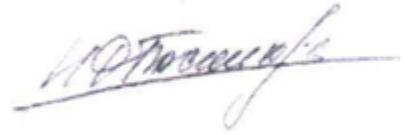


На правах рукописи



ПОСПЕЛОВ Иван Дмитриевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА
ГОРЯЧЕКАТАНЫХ ШИРОКИХ ПОЛОС С ЦЕЛЮ
УМЕНЬШЕНИЯ ИХ ПРОДОЛЬНОЙ РАЗНОТОЛЩИННОСТИ**

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Череповец – 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет»

- Научный руководитель – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ
Гарбер Эдуард Александрович
- Официальные оппоненты – **Шаталов Роман Львович**
доктор технических наук, профессор кафедры технологии и оборудования металлургических процессов ФГБОУ ВПО «Московский государственный машиностроительный университет»
- **Русаков Андрей Дмитриевич**
кандидат технических наук, ст.н.с. лаборатории пластической деформации специальных сплавов ФГБУН «Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук»
- Ведущая организация – Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина»

Защита диссертации состоится «28» мая 2014 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.060.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук по адресу: 117334, г. Москва, Ленинский пр., 49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.imet.ac.ru> ИМЕТ РАН.

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью) просьба отправлять по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский пр., 49, Диссертационный совет Д 002.060.02. Копии отзывов в электронном виде направлять по e-mail: kalash.ds@mail.ru.

Автореферат разослан «___»_____ 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук



Калашников И.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В листопрокатном производстве предприятий чёрной металлургии России за последние десятилетия произошли изменения, вызванные развитием автомобильной промышленности и ряда отраслей машиностроения.

Наиболее важные из этих изменений:

- освоение технологии горячей и холодной прокатки более тонких полос, чем это было предусмотрено паспортными характеристиками действующих станов;

- ужесточение требований к точности размеров и плоскостности листов, установленное их потребителями.

Под воздействием этих изменений потребовалось усовершенствовать методы энергосилового и технологического расчётов листовых станов. Решением этой задачи, начиная с 2000 года, занимается череповецкая научная школа прокатчиков, в том числе с 2010 по 2012 год – в рамках Федеральной целевой программы (ФЦП) «Научные и научно-педагогические кадры России (государственный контракт № 16.740.11.0032 от 01.09.2010 г.)».

Данная диссертационная работа является частью исследований, выполнявшихся по указанному государственному контракту. Она посвящена совершенствованию методов энергосилового и технологического расчётов широкополосных станов горячей прокатки.

В работах череповецкой научной школы прокатчиков, выполненных в предшествующий период, было установлено, что при горячей прокатке наиболее тонких полос протяжённость упругих участков может достигать 17-21 % от общей длины очага деформации, в связи с чем была разработана усовершенствованная методика энергосилового расчёта широкополосных станов горячей прокатки (ШПСГП).

В этой методике напряжения, действующие на полосу в очаге деформации, и удельные работы прокатки вычисляются отдельно на каждом участке очага деформации, при этом на упругих участках, вместо уравнения пластичности, использовано уравнение упругости. Применение усовершенствованной методики снизило погрешности энергосиловых расчётов ШПСГП. Однако для решения новой задачи – уменьшения колебаний толщины по всей площади горячекатаных полос до уровня 2,0-2,2 % от номинальной толщины – достигнутой ранее точности расчёта энергосиловых параметров оказалось недостаточно.

Выполненный нами анализ усовершенствованной методики энергосилового расчёта ШПСГП выявил следующие не учтённые ранее факторы, приводящие к погрешности при вычислении сил прокатки и мощности двигателей главного привода рабочих клетей:

1) Отсутствие учёта влияния температуры горячекатаных полос и прокатных валков на их упругие свойства. В частности, вычисление сил

прокатки, мощности привода и структурных параметров очага деформации производили при постоянном значении модуля упругости полос (E_{II}), без учёта того факта, что при температурах горячей прокатки величина E_{II} существенно зависит от температуры полосы в очаге деформации. Не в полной мере учитывались и зависимости модуля упругости (E_B) и коэффициента Пуассона (ν_B) рабочих валков от их материала, хотя в рабочих клетях ШПСГП применяют валки разных марок чугуна и стали, у которых диапазон величин ν_B составляет 0,27-0,35, а модулей упругости $(1,68-2,15) \cdot 10^5$ МПа.

2) Не в полной мере учитывалось влияние фактического содержания химических элементов в сталях, из которых изготовлены горячекатаные полосы, на их сопротивление пластической деформации. Особенно это актуально при расчёте процесса прокатки полос из новых марок стали, появившихся в последние годы, информация о механических свойствах которых отсутствовала в справочной литературе.

Помимо энергосилового расчёта, требовали усовершенствования методы технологических расчётов ШПСГП. В частности, в предшествовавших работах учёных череповецкой научной школы показано, что один из методов уменьшения разноширинности и разнотолщинности горячекатаных полос – перераспределение обжатий между клетями чистовой группы стана. Однако этот метод был применён эмпирически, без оптимизационных моделей, что снижало возможность его оперативного использования на других станах или при смене сортамента.

Из вышеизложенного следует, что устранение указанных недостатков энергосилового и технологического расчётов ШПСГП – актуальная научно-техническая задача.

Цель работы – повышение точности энергосилового и технологического расчётов ШПСГП, чтобы обеспечить при минимальных затратах энергии уменьшение колебаний толщины горячекатаных стальных полос до уровня, соответствующего требованиям мировых стандартов: 2,0-2,2 % от номинальной толщины.

Основными задачами работы являлись:

- совершенствование методики энергосилового расчета процесса горячей прокатки на широкополосном стане, основанной на упругопластической модели очага деформации, путём внесения в неё зависимостей модуля упругости полосы от температуры, а также упругих характеристик валков от химического состава их материалов;
- исследование и моделирование процесса формирования продольной разнотолщинности горячекатаных полос в зависимости от параметров технологических режимов;
- разработка и реализация методики компьютерной оптимизации режимов горячей прокатки в чистовой группе ШПСГП по критерию «минимум продольной разнотолщинности»;

- промышленные испытания разработанных методик для совершенствования технологии производства и повышения точности размеров горячекатаных широких полос.

Все исследования и разработки по теме диссертации проводились по трем основным направлениям.

1. Теоретические исследования:

- совершенствование методики энергосилового расчета процесса горячей прокатки на широкополосном стане на основе упругопластической модели очага деформации;
- исследование влияния режима обжатий и межклетевых натяжений в чистовой группе ШПСГП на точность формирования размеров горячекатаных полос.

2. Работы по оптимизации технологических процессов и оборудования:

- разработка и оптимизация технологических режимов горячей прокатки в непрерывной чистовой группе клеток, обеспечивающих снижение разнотолщинности до уровня $\pm 2,2$ % от номинального (заданного) значения толщины полосы.

3. Экспериментальные исследования:

- проведение промышленных исследований процессов прокатки полос в чистовой группе действующего непрерывного ШПСГП с целью получения экспериментальных данных о фактических режимах прокатки и колебаниях толщины полос;
- исследование и оценка основных технологических факторов, которые оказывают значимое влияние на формирование разнотолщинности полос;
- проверка на действующем ШПСГП «2000» эффективности оптимизации технологических режимов прокатки полос по критерию «минимум продольной разнотолщинности».

Научная новизна результатов работы заключается в следующем.

1. Методика расчёта энергосиловых параметров процесса горячей прокатки тонких стальных полос, основанная на упругопластической модели очага деформации, дополнена учётом влияния температуры полосы на модуль упругости её материала и на длину упругих участков очага деформации.

2. Установлено, что при горячей прокатке наиболее тонких полос в последних клетях широкополосного стана длина упругих участков очага деформации, из-за увеличения модуля упругости полос под влиянием падения температуры, может достигать 32-40 % от общей длины очага деформации, в то время как без учёта влияния температуры полосы расчётная доля длины упругих участков не превышает 17-21 %.

3. Установлено, что погрешность энергосилового расчёта ШПСГП снижается, если учитывать влияние фактического химического состава материала полосы и рабочих валков на их пластические и упругие свойства (модуль упругости, коэффициент Пуассона и сопротивление пластической деформации).

4. Разработана математическая модель формирования продольной разнотолщинности горячекатаных полос в непрерывной группе клетей ШПСГП под воздействием разнотолщинности подката, величин межклетевых натяжений и распределения между клетями суммарного обжатия.

5. Разработана методика компьютерной оптимизации технологического режима непрерывной группы клетей ШПСГП по критерию «минимум продольной разнотолщинности» путём перераспределения между клетями частных обжатий и увеличения удельных межклетевых натяжений.

Практическая ценность.

С использованием разработанных моделей и методики оптимизации рассчитаны, испытаны и внедрены на ШПСГП «2000» ЧерМК ОАО «Северсталь» усовершенствованные энергоэффективные технологические режимы, обеспечивающие уменьшение продольной разнотолщинности горячекатаных стальных полос с диапазона 3-5 % до уровня 2,0-2,2 % от номинальной толщины, соответствующего требованиям лучших мировых стандартов.

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

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Всероссийском научном семинаре «Научно-технический прогресс в металлургии» (г. Череповец, ноябрь 2011 г.), на международной конференции «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надёжность машин, приборов и оборудования» (г. Вологда, март 2012 г.), на международной научно-технической конференции «Новые решения в теории и технологии тонколистовой прокатки» (г. Краматорск, Украина, апрель 2012 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ («Производство проката», «Металлы», «Вестник ЧГУ»), 3 статьи в сборниках трудов международных конференций («Научно-технический прогресс в металлургии», «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надёжность машин, приборов и оборудования», «Новые решения в теории и технологии тонколистовой прокатки»).

