

**ПОСПЕЛОВ Иван Дмитриевич**

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

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

**Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки и техники РФ  
**Гарбер Э.А.**

**Череповец – 2014**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	4
<b>Глава 1. Литературно-аналитический обзор известных методов энергосилового расчета ШПСГП, математических моделей продольной разнотолщинности горячекатаных полос и алгоритмов оптимизации технологических режимов горячей прокатки.....</b>	11
<b>1.1.</b> Анализ теоретических методов определения длины очага деформации и усилий горячей прокатки .....	11
<b>1.2.</b> Анализ моделей сопротивления пластической деформации .....	17
<b>1.3.</b> Анализ известных моделей продольной разнотолщинности и способов её снижения .....	19
<b>Выводы по главе 1</b> .....	25
<b>Глава 2. Совершенствование методики энергосилового расчёта ШПСГП</b> .....	27
<b>2.1.</b> Определение упругих характеристик материалов полосы и рабочих валков с учётом особенностей горячей прокатки .....	27
<b>2.2.</b> Определение сопротивления деформации с учётом фактического содержания в стали химических элементов .....	30
<b>2.3.</b> Сопоставительный анализ точности усовершенствованной и базовой методик расчёта энергосиловых параметров ШПСГП .....	32
<b>Выводы по главе 2</b> .....	37
<b>Глава 3. Моделирование процесса образования продольной разнотолщинности стальных полос на ШПСГП</b> .....	39
<b>3.1.</b> Математическое моделирование процесса образования продольной разнотолщинности широких полос при горячей прокатке .....	39
<b>3.2.</b> Анализ точности новой математической модели продольной разнотолщинности при горячей прокатке в непрерывной группе клетей ШПСГП .....	45
<b>Выводы по главе 3</b> .....	49

<b>Глава 4. Разработка и промышленное опробование на широкополосном стане методики компьютерной оптимизации режимов горячей прокатки стальных полос по критерию «минимум продольной разнотолщинности»</b> .....	50
<b>4.1. Разработка методики оптимизации режимов горячей прокатки по критерию «минимум продольной разнотолщинности»</b> .....	50
<b>4.2. Промышленная реализация методики компьютерной оптимизации режимов горячей прокатки по критерию «минимум продольной разнотолщинности»</b> .....	52
<b>4.3. Анализ точности методики компьютерной оптимизации режима прокатки полос на ШПСГП.</b> .....	57
<b>Выводы по главе 4</b> .....	60
<b>Глава 5. Промышленные испытания оптимизированных режимов горячей прокатки полос в чистовой группе ШПСГП «2000»</b> .....	61
<b>5.1. Общая характеристика ШПСГП «2000»</b> .....	61
<b>5.2. Анализ взаимосвязи требований к точности холоднокатаных автомобильных листов и горячекатаных полос, используемых в качестве подката для их холодной прокатки</b> .....	64
<b>5.3. Промышленная реализация установленных требований к горячекатаным полосам</b> .....	66
<b>Вывод по главе 5</b> .....	69
<b>Заключение (общие выводы по диссертации)</b> .....	70
<b>Литература</b> .....	73
<b>Приложения.</b> .....	77

## ВВЕДЕНИЕ

### **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 клеток:

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 ( $\nu_B$ ) рабочих валков от их материала, хотя в рабочих клетях ШПСГП применяют валки разных марок чугуна и стали, у которых диапазон величин  $\nu_B$  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 клетей, 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 уменьшения модуля упругости полос под влиянием её 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 клеток ШПСГП под воздействием разнотолщинности подката, величин межклетевых натяжений и распределения между клетями суммарного обжатия.

5. Разработана методика компьютерной оптимизации технологического режима непрерывной группы клеток 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.

#### **Аннотация диссертационной работы по главам.**

В *первой главе* изложен литературно-аналитический обзор известных методов энергосилового расчета ШПСГП, моделей формирования продольной разнотолщинности горячекатаных полос и алгоритмов оптимизации технологических режимов горячей прокатки.

