл. № 30.

22. Патент № 2259896 Российская Федерация, МПК⁷ В21В 1/28. Способ непрерывной холодной прокатки полосы с натяжением / Гарбер Э.А., Кожевников А.В., Наумченко В.П., Шадрунова³ И.А. и др. – № 2004103226/02; заявлено 04.02.2004; опубл. 10.09.2005, Бюл. № 25.

23. Патент № 2325241 Российская Федерация, МПК⁷ В21В 1/28. Способ непрерывной холодной прокатки тонких полос на многоклетевом стане / Степаненко В.В., Павлов С.И., Веселков Г.В., Антонов В.Ю., Кузнецов В.В., Гарбер Э.А., Дилигенский Е.В., Кожевникова И.А. – № 2006120719/02; заявлено 20.12.2006; опубл. 27.05.2008, Бюл. № 15.

24. Патент. Украина, МПК (2006) В21В 1/22. Способ холодной прокатки тонких полос на многоклетевом стане / Бойко В.С., Шебаниц Э.Н., Климанчук В.В., Гарбер Э.А., Будников В.И., Норка С.П., Побегайло О.А., Медведев Н.П., Кожевникова И.А., Дилигенский Е.В. – № 200608699; заявлено 03.08.2006.

Публикации в зарубежных журналах и монографиях

25. Garber, E.A. Analysis of a Deformation Zone and the Refined Calculation of the Forces for Cold Rolling of Strips Thinner than 0.5 mm in a Continuous Mill / E.A. Garber, I.A. Shadrunkova³, A.I. Traino, V.S. Yusupov // Russian Metallurgy. – Vol. 2002. – No. 4. – P. 300–315.

26. Garber, E.A. Calculation of the Cold-Rolling Power with Allowance for the Variable Work of Friction along a Deformation Zone / E.A. Garber, D.I. Nikitin, I.A. Shadrunkova³, A.I. Traino // Russian Metallurgy. – Vol. 2003. – No. 4 – P. 340–346.

27. Garber, E.A. Simulation of the State of Stress in a Deformation Zone with Two Neutral Section during Cold Rolling / E.A. Garber, D.L. Shalaevskii, I.A. Kozhevnikova, A.I. Traino // Russian Metallurgy. – Vol. 2007. – No. 4. – P. 293–303.

28. Garber, E.A.. Procedure and Algorithms for the Energy-Force Calculation of Cold Rolling for the Number of Neutral Section in the Deformation Zone / E.A. Garber, D.L. Shalaevskii, I.A. Kozhevnikova, A.I. Traino // Russian Metallurgy. – Vol. 2008. – No. 4. – P. 316–326.

29. Garber, E. Improvement of Schedules for Hot Rolling of Thin Wide / E. Garber, A. Traino, I. Kozhevnikova // Flat-rolled steel processes: advanced technologies. Editor V.B.Ginzburg. – USA: CRC Press Taylor & Francis Group, 2009. – P. 115–125.

30. Garber, E. Novel Mathematical Models for Cold Rolling Process/ E. Garber, A. Traino, I. Kozhevnikova // Flat-rolled steel processes: advanced technologies. Editor V.B.Ginzburg. – USA: CRC Press Taylor & Francis Group, 2009. – P. 179–189.

Публикации в трудах научно-технических конференций

31. Кожевникова, И.А. Сопоставление результатов энергосилового расчета процесса горячей прокатки тонких полос аналитическим методом и методом конечных элементов / И.А. Кожевникова // Сборник докладов

международной научно-технической конференции «Инновационные технологии обработки металлов давлением», посвященной 100-летию со дня рождения проф. д.т.н., академика АН КазССР, Героя Социалистического Труда П.И. Полухина. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. – С. 362–369.

32. Кожевникова, И.А. Развитие теории тонколистовой прокатки / И.А. Кожевникова, Э.А. Гарбер // Вторая международная научно-техническая конференция «Павловские чтения». – Москва. ИМЕТ РАН. 26–27 октября 2010 г.