Работа выполнялась в ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет» в период с 2010 г. по 2014 г.

Экспериментальные исследования проводились на ЧерМК ОАО «Северсталь».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 41 наименования. Работа содержит 87 страниц машинописного текста, 16 рисунков, 18 таблиц и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Литературно-аналитический обзор известных методов энергосилового расчета ШПСГП, математических моделей продольной разнотолщинности горячекатаных полос и методов оптимизации технологических режимов горячей прокатки

Выполнен литературно-аналитический обзор научных работ в области теории и технологии тонколистовой прокатки, необходимых для критического анализа технологии производства тонких горячекатаных полос на действующих широкополосных станах

Анализ базовой методики расчёта энергосиловых и технологических параметров широкополосных станов горячей прокатки, основанной на упругопластической модели очага деформации (рис. 1), показал, что она обладает следующими недостатками, которые снижают точность результатов расчётов:

1. Методика расчета длины очага деформации, особенно расчётная длина участка упругого восстановления части толщины полосы на выходе из очага деформации $x_{2упр}$, разработана без учёта влияния температуры горячекатаных полос и материалов рабочих валков на их упругие свойства.

2. Не в полной мере учитывалось влияние фактического содержания химических элементов в сталях, из которых изготовлены горячекатаные полосы, на их сопротивление пластической деформации, особенно это актуально при расчёте процесса прокатки полос из новых марок стали.

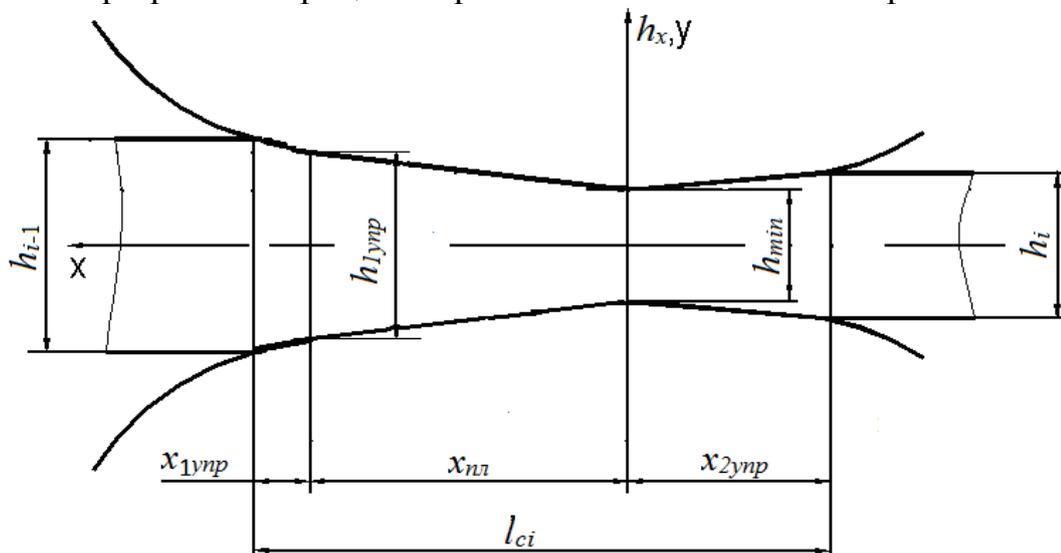


Рисунок 1 – Схема очага деформации, используемая в упругопластической модели

h_{i-1} , h_i – толщина прокатываемой полосы на входе и выходе из очага деформации соответственно; $x_{1упр}$, $x_{пл}$, $x_{2упр}$ – длины участков очага деформации, соответственно: 1^{го} упругого сжатия полосы, пластической деформации, 2^{го} упругого восстановления части толщины полосы на выходе из очага деформации; l_{ci} – длина всего очага деформации (аппроксимация контактных поверхностей на участках x_1 и $x_{2упр}$ плоскостями); $h_{1упр}$ – толщина полосы при абсолютной упругой деформации на участке $x_{1упр}$; h_{min} – минимальная толщина полосы при её прохождении через вертикальную осевую плоскость рабочих валков.

Помимо энергосилового расчёта, требуют совершенствования методы технологических расчётов и настройки станов горячей прокатки, чтобы получать горячекатаные полосы с колебаниями толщины, не превышающими $\pm 2,2\%$ от номинальной.

В процессе литературно-аналитического обзора выявились существенные недостатки известных математических моделей формирования продольной разнотолщинности горячекатаных полос в зависимости от факторов технологического процесса широкополосных станов горячей прокатки (ШПСГП). Ниже перечислены наиболее существенные из этих недостатков:

1. Подавляющее большинство математических моделей продольной разнотолщинности горячекатаных полос разработано без учёта напряженного состояния полосы в упругих участках очага деформации, что снижает точность результатов расчёта.

2. Ни в одной из рассмотренных в литературе моделей не предусмотрена методика оптимизации продольной разнотолщинности в условиях действующего стана. Оптимизация – важный этап использования математической модели, в процессе которого происходит выбор наилучшего варианта из множества возможных и уточняются принятые допущения и эмпирические усовершенствования.

3. Отсутствует достоверная и комплексная математическая модель формирования продольной разнотолщинности горячекатаных полос в функции основных возмущающих факторов технологии и управляющих воздействий. Известные методики определяют зависимости продольной разнотолщинности лишь от некоторых факторов, в частности, от управляющих воздействий систем автоматического регулирования толщины и натяжений.

Таким образом, в силу указанных особенностей, производство тонких и особо тонких полос по традиционным технологиям характеризуется ухудшением показателей точности и качества металла, невозможностью вести прокатку с минимальными допусками по толщине по всей площади листа.

Для преодоления этих негативных тенденций необходима разработка эффективных технологических режимов прокатки, которые должны основываться на усовершенствованных методах энергосилового расчёта, учитывающих отмеченные изменения в геометрии очагов деформации и в условиях изменения фактического содержания химических элементов в сталях.

Глава 2. Совершенствование методики энергосилового расчёта ШПСГП

Определение упругих характеристик материалов полосы и рабочих валков с учётом особенностей горячей прокатки

Точность расчёта длины очага деформации l_{ci} зависит в значительной степени от погрешности вычисления длины второго упругого участка $x_{2упр}$

(рис. 1). В базовой методике, основанной на упругопластической модели очага деформации, для этого используется известная из теории упругости классическая формула Герца:

$$x_{2,упр} = 8p_{cp,i} R \left(\frac{1-\nu_B^2}{\pi E_B} + \frac{1-\nu_{II}^2}{\pi E_{II}} \right), \quad (1)$$

где R – радиус бочки рабочего вала; ν_B , E_B – коэффициент Пуассона и модуль упругости материала рабочих валков; ν_{II} , E_{II} – коэффициент Пуассона и модуль упругости материала полосы.

Определение параметров очага деформации при постоянных усреднённых значениях упругих характеристик полосы и валков (для полосы – $E_{II} = 2,15 \cdot 10^5$ МПа, $\nu_{II} = 0,3$ при 20^0C ; для чугунных рабочих валков, обычно используемых в чистовых клетях ШПСГП – $E_B = 1,55 \cdot 10^5$ МПа, $\nu_B = 0,27$) приводит к значительным погрешностям при вычислении энергосиловых параметров технологического процесса горячей прокатки.

Для большинства марок углеродистых сталей (08пс, 08Ю, 1пс и др.), по справочным данным¹, усреднённая графическая зависимость E_{II} от температуры имеет вид, показанный на рис. 2, из которого видно, что при температурах, имеющих место в чистовых клетях ШПСГП ($800-1000^0C$) $E_{II} = (1,0-1,15) \cdot 10^5$ МПа, т.е. примерно в 2 раза меньше, чем при температуре 20^0C .

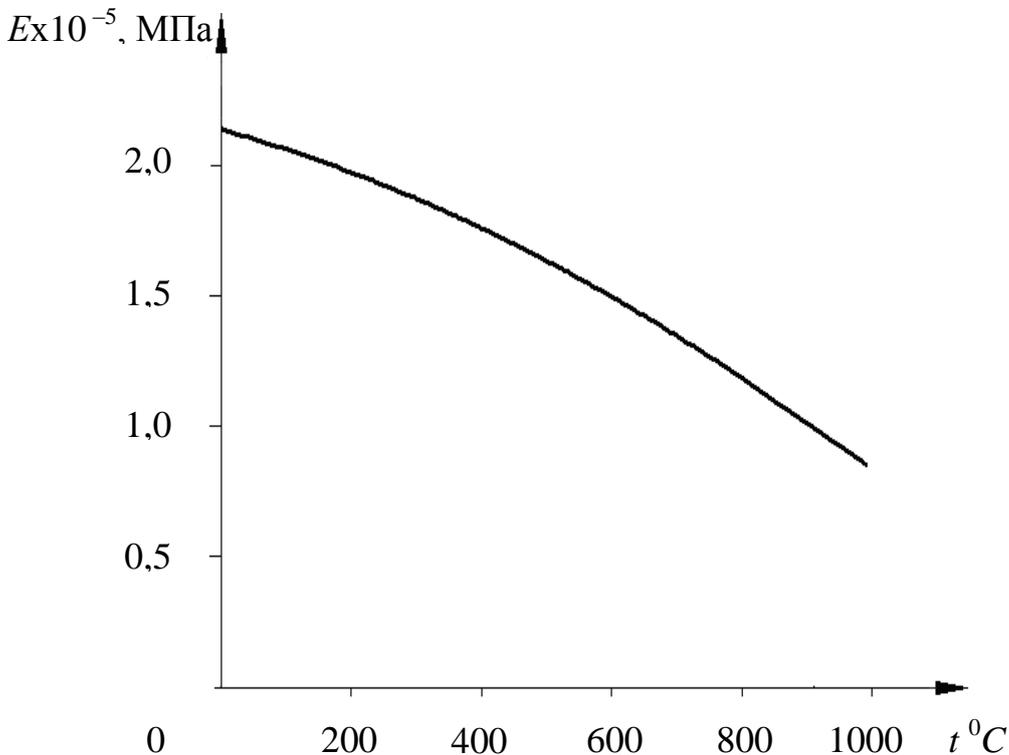


Рисунок 2 – Зависимость модуля упругости углеродистых сталей от температуры

¹ Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. М.: Металлургия, 1973. – 224 с.