Установлены факторы, снижающие точность расчёта энергосиловых параметров ШПСГП, и недостатки технологии, не позволяющие уменьшить

продольную разнотолщинность горячекатаных полос до уровня, соответствующего современным требованиям

Во *второй главе* изложены и обоснованы усовершенствования, внесённые в методику энергосилового расчёта ШПСГП, основанную на упругопластической модели очага деформации. Показано, что учёт влияния температуры полосы на модуль упругости её материала и определение упругих свойств рабочих валков с учётом их фактического химического состава обеспечивают снижение средней погрешности расчёта сил прокатки более чем в 3 раза.

В *третьей главе* изложена математическая модель формирования продольной разнотолщинности горячекатаных полос в непрерывной группе клетей ШПСГП в зависимости от разнотолщинности подката и распределения между клетями суммарного обжатия. Представлены результаты компьютерной реализации этой модели на реальном сортаменте ШПСГП.

В *четвертой главе* изложен алгоритм оптимизации технологического режима горячей прокатки тонких полос в чистовой группе ШПСГП по критерию «минимум продольной разнотолщинности», разработанный на основе модели формирования продольной разнотолщинности, изложенной в третьей главе.

В *пятой главе* представлены результаты использования теоретических разработок для совершенствования технологии производства горячекатаных широких полос на действующем стане, обеспечивающие уменьшение их продольной разнотолщинности более чем в 2 раза.

**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») и 1 статья в международном журнале «Russian Metallurgy».

Работа выполнялась в ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет» в период с 2010 г. по 2013 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 89 страниц машинописного текста, 16 рисунков, 18 таблиц и 5 приложений.

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

## **1.1 Анализ теоретических методов определения длины очага деформации и усилий горячей прокатки**

При горячей прокатке тонких полос в чистовых группах широкополосных станов в очагах деформации рабочих клетей возникают большие контактные нормальные напряжения (800-1100 МПа), величина которых соизмерима с контактными нормальными напряжениями в очагах деформации станов холодной прокатки [1-3]. Вследствие этого существенное влияние на энергосиловые параметры процесса горячей прокатки тонких полос оказывают упругие деформации в контакте полосы и валков. Поэтому, как и при холодной прокатке, расчёт энергосиловых параметров широкополосных станов горячей прокатки, обеспечивающий минимальное расхождение расчётных и измеренных значений сил прокатки и мощности двигателей главного привода, следует выполнять на основе упругопластической модели напряжённо-деформированного состояния полосы в очаге деформации, по методике, разработанной и обоснованной в работах научной школы учёных-прокатчиков Череповецкого государственного университета [1-7]. В них показано, что по сравнению с расчётами по наиболее распространённым ранее методикам применение упругопластической модели позволяет уменьшить погрешность определения сил прокатки в 4-6 раз, сократив их до 4-11 %, а погрешности определения мощности прокатки – в 6-20 раз, сократив их до 5-13 %.

В последние десятилетия потребители тонких широких стальных листов ужесточили требования к точности их размеров. В настоящее время, согласно мировому уровню требований, колебания толщины таких листов по всей их

площади не должны превышать 2-2,2 % от номинальной толщины. На многих отечественных листовых станах колебания толщины листов составляют 3-7 % от номинальных значений, поэтому перед технологами-прокатчиками встала задача совершенствования методов настройки станов, повышения их точности, что, в свою очередь, требует от разработчиков технологических режимов дальнейшего уменьшения погрешности расчёта энергосиловых параметров процесса прокатки.

Эта задача определила одно из главных направлений наших исследований. Естественно, для её решения мы взяли в качестве базовой наиболее точную на момент начала нашей работы методику энергосилового расчёта широкополосных станов – упомянутую выше методику, основанную на упругопластической модели напряжённого состояния полосы в очаге деформации.