33. Гарбер, Э.А. Совершенствование методов математического моделирования процессов горячей и холодной прокатки для повышения качества тонких листов и экономии производственных затрат / Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова // Проблемы фундаментальной механики в теории обработки давлением. Тезисы докладов расширенного научного семинара. – Москва: МАМИ, 2008. – С. 5–6.

34. Гарбер, Э.А. Моделирование процесса горячей прокатки широких полос с учетом зоны прилипания в очаге деформации / Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова, П.А. Тарасов // Труды седьмого Конгресса прокатчиков (Москва, 2007 г.). – Москва: ОАО «Черметинформация», 2008. – С. 484–492.

35. Garber, E.A. Novel Methods for Cold Rolling Process Modeling, Providing Cold Roller Strip Quality Improvement, Energy Savings and Continuous Mill Rolling Speed Increase / E.A. Garber, I.A. Kozhevnikova, A.I. Traino, V.V. Kuznetsov, S.I. Pavlov // ICIEA 2007 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. – Harbin, China, 2007. – P.321–322.

36. Гарбер, Э.А. Моделирование энергосиловых параметров процесса холодной прокатки полос из *IF* сталей для экономии энергозатрат / Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова, В.А. Иводитов, А.И. Трайно, А.В. Кожевников // Прогрессивные процессы и оборудование металлургического производства. Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию ОАО «Северсталь». – Череповец: ЧГУ, 2006. – С. 142–144.

37. Гарбер, Э.А. New methods of modeling and optimization of wide strip cold rolling schedules / Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова, В.В. Кузнецов, А.И. Трайно, В.С. Юсупов // Steell Rolling 2006 9th International & 4th European Conferences. Paris June 19–21, 2006.

38. Garber, E.A. Improvement of Rolling Schedules at Continuous Cold Rolling Mills. / E.A. Garber, I.A. Shadrunkova³, V.V. Kuznetsov, A.I. Traino, V.S. Yusupov // AISTech-2004. Iron & Steel Technology conference Proceedings. Volume II (September 15–17, 2004, Nashville, Tennessee). – Association for Iron & Steel Technology, 2004. – P. 3–9.

39. Гарбер, Э.А. Пути уменьшения затрат электроэнергии при холодной прокатке на непрерывных станах / Э.А. Гарбер, И.А. Шадрунова³, Д.И. Никитин, В.Л. Явкин // Труды пятого конгресса прокатчиков (Череповец, 21–24 октября, 2003 г.). – Москва: ОАО «Черметинформация», 2004. – С. 90–94.

40. Гарбер, Э.А. Computer Modeling of the Deformation Cell in Cold Rolling of IF Steels as an Elastic and Plastic Medium with the View of Improving Automobile Sheets Quality / Э.А. Гарбер, И.А. Шадрунова³, А.И. Трайно, В.С.

Юсупов // IF STEELS 2003. International Forum for the Properties and Application of IF Steels. – Arcadia Ichigaya, Tokyo, Japan, 2003. – P. 431–435.

41. Гарбер, Э.А. Зависимость мощности процесса холодной прокатки от параметров очага деформации / Э.А. Гарбер, И.А. Шадрунова³, Д.И. Никитин // Прогрессивные процессы и оборудование металлургического производства. Материалы IV международной научно-технической конференции, посвященной 120-летию академика И.П.Бардина. – Череповец, 2003. – С. 201–207.

42. Гарбер, Э.А. Распределение контактных напряжений по длине очага деформации при холодной прокатке / Э.А. Гарбер, И.А. Шадрунова³ // Теория и практика производства листового проката. Материалы международной научно-технической конференции. – Липецк: ЛГТУ, 2003 г. – С. 137–140.

43. Гарбер, Э.А. Моделирование энергосиловых параметров процесса холодной прокатки при значительной протяженности упругих зон по длине очага деформации / Э.А. Гарбер, И.А. Шадрунова³ // ИНФОТЕХ-2001. Материалы международной научно-технической конференции. – Череповец: ЧГУ, 2002. – С. 81–87.