После выполнения математической аппроксимации графика на рис. 2 была получена следующая зависимость модуля упругости полосы в i -ой клетки E_{Pi} от температуры (2):

$$E_{Pi} = E_{Pбаз} \cdot f\left(\frac{t_i}{t_{баз}}\right), \quad (2)$$

t_i – средняя температура полосы в i -ой клетки, фиксируемая АСУ ТП стана; $E_{Pбаз} = 2,15 \cdot 10^5$ МПа – базисное значение модуля упругости полосы; $t_{баз} = 20^0C$ – базисное значение температуры полосы; $f\left(\frac{t_i}{t_{баз}}\right)$ – функция

влияния температуры полосы на модуль упругости:

$$f\left(\frac{t_i}{t_{баз}}\right) = 1,008 - 1,29 \cdot 10^{-4} \left(\frac{t_i}{t_{баз}}\right)^2 - 6,71 \cdot 10^{-3} \left(\frac{t_i}{t_{баз}}\right) \quad (3)$$

Достоверность зависимостей (2) и (3) подтверждена критерием Фишера (при уровне значимости $\alpha = 0,05$ расчетное значение критерия превысило его табличное значение) и коэффициентом множественной детерминации $R^2 = 0,99$, что подтвердило практически адекватное соответствие выражений (2) и (3) графику на рис. 2.

Что касается коэффициента Пуассона прокатываемой полосы, то он связан с модулем упругости соотношением :

$$\nu = \frac{E_{П}}{2G} - 1, \quad (4)$$

где G – модуль сдвига, изменяющийся в функции температуры адекватно с изменением величины $E_{П}$.

Для полос из углеродистых сталей величина $\nu_{П}$, рассчитанная по формуле (4), оказалась в диапазоне 0,24–0,32, причём анализ показал, что её можно без заметной погрешности принять постоянной $\nu_{П} = 0,3$.

Для рабочих валков значения $\nu_{В}$, $E_{В}$ целесообразно задавать с учётом их материалов, поскольку в различных клетях чистовых групп ШПСГП применяют валки из разных марок чугуна, а в первых клетях могут применять рабочие валки из термостойкой инструментальной стали.

В таблице 1 приведены в качестве примера данные о материалах рабочих валков, используемых при прокатке на 6-клетевом ШПСГП «1700» и в чистовой группе ШПСГП «2000» ЧерМК ОАО «Северсталь». Там же указаны значения их коэффициентов Пуассона и модулей упругости, которые, в зависимости от материала валков, изменяются по клетям в диапазонах: $\nu_{В} = 0,27–0,35$; $E_{В} = (1,68–2,15) \cdot 10^5$ МПа.

Таблица 1

Материалы рабочих валков ШПСГП «1700» и чистовой группы ШПСГП «2000», их упругие свойства

ШПСГП «1700»				Чистовая группа ШПСГП «2000»			
Клеть №	Материал рабочих валков	Коэффициент Пуассона, ν_B	Модуль упругости E_B , МПа (средние значения)	Клеть №	Материал рабочих валков	Коэффициент Пуассона, ν_B	Модуль упругости E_B , МПа (средние значения)
1	Быстрорежущая термостойкая сталь	0,35	$2,15 \cdot 10^5$	6-7	Высокохромистый закалённый чугун	0,29	$2,05 \cdot 10^5$
2	Высокохромистый закалённый чугун	0,29	$2,05 \cdot 10^5$				
3-4	Индефинитный закалённый чугун	0,27	$1,68 \cdot 10^5$	8	Высокохромистый термостойкий чугун	0,32	$2,15 \cdot 10^5$
5-6	Индефинитный чугун двойной закалки	0,28	$1,83 \cdot 10^5$	9-12	Индефинитный чугун двойной закалки	0,28	$1,83 \cdot 10^5$

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 (рис. 1):

– на упругих участках 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 сопротивление растет в результате наклепа, а из-за высокой температуры уменьшается в результате рекристаллизации.

Для определения сопротивления деформации на пластическом участке длиной $x_{пл}$ (рис. 1) 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:

$$\sigma_{\phi,нл} = S\sigma_{од}u_i^a(10 \cdot \varepsilon_{\Sigma i})^b \left(\frac{t_i}{1000} \right)^c, \quad (5)$$

где S , a , b , c – постоянные числа, определяемые для каждой марки стали по результатам испытаний на пластометре; u_i – скорость деформации в i -й клетки; $\varepsilon_{\Sigma i}$ – суммарное относительное обжатие за i проходов; t_i – температура полосы на выходе из i -й клетки.

Таким образом, формула Л. В. Андреюка (5) позволяет рассчитать сопротивление деформации при горячей прокатке полос даже из тех сталей, которые сам автор не испытывал. Это актуально в современных условиях, т.к. на металлургических предприятиях России в последние десятилетия производят прокат из новых марок стали (зарубежные стандарты EN10025–93, EN 10130–98, ASTM A366/A366M–91), а в сталях стандартных марок, таких, как Ст.1пс, 08пс, 08Ю, изменился химический состав.

Сопоставительный анализ точности усовершенствованной и базовой методик расчёта энергосиловых параметров ШПСГП

Методику, изложенную в главе 2, реализуют с помощью итерационного алгоритма, при этом расчёт усилия горячей прокатки в i -ой рабочей клетки производят по общеизвестной формуле:

$$P_i = p_{срi} l_{ci} b,$$

где b – ширина прокатываемой полосы;

$p_{срi}$ – среднее для очага деформации i -ой клетки значение нормального контактного напряжения, которое, согласно упругопластической модели очага деформации (рис. 1) рассчитывают по формуле Э.А. Гарбера и И.А. Кожевниковой:

$$p_{срi} = \frac{1}{l_{ci}} (p_1 x_{1ynp} + p_{23} x_{нл} + p_4 x_{2ynp}),$$

где p_1 , p_{23} и p_4 – средние значения p_x на каждом из трёх участков, имеющих длины x_{1ynp} , $x_{нл}$, x_{2ynp} .

Для апробации уточнённой методики энергосилового расчёта были рассчитаны структурные параметры очагов деформации и силы прокатки при производстве на 6-клетьевом стане «1700» и в чистовой группе ШПСГП «2000» ЧерМК ОАО «Северсталь» горячекатаных полос шириной 1000–1540 мм толщиной 0,9–4,5 мм, из углеродистых марок сталей (все эти расчёты приведены в диссертации). Сопоставление расчётных и фактических сил прокатки выполнялось на следующем массиве фактических данных: стан «1700» – 30 данных; стан «2000» – 185 данных.

Из результатов сопоставления можно сделать следующие выводы:

1. Диапазон погрешностей расчёта сил прокатки на ШПСГП «1700» составил: по базовой методике 0,3–11,1% (среднее значение 5,8 %); по

уточнённой методике 0,1–3,6% (среднее значение 1,7%), т.е. и среднее и максимальные значения погрешностей уменьшились в 3,08–3,4 раза.

2. Диапазон погрешностей расчёта сил прокатки в чистой группе ШПСГП «2000» составил: по базовой методике 0,3–15,7 % (среднее значение 6,3 %); по уточнённой методике: 0,4–8,2 % (среднее значение 4,2 %), т.е. и среднее и максимальные значения погрешностей уменьшились в 1,5–1,9 раза.

3. Доля длины упругих участков от общей длины очага деформации, рассчитанная по уточнённой методике, оказалась равной:

– в первой клетке: 3,1–4,5 %;

– в последней клетке при прокатке наиболее тонких полос: 32–40 %.

На рис. 3 показана усреднённая графическая зависимость величины $\frac{x_{1\text{упр.}} + x_{2\text{упр.}}}{l_{ci}}$ от толщины полосы на выходе из очага деформации, из которой видно, что при уменьшении толщины полосы до значений 0,9–1,5 мм доля длины упругих участков от общей длины очага деформации увеличивается до 30–40% (в основном, за счёт длины $x_{2\text{упр}}$ второго упругого участка).