Необходимо было её проанализировать, выявить её недостатки, найти резервы дальнейшего сокращения погрешностей энергосилового расчёта.

Колебания толщины полосы при прокатке, как известно [8], можно выразить формулой:

$$\Delta h_i = \frac{\Delta P_i}{M_{\text{кл}}}, \quad (1.1)$$

где  $\Delta h_i$  – колебания толщины на выходе из  $i$ -й рабочей клетки, мм;

$\Delta P_i$  – колебания силы прокатки в этой клетке, вызванные нестабильными факторами технологического режима, МН;

$M_{\text{кл}}$  – модуль жесткости рабочей клетки, МН/мм.

Как видно из выражения (1.1), для уменьшения разнотолщинности полосы необходимо обеспечить уменьшение колебаний силы прокатки, зависящих от значительного количества дестабилизирующих факторов (неравномерность нагрева слябов перед прокаткой, разнотолщинность подката, нестабильность температурного режима валков и полосы во время прокатки и др.). Поэтому в первую очередь мы анализировали базовую методику расчёта силы прокатки.

Расчётная схема упругопластического очага деформации при горячей прокатке, принятая в методике [1-7], показана на рис. 1.1.

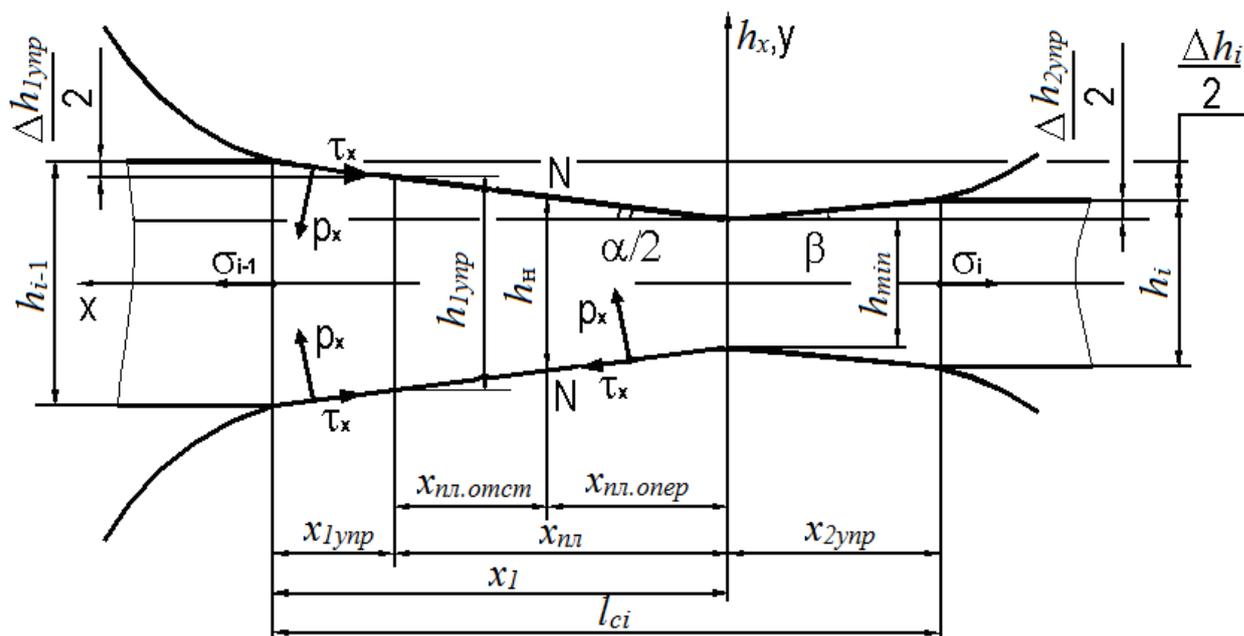


Рис. 1.1. Расчётная