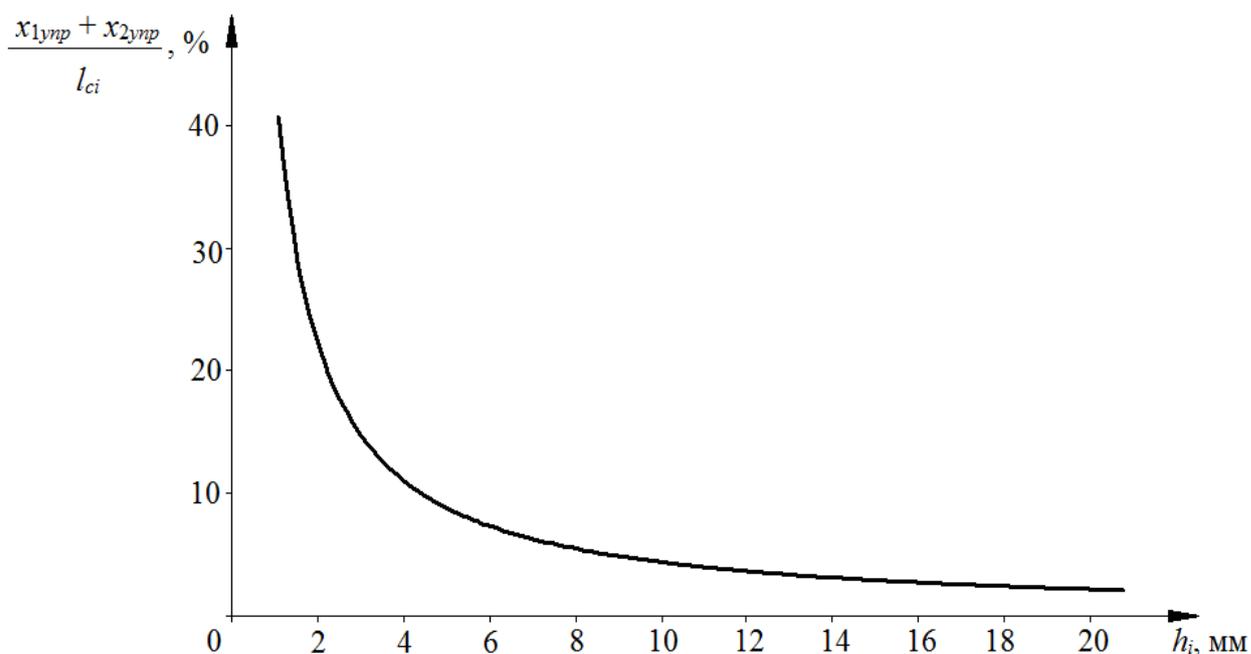


Рисунок 3 – Зависимость величины $\frac{x_{1\text{упр.}} + x_{2\text{упр.}}}{l_{ci}}$ от толщины полосы на выходе из клетки

выходе из клетки

Увеличение расчётных длин упругих участков почти в 2 раза по сравнению с результатами их расчёта по базовой методике, где доля длины упругих участков не превышала 17-21 %, объясняется тем, что при температурах горячей прокатки модуль упругости полосы уменьшается почти в 2 раза.

Таким образом, представленные в работе методы обеспечивают достаточную для практики точность и оперативность расчёта геометрических

и энергосиловых параметров процессов горячей прокатки, что позволяет использовать их для разработки моделей и технологий производства тонких и особо тонких горячекатаных полос.

Глава 3. Моделирование процесса образования продольной разнотолщинности стальных полос на ШПСГП

Математическое моделирование процесса образования продольной разнотолщинности широких полос при горячей прокатке

Сущность разработанной нами математической модели формирования продольной разнотолщинности полос в процессе горячей прокатки состоит в превращении графического определения величины δh_i , показанной на рис. 4, в последовательность математических операций, выполняемых поочерёдно для всех клеток широкополосного стана или для его непрерывной чистовой группы.

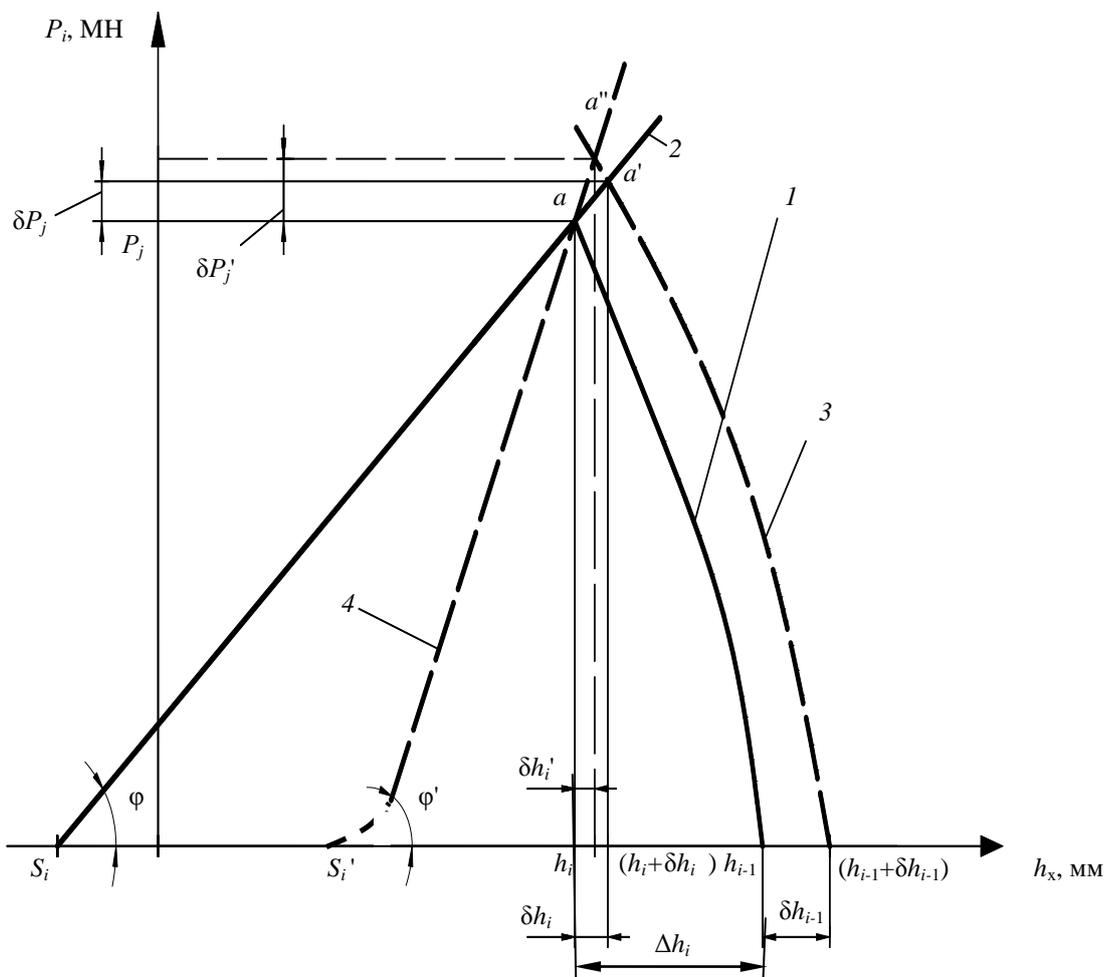


Рисунок 4 – Графическое определение продольной разнотолщинности полосы на выходе из i -ой клетки (δh_i) в зависимости от разнотолщинности на входе в клетку (δh_{i-1}) и коэффициента жёсткости клетки ($M_{кл}$).

Ниже приведены два основных уравнения, использованные в разработанной модели.

Первое уравнение выражает функциональную зависимость усилия прокатки от параметров технологического режима (кривая 1):

$$P_i = f(h_{i-1}, h_i, \sigma_{ф.плi}, \mu_i, v_i, b, \sigma_{i-1}, \sigma_i), \quad (6)$$

где P_i – усилие прокатки в i -ой рабочей клетке; h_{i-1}, h_i – толщина полосы на входе в i -ю клетку и на выходе из неё; $\sigma_{ф.плi}$ – среднее значение сопротивления пластической деформации полосы в i -ой рабочей клетке, зависящее от её химического состава, температуры (t_i), относительного обжатия (ε_i) и скорости деформации (u_i); μ_i – коэффициент трения в очаге деформации i -ой клетки; v_i – скорость полосы на выходе из i -ой клетки; b – ширина полосы; σ_{i-1}, σ_i – заднее и переднее удельные натяжения соответственно.

Второе уравнение выражает линейную взаимосвязь между упругой деформацией рабочей клетки и действующим на валки усилием прокатки (прямая 2):

$$P_i = M_{кл}(h_i - S_i), \quad (7)$$

где $M_{кл}$ – модуль жёсткости клетки (представляет собой тангенс φ – угла наклона прямой 2), МН/мм; S_i – предварительно установленный зазор между рабочими валками i -ой клетки, мм.

Алгоритм модели представляет собой выполнение следующих вычислительных операций (на примере расчёта продольной разнотолщинности δh_i полосы с номинальной толщиной h_i на выходе из i -ой клетки непрерывной k -клетевой группы клеток, если на входе в клетку номинальная толщина равна h_{i-1} , а продольная разнотолщинность оказалась равной δh_{i-1}):

1. Расчёт силы прокатки P_i с помощью упругопластической модели энергосиловых параметров по формуле (6) для номинального режима прокатки с обжатием $\Delta h_i = h_{i-1} - h_i$. В результате на графике (рис. 4) становится известным положение точки a (координаты h_i и P_i).

2. Серия расчётов по формуле (6) значений P_i для обжатий в i -ой клетке, меньших чем Δh_i . Для этого интервал $[h_i; h_{i-1}]$ разбивается на n одинаковых отрезков и для каждого отрезка с номерами j ($j = 1, 2, 3, \dots, n$) вычисляется значение $P_{i(j)}$ при обжатии $\Delta h_{i(j)} = \frac{\Delta h_i}{j}$. Результат этой серии расчётов – построенная кривая 1 (рис. 4), соединяющая точки h_{i-1} и a .

3. Расчёт требуемой величины предварительного зазора между валками по выражению, вытекающему из формулы (7):

$$S_i = h_i - \frac{P_i}{M_{кл}}. \quad (8)$$

4. Построение по двум точкам S_i и a прямой линии 2 (рис. 4), представляющей собой уравнение (7) упругой линии i -ой рабочей клетки. При увеличении $M_{кл}$ уравнение упругой деформации клетки (7) займёт положение кривой 4 (рис. 4), а необходимый исходный зазор между валками будет равен

S_i' . Изменение формы прямой 2 в кривую 4, при увеличении $M_{кл}$, объясняется выборкой зазоров между деталями рабочей клетки.

5. Выполнение серии расчётов силы прокатки $P_{i(j)}$ при толщине подката, увеличенной из-за продольной разнотолщинности ($h_{i-1} + \delta h_{i-1}$), с обжатиями, уменьшаемыми с заданным шагом от максимального значения $\Delta h_{i(1)} = (h_{i-1} + \delta h_{i-1}) - h_i$. Результат этой серии расчётов – кривая 3 (рис. 4), выражающая зависимость (6) силы P_i от обжатия при увеличенной толщине подката ($h_{i-1} + \delta h_{i-1}$), и набор значений $P_{i(j)}$ при разных обжатиях.

6. Выполнение серии расчётов по формуле (7) силы $P_{i(кл)}$, возникающей при упругой деформации клетки под воздействием пошагово увеличивающегося обжатия, начиная с минимального значения h_i , с шагом $\frac{\Delta h_i}{n}$. Результат этой серии расчётов – продление прямой линии 2 (рис. 4) от точки a в сторону пересечения её с кривой 3 и набор значений силы $P_{i(кл)}$, рассчитанных по формуле (7) при каждом новом значении $h_i + j \cdot \frac{\Delta h_i}{n}$, где $j = 1, 2, 3, \dots, n$.

7. Сравнение значений сил прокатки, рассчитанных по формулам (6) и (7) согласно пунктам 5 и 6 описываемого алгоритма, при каждом пошаговом значении толщины полосы:

$$\frac{|P_{i(j)} - P_{i(кл)}|}{P_{i(кл)}} < \Delta, \quad (9)$$

где Δ – допустимая погрешность расчёта (например $\Delta = 0,01$).

Если неравенство (9) при каком-то шаге расчёта оказалось выполненным, то кривая 3 и прямая 2 на рис. 4 пересеклись в точке a' , координата которой на оси $0-h_x$ определяет искомые значения продольной разнотолщинности δh_i и толщины полосы на выходе из клетки ($h_i + \delta h_i$).

Изложенную в п.п. 1–7 вычислительную процедуру реализуют последовательно, начиная с 1^{ой} клетки k -клетевой непрерывной группы. В валки 1^{ой} клетки входит подкат, имеющий номинальную толщину h_0 и фактическую продольную разнотолщинность $\delta h_{i-1} = \delta h_0$. Величина $\delta h_i = \delta h_k$, полученная на выходе из последней (k -той) рабочей клетки, и будет являться выходным параметром модели формирования продольной разнотолщинности горячекатаной полосы.

Описываемая модель представлена в виде блок-схемы расчёта в диссертации.

*Анализ точности новой математической модели продольной
разнотолщинности при горячей прокатке в непрерывной
группе клеток ШПСГП*

Достоверность математической модели продольной разнотолщинности, проверяли путём сопоставления средних расчётных и измеренных томографом (рис. 5) значений продольной разнотолщинности $\delta h_{i(ср)}$ в рабочей клетки № 12 чистовой группы ШПСГП «2000» ЧерМК ОАО «Северсталь».

Из статистического анализа распределения погрешностей (статистический ряд расхождений содержит 206 членов), представленного в диссертации, можно сделать следующие выводы:

1. Максимальная погрешность расчёта продольной разнотолщинности полосы $\Delta h_{i(\text{ср})}$ составила 11,87 %. В 81,07 % случаев расхождения расчётных и измеренных значений продольной разнотолщинности не превысили 8 %, в 10,19 % случаев погрешность превысила 10 %.

2. Наиболее типичное значение погрешности расчёта продольной разнотолщинности (мода) – 4,5 %.

3. Средняя величина колеблемости погрешности расчёта продольной разнотолщинности вокруг среднего значения (среднее квадратическое отклонение σ) составила 3,39 %, т.е. основная масса погрешностей расчёта (приблизительно ≈ 66 % с надёжностью $\gamma = 0,95$) лежит в доверительном интервале 4,77-6,71 %.

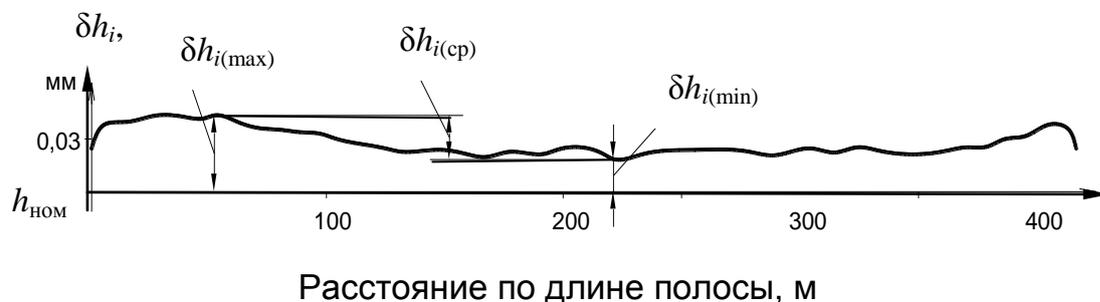


Рисунок 5 — Характерная профилотолщинность изменения продольной разнотолщинности по длине горячекатаной полосы в клетке № 12 чистовой группы ШПСГП «2000» ($h_{\text{ном}} = 3,2$ мм)

Данные результаты позволяют сделать вывод о том, что математическая модель продольной разнотолщинности является достоверной и может быть использована для совершенствования технологических режимов горячей прокатки по критерию «минимум продольной разнотолщинности».

Глава 4. Разработка и промышленное опробование на широкополосном стане методики компьютерной оптимизации режимов горячей прокатки стальных полос по критерию «минимум продольной разнотолщинности»

Разработка методики оптимизации режимов горячей прокатки по критерию «минимум продольной разнотолщинности»

Методика компьютерной оптимизации режима горячей прокатки в непрерывной группе клетей заключается в следующем.

1^{ый} этап. Исходя из установленного опытом принципа оптимизации — перераспределения между клетями частных обжатий путём увеличения их в первых клетях и уменьшения в последних — непрерывная группа клетей условно разбивается на две подгруппы: с количеством клетей k_1 и k_2 . Если

общее число клеток чётное, то $k_1 = k_2 = \frac{k}{2}$, если k – нечётное число, то $k_1 = \frac{k+1}{2}$; $k_2 = \frac{k-1}{2}$.

Для каждой клетки первой подгруппы, начиная с первой, вычислительная процедура организуется таким образом, чтобы с использованием модели энергосиловых параметров процесса горячей прокатки путём упорядоченного перебора возможных вариантов обжатий подобрать такое максимально возможное частное обжатие, при котором расчётные значения силы прокатки и мощности главного привода не достигают предельных величин, указанных в паспортной характеристике рабочей клетки.

Результаты первого этапа:

1. Максимально возможная загрузка клеток первой подгруппы и максимально возможное в ней суммарное обжатие $\varepsilon_{\Sigma 1}$.

2. Минимально возможная толщина полосы, входящей во вторую подгруппу клеток и минимально возможное в ней суммарное обжатие $\varepsilon_{\Sigma 2}$.

2^{ой} этап. Упорядоченный перебор возможных вариантов распределения суммарного обжатия $\varepsilon_{\Sigma 2}$ между клетями второй подгруппы. Технологическим ограничением при этом переборе является минимально допустимое частное относительное обжатие $\varepsilon_{i, \min}$. Как правило, в последних клетях чистовых групп широкополосных станов при горячей прокатке стальных полос принимают $\varepsilon_{i, \min} = 8 \%$, т.к. при меньших обжатиях не обеспечивается необходимая однородность структуры металла, что ведёт к уменьшению его механических характеристик из-за неоднородности размеров и формы зёрен. Кроме того, при переборе вариантов обжатий во второй подгруппе стремятся, чтобы частные обжатия от клетки к клетке уменьшались и минимальное обжатие было в последней (k -той) рабочей клетки.

Результаты второго этапа:

Набор усовершенствованных вариантов распределения суммарного обжатия $\varepsilon_{\Sigma 2}$ между клетями второй подгруппы, при соблюдении всех технологических ограничений.

3^{ий} этап. Включается в работу изложенная выше модель формирования продольной разнотолщинности полосы. Сначала рассчитывается продольная разнотолщинность на выходе полосы из первой подгруппы клеток, а затем для каждого усовершенствованного варианта распределения обжатий между клетями второй подгруппы рассчитываются и сравниваются между собой значения продольной разнотолщинности на выходе из непрерывной группы клеток. Из всех усовершенствованных вариантов распределения обжатий выбирается один оптимальный, обеспечивающий минимальную продольную разнотолщинность.

Изложенные вычислительные процедуры были реализованы в виде методики компьютерной оптимизации технологических режимов прокатки полос в чистовой группе ШПСГП по критерию «минимум продольной разнотолщинности». Блок-схема этой методики показана на рис. 6 на примере 7-клетевой чистовой группы стана «2000».

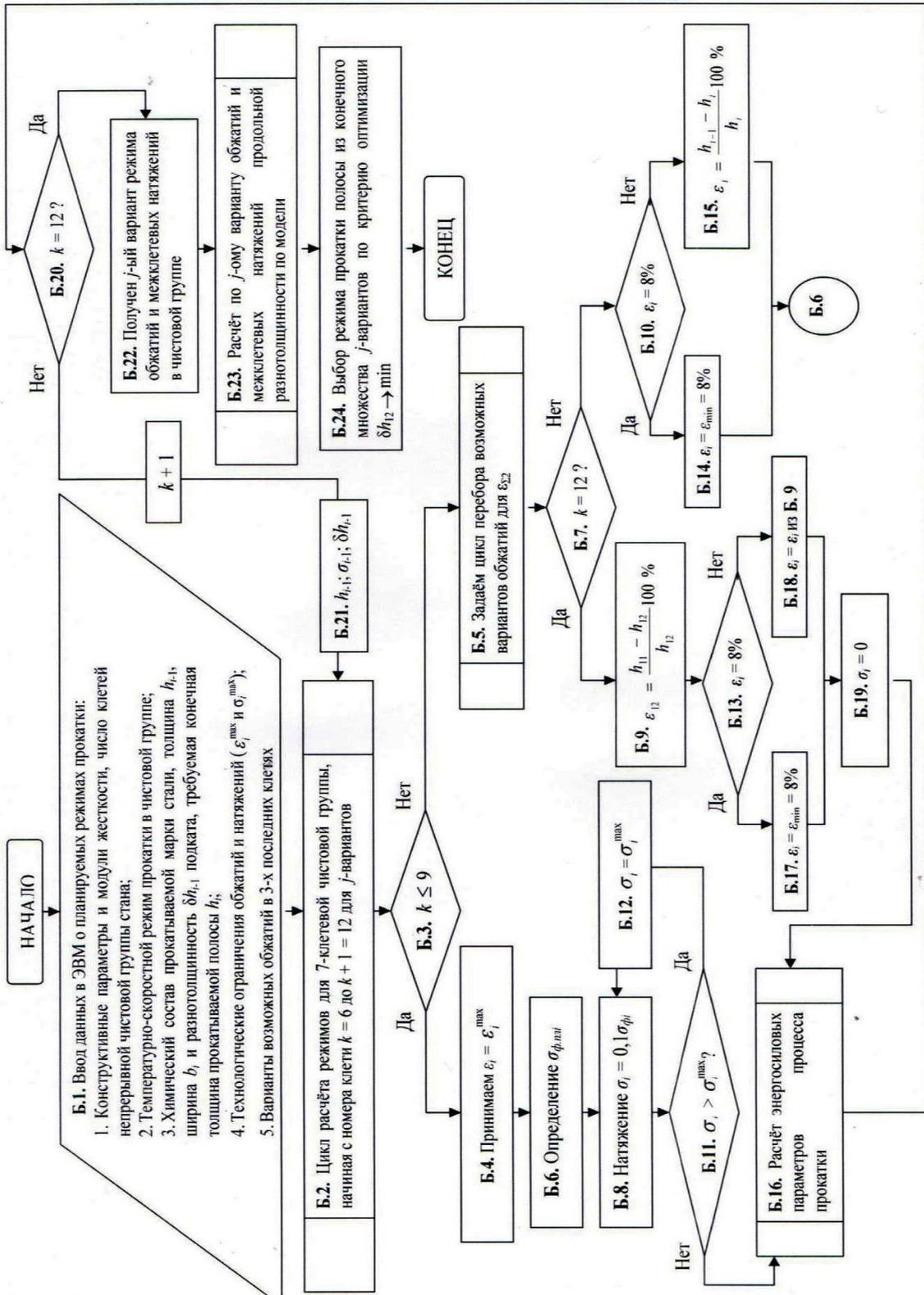


Рисунок 6 – Блок-схема методики компьютерной оптимизации технологических режимов по критерию «минимум продольной разнотолщинности» для 7-клетевой чистовой группы ШПСГП «2000».

Промышленная реализация методики компьютерной оптимизации режимов горячей прокатки по критерию «минимум продольной разнотолщинности»

Указанная выше компьютерная программа была применена на действующем 12-ти клетевом стане «2000», имеющем чистовую группу в составе 7 клетей (с 6^{ой} по 12^{ую}) для уменьшения продольной

разнотолщинности горячекатаных полос, используемых в качестве подката в производстве холоднокатаных листов. Согласно указанному выше методу, чистовые клетки были условно разделены на 2 подгруппы: первая – в составе клеток №№ 6, 7, 8, 9; вторая – в составе клеток №№ 10, 11, 12.

Учтённые при моделировании ограничения технологических параметров, установленные на основании практического опыта и паспортных данных оборудования, приведены в таблице 2.

Промышленные испытания проводили при прокатке полос из стали 08пс шириной 1278 мм и толщиной 2,0 мм из подката толщиной 36,55 мм. Обработка данных системы автоматического контроля толщины («томографа») показала, что максимальные отклонения от номинальной толщины полосы на входе в чистовую группу этого стана (т.е. после 5^{ой} клетки черновой группы) составляли: $\delta h_5 = 1,62$ мм (4,43 %). При рабочем режиме обжатий (регламентированном действовавшей нормативной документацией) максимальная продольная разнотолщинность полос указанного вида сортамента на выходе из стана была равна: $\delta h_{12} = 0,028$ мм (1,4 %).

Таблица 2

Ограничения значений технологических параметров горячей прокатки в чистовой группе стана «2000»

Параметр прокатки	Номер клетки						
	6	7	8	9	10	11	12
$\varepsilon_{i,max}$, %	55	52	45	30	25	25	20
$\varepsilon_{i,min}$, %	-	-	-	-	8	8	8
$\sigma_{i,max}^*$, МПа	13	18	23	28	34	34	0
$P_{i,max}$, МН	35	35	32	28	20	20	17

*Примечание: σ_i^{max} – максимальное допустимое удельное натяжение за i -ой клетью.

При оптимизации режима прокатки, выполненной по результатам компьютерного расчёта по указанной программе, были также увеличены межклетевые удельные натяжения до оптимального уровня (10 % от величины $\sigma_{ф.пл.i}$).

В таблице 3 приведены и сопоставлены параметры рабочего и оптимизированного режимов прокатки и значения продольной разнотолщинности полос. Как видно из таблицы 3, суммарное относительное обжатие в первой подгруппе клеток в рабочем режиме составило 88,89 %, а в оптимизированном 91,65 %; толщина полосы на входе в 10^{ую} клетку в рабочем режиме 4,06 мм, а в оптимизированном 3,05 мм.

Благодаря уменьшению в 1,33 раза толщины полосы на входе в 10^{ую} клетку суммарное относительное обжатие во второй подгруппе клеток удалось уменьшить с 50,7 % до 34,4 %. В результате указанного перераспределения между клетями частных обжатий продольная разнотолщинность полос на выходе из стана уменьшилась до 0,015 мм (0,75 %), т.е. в 1,87 раза.

Переход на оптимизированный режим прокатки проходил при испытаниях поэтапно. На первом этапе, не меняя режим обжатий, увеличили межклетевые натяжения. Измерения показали, что продольная

разнотолщинность за счёт этого уменьшилась незначительно (не более, чем на 15 %). И только после перераспределения между клетями частных обжатий удалось добиться указанного выше максимального уменьшения продольной разнотолщинности.

На рис. 7 в качестве графической иллюстрации эффекта оптимизации режима прокатки представлены, по аналогии с рис. 4, графические зависимости (6) и (7) для десятой клетки (первой во второй подгруппе) при рабочем и оптимизированном режимах. Из графиков (рис. 7) видно, что уменьшение толщины полосы на входе в 10^ю клетю с 4,06 мм до 3,05 мм и относительного обжатия в ней с 21,07 % до 19,67 % позволило снизить усилие прокатки с 15,55 МН до 11,67 МН. Продольная разнотолщинность на входе в клетю уменьшилась с 0,167 мм (4,11 %) до 0,118 мм (3,87 %), на выходе из клетки – с 0,086 мм (2,93 %) до 0,053 мм (2,16 %).

Таблица 3

Параметры технологии и продольная разнотолщинность горячекатаных полос из стали 08пс толщиной 2,0 мм, шириной 1278 мм, прокатанных по рабочему и оптимизированному режимам в чистой группе клетей стана «2000» из подката толщиной 36,55 мм.

Режим	Клеть №	v_i , м/с	h_i , мм	ε_i , %	$\varepsilon_{\Sigma i}$, %	$\sigma_{\Phi i}$, МПа	μ_i , б/р	σ_i^* , МПа	t_i , °С	P_i , МН	δh_i , мм	$\Delta \delta h_i$, %
Рабочий	6	1,15	18,2	50,2	50,2	129,0	0,49	-	989	24,96	0,523	2,87
	7	2,11	9,87	45,71	73,35	148,43	0,447	8	959	26,19	0,421	4,26
	8	3,36	5,7	42,25	84,63	215,1	0,377	8	955	21,39	0,34	5,96
	9	5,75	4,06	28,77	88,89	230,85	0,325	12	936	15,79	0,167	4,11
	10	7,09	2,93	27,83	92,1	305,54	0,287	15	896	15,55	0,086	2,93
	11	9,08	2,29	21,84	94,08	352,87	0,259	15	870	14,29	0,059	2,57
	12	10,65	2,0	12,66	94,53	357,45	0,241	15	854	8,51	0,028	1,4
Оптимизированный	6	1,24	16,45	55	55	126,1	0,478	-	987	25,75	0,437	2,65
	7	2,45	7,9	52	78,38	177,5	0,427	12,6	963	27,87	0,318	4,02
	8	4,38	4,35	45	88,09	219,5	0,349	17,7	945	24,32	0,221	5,08
	9	6,53	3,05	30	91,65	269	0,296	21,9	929	22,24	0,118	3,87
	10	8,23	2,45	19,67	93,29	307,5	0,273	26,9	882	11,67	0,053	2,16
	11	9,4	2,2	10,2	93,98	328,8	0,257	30,7	861	7,58	0,026	1,18
	12	10,64	2,0	9,09	94,53	357,6	0,245	32,9	854	9,59	0,015	0,75

^{*)} Примечание: σ_i – удельное натяжение за i -ой клетю.

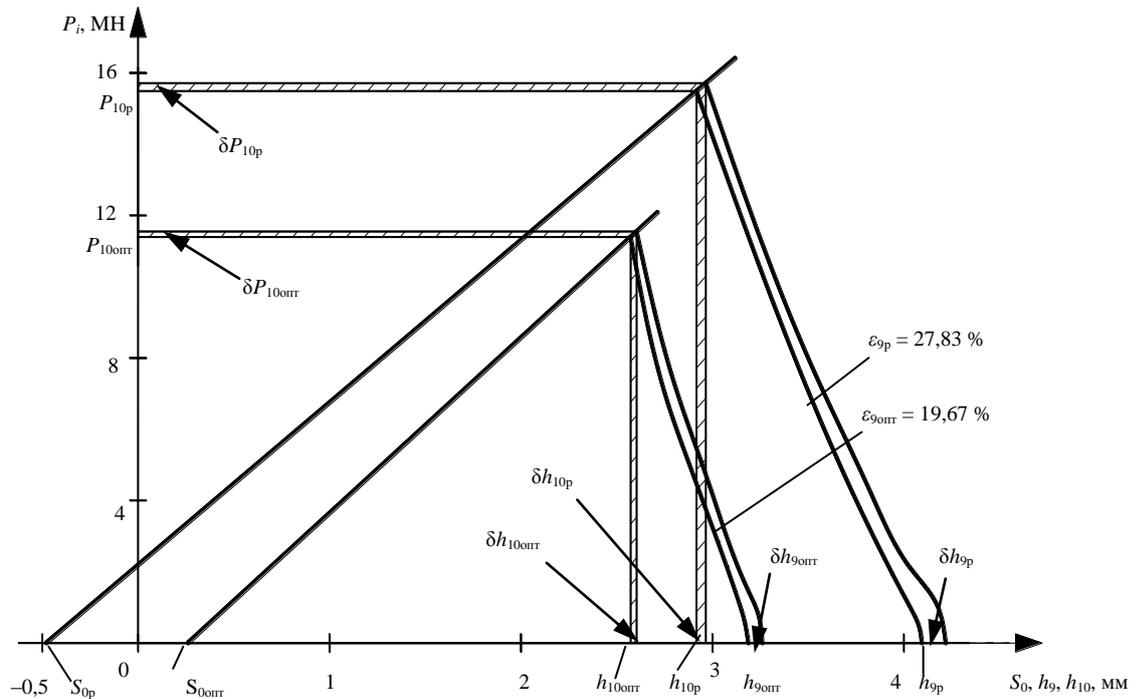


Рисунок 7 – Сопоставление продольных разнотолщинностей полосы на выходе из 10^й клетки чистовой группы ШПСГП «2000» при обычной технологии («р» – рабочий режим) и при оптимизированном режиме прокатки («опт»).

Анализ точности методики компьютерной оптимизации режима прокатки полос на ШПСГП

С использованием вышеизложенной методики компьютерной оптимизации режима прокатки были рассчитаны на ЭВМ и реализованы оптимизированные режимы горячей прокатки полос толщиной 2,0–3,5 мм и шириной 1020–1625 мм в чистовой группе ШПСГП «2000» ЧерМК ОАО «Северсталь» (все технологические параметры представлены в диссертации).

Из статистического анализа распределения погрешностей в результате промышленной апробации алгоритма оптимизации, представленного в диссертации, можно сделать следующие выводы:

1. Максимальная погрешность расхождений расчёта продольной разнотолщинности при оптимизации процесса горячей прокатки составила 14,0 %. В 64 % случаев расхождения расчётных и измеренных значений не превысили 6 %; в 10,9 % случаев погрешность превысила 10 %.

2. По результатам опытно-промышленной проверки оптимизированных режимов горячей прокатки по критерию «минимум продольной разнотолщинности», по сравнению с рабочими режимами, продольная разнотолщинность для 106 полос уменьшилась в 1,62–2,14 раза.

Данные результаты позволяют сделать вывод о том, что методика компьютерной оптимизации технологических режимов горячей прокатки по критерию «минимум продольной разнотолщинности» является достоверной и может быть использована для совершенствования технологии горячей

прокатки полос с требованиями точности к колебаниям толщины по всей площади $\pm 2\%$ от номинальной толщины.

Глава 5. Промышленные испытания оптимизированных режимов горячей прокатки в чистовой группе ШПСГП «2000»

С целью выполнения новых требований к точности автомобильных листов и сокращения в 2,5 раза колебаний их конечной толщины на ОАО «Северсталь» выполнен с участием автора комплекс исследований технологических факторов, влияющих на отклонения толщины полос от номинального значения.

В процессе исследований было установлено, что главной причиной колебаний толщины холоднокатаной полосы по всей её площади является нестабильность толщины горячекатаного подката в продольном и поперечном направлениях, поэтому решение задачи получения высокоточных холоднокатаных полос необходимо начинать с оптимизации технологии горячей прокатки.

Для получения холоднокатаных полос с минимальной неплоскостностью необходимо обеспечить «наследственность» поперечного профиля горячекатаных и холоднокатаных полос, согласно которой допуски на выпуклость поперечного профиля горячекатаных и холоднокатаных полос были установлены одинаковыми (в относительных единицах) – это значит, что для холоднокатаных полос с допускаемой поперечной выпуклостью $\delta h_{\text{нон}}^{\text{дон}} = +0,01 h_{\text{ном}}$ необходим горячекатаный подкат, имеющий номинальную толщину h_0 , с допускаемой выпуклостью поперечного профиля $\delta h_0^{\text{дон}} = 0,01 h_0$.

Продольная разнотолщинность подката при этом должна быть минимально возможной, т.к. диапазоны воздействия на толщину системами автоматического регулирования на станах холодной прокатки ограничены.

Чтобы выполнить вышеизложенные требования к горячекатаным полосам были разработаны более жёсткие нормы для стандарта предприятия (СТП), регламентирующего выпуклость поперечного профиля горячекатаных полос (таблица 4).

Таблица 4

Допускаемые диапазоны выпуклостей поперечного профиля горячекатаных полос, используемых в качестве подката для холодной прокатки листов автомобильного сортамента

Номинальная толщина h_0 , мм		2,0	3,0	4,0
Выпуклость профиля, мм	Минимальная ($0,005 h_0$)	0,01	0,015	0,02
	Максимальная ($0,01 h_0$)	0,02	0,03	0,04

Для обеспечения диапазона выпуклостей, указанного в таблице 4, скорректировали профилировки рабочих валков чистовой группы клетей (№№ 6–12) ШПСГП «2000».

Как и на большинстве подобных ШПСГП, рабочие валки этого стана шлифуют вогнутыми, причём величину вогнутости в середине бочки назначают усреднённой, чтобы минимизировать число перевалок и перешлифовок рабочих валков при горячей прокатке полос разных профилеразмеров.

Руководствуясь этим принципом, мы рассчитали усреднённые шлифовочные вогнутости для всех клетей чистовой группы ШПСГП «2000», наиболее подходящие для получения выпуклостей поперечного профиля полос, укладываемых в допуски таблице 4.

Значения шлифовочных вогнутостей рабочих валков определяли численным методом с учётом их упругих деформаций и теплового профиля². Усреднённое значение тепловой выпуклости рабочих валков определяли, обработав базу данных АСУ ТП ШПСГП «2000», а также, используя результаты исследования теплового режима валков данного стана.

Скорректированные величины шлифовочных вогнутостей рабочих валков приведены в таблице 5 в сопоставлении с вогнутостями, принятыми по действовавшей технологии.

Из таблицы 5 видно, что в клетях №№ 6–9 вогнутости каждого валка уменьшены на 0,05 мм, а в клетях №№ 10–12 – на 0,02 мм. В процессе испытаний была сделана попытка уменьшить вогнутость валков за счёт уменьшения интенсивности их поверхностного охлаждения в середине бочки (без изменения шлифовочных профилировок), но она не дала устойчивого результата, из-за нестабильности теплового профиля валков.

Таблица 5

Шлифовочные вогнутости в середине бочки рабочих валков чистовых клетей ШПСГП «2000»

Величина вогнутости, мм		Номер клетки						
		6	7	8	9	10	11	12
по действовавшей технологии	верхний валок	0,5	0,4	0,3	0,25	0,2	0,2	0,2
	нижний валок	0,5	0,4	0,3	0,25	0,2	0,15	0,15
скорректированная	верхний валок	0,45	0,35	0,25	0,2	0,18	0,18	0,18
	нижний валок	0,45	0,35	0,25	0,2	0,18	0,13	0,13

Помимо изменения шлифовочных профилировок, увеличили межклетевые удельные натяжения полосы с диапазона $(0,02 - 0,05)\sigma_{ф.пл.i}$ (где $\sigma_{ф.пл.i}$ – сопротивление пластической деформации полосы на выходе из i -ой клетки) до оптимального диапазона, подтверждённого опытом многих станов:

² С участием инженера Болобановой Н.Л.

$(0,01 - 0,12)\sigma_{ф.пл.i}$. После изложенных подготовительных мероприятий включили в действие разработанную нами методику компьютерной оптимизации технологических режимов горячей прокатки по критерию «минимум продольной разнотолщинности», подробно описанную в главе 4.

Промышленную реализацию всех описанных выше технологических решений, внесённых в СТП и операционные карты на ШПСГП «2000», проводили в период с мая по сентябрь 2011 г., путём сквозной горячей прокатки нескольких опытных партий металла. Испытания проводили поэтапно: сначала осваивали новые профилировки рабочих валков (таблица 5), режимы обжаты и натяжений разных профилеразмеров полос, рассчитанные с применением методики оптимизации. В результате эти требования были освоены в полном объёме, и в июле-августе 2011 г. на ШПСГП «2000» было произведено около 40000 тонн высококачественных горячекатаных полос с минимальной продольной разнотолщинностью и с поперечным профилем, имеющим выпуклость, не превышающую 1 % от номинальной толщины $h_{ном}$.

Затем была осуществлена холодная прокатка этого подката на 5^{ти} клетевом стане «1700». Обработка данных, полученных из АСУ ТП 5^{ти} клетцевого стана холодной прокатки «1700», и результаты измерения поперечного и продольного профиля полос на образцах, отрезанных от концевых и среднего участков готовых холоднокатаных рулонов, показали, что длина кондиционных участков полос, имеющих поперечный профиль с выпуклостью 0,6–1,0 % и колебания толщины по всей площади, не превышающие ± 2 % от номинальной толщины $h_{ном}$, составила 93–96 % (в среднем 95 %) от общей длины рулона.

На основании этих результатов принято решение внедрить разработанные с участием автора технологические решения в производство на ЧерМК ОАО «Северсталь».

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Выполнено совершенствование методики расчёта энергосиловых и технологических параметров процесса горячей прокатки тонких полос на широкополосных станах, основанное на упругопластической модели очага деформации, с целью моделирования и уменьшения их продольной разнотолщинности.

Результаты проведенной работы заключаются в следующем:

1. Проанализирована базовая методика расчёта энергосиловых и технологических параметров широкополосных станов горячей прокатки, основанная на упругопластической модели очага деформации. Анализ показал, что она обладает следующими недостатками, которые снижают точность результатов расчётов:

- методика расчета длины очага деформации разработана без учёта влияния температуры горячекатаных полос и материалов рабочих валков на их упругие свойства.;

- не в полной мере учитывалось фактическое содержание химических элементов в сталях, из которых изготовлены горячекатаные полосы, на их сопротивление пластической деформации, что особенно актуально для полос из новых марок стали.

2. Из проведенного литературного обзора выявились существенные недостатки известных математических моделей взаимосвязи продольной разнотолщинности горячекатаных полос с факторами технологического процесса ШПСГП. Наиболее существенные из них состоят в следующем:

- большинство математических моделей продольной разнотолщинности горячекатаных тонких полос разработано без учёта напряженного состояния полосы в упругих участках очага деформации, что снижает точность результатов расчета;

- ни для одной из моделей не предусмотрен алгоритм оптимизации режима горячей прокатки по критерию «минимум продольной разнотолщинности»;

- отсутствовала достоверная математическая модель формирования продольной разнотолщинности горячекатаных полос в функции основных возмущающих факторов технологии и управляющих воздействий. Известные методики определяют зависимости продольной разнотолщинности лишь от некоторых факторов, в частности, от управляющих воздействий систем автоматического регулирования толщины и натяжений.

3. Методика расчёта энергосиловых параметров процесса горячей прокатки тонких стальных полос, основанная на упругопластической модели очага деформации, дополнена учётом влияния температуры полосы на модуль упругости её материала и влиянием фактического химического состава материала полосы и рабочих валков на их пластические и упругие характеристики (модуль упругости, коэффициент Пуассона и сопротивление пластической деформации). Благодаря указанным дополнениям, установлено:

- при прокатке полос толщиной 0,8-1,2 мм в последних клетях широкополосного стана длина упругих участков очага деформации может достигать 32-40 % от общей длины очага деформации, в то время как без учёта влияния температуры полосы расчётная доля длины упругих участков не превышала – 17-21 %;

- погрешность энергосилового расчёта ШПСГП снижается более чем в 3 раза, если учитывать влияние температуры и фактического химического состава материала полосы и рабочих валков на их пластические и упругие характеристики;

- сопоставительный анализ подтвердил преимущество усовершенствованной методики энергосилового расчета процесса горячей прокатки и целесообразность её использования в конструкторской и технологической практике современного листопрокатного производства.

4. Разработана математическая модель продольной разнотолщинности полосы, основанная на усовершенствованной методике расчёта энергосиловых параметров процесса горячей прокатки. С

использованием статистических методов показано, что средняя погрешность расчета по модели продольной разнотолщинности не превышает 8 %. Статистический анализ подтвердил достоверность расчёта по модели и целесообразность её использования для совершенствования технологических режимов горячей прокатки по критерию «минимум продольной разнотолщинности».

5. На основе математической модели продольной разнотолщинности разработан и реализован алгоритм оптимизации технологических режимов горячей прокатки по критерию «минимум продольной разнотолщинности». В ходе промышленных испытаний технологических режимов горячей прокатки на ШПСГП «2000» полученных с применением алгоритма оптимизации, средняя продольная разнотолщинность полос уменьшилась почти в 2 раза, что подтверждено статистически – среднее расхождение расчётных и измеренных значений разнотолщинности после оптимизации не превысило 6 %.

6. Разработаны и успешно испытаны в чистовой группе ШПСГП «2000» ЧерМК ОАО «Северсталь» оптимизированные технологические режимы обжатий и удельных межклетевых натяжений. Внедрение технологии горячей прокатки с описанными выше изменениями, позволяет получать горячекатаные полосы с колебаниями толщины по всей площади, не превышающими $\pm 2\%$ от номинальной толщины, что, даёт возможность производить из них холоднокатаные полосы с допусками по толщине, соответствующими жёстким требованиям ведущих мировых автопроизводителей.

Основное содержание диссертации опубликовано следующих в работах

Публикации в научных журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. Гарбер, Э.А. Влияние химического состава и упругих свойств полосы и валков на энергосиловые параметры широкополосных станов горячей прокатки / Э.А. Гарбер, И.Д. Поспелов, И.А. Кожевникова // Производство проката. – 2011. – № 8. – С. 2–7.

2. Гарбер, Э.А. Энергосиловой 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. – С. 9–13.

3. Гарбер, Э.А. Оптимизация режима горячей прокатки стальных полос на широкополосном стане по критерию «минимум продольной разнотолщинности» / Э.А. Гарбер, И.Д. Поспелов, А.Ф. Савиных, Н.Ю. Николаев, П.А. Мишнев // Производство проката. – 2012. – № 5. – С. 15–21.

4. Гарбер, Э.А. Промышленная технология производства холоднокатаных автомобильных листов с разнотолщинностью по всей площади, не превышающей $\pm 2\%$ / Э.А. Гарбер, М.А. Тимофеева, И.Д.

Поспелов, С.И. Павлов, П.А. Мишнев, И.А. Дятлов // Производство проката. – 2012. – № 6. – С. 10–14.

5. Гарбер, Э.А. Моделирование продольной разнотолщинности горячекатаных стальных полос в непрерывной группе клеток широкополосного стана / Гарбер Э.А., Поспелов И.Д., Трайно А.И., Савиных А.Ф., Николаев Н.Ю., Мишнёв П.А. // Металлы. – 2012. – № 4. – С. 47–53.

Публикации в трудах научно-технических семинаров и конференций

6. Гарбер, Э.А. Инновационная технология производства холоднокатаных высокоточных автомобильных листов / Э.А. Гарбер, М.А. Тимофеева, И.Д. Поспелов, С.И. Павлов, П.А. Мишнев, И.А. Дятлов // Научно-технический прогресс в металлургии. Материалы Всероссийского научного семинара. Череповец. ЧГУ. 2012. С.125-136.

7. Гарбер, Э.А. Моделирование и уменьшение продольной разнотолщинности широких полос при горячей прокатке в непрерывной группе клеток / Э.А. Гарбер, И.Д. Поспелов, А.Ф. Савиных, Н.Ю. Николаев, П.А. Мишнев // Научно-технический прогресс в металлургии. Материалы Всероссийского научного семинара. Череповец. ЧГУ. 2012. С.125-136.

8. Гарбер, Э.А. Развитие теории листовой прокатки для повышения качества тонких стальных полос и энергоэффективного их производства / Гарбер Э.А., Кожевникова И.А., Шалаевский Д.Л., Тимофеева М.А., Поспелов И.Д. // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надёжность машин, приборов и оборудования. Материалы международной научно-технической конференции. Вологда. ВГТУ. 2012. С.8-10.

9. Гарбер Э. А., Кожевникова И. А., Тимофеева М. А., Шалаевский Д. Л., Поспелов И. Д., Ягудин И. В. Новые решения в теории и технологии тонколистовой прокатки // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов / Донбасская государственная машиностроительная академия. – Краматорск: ДГМА, 2012. – 320 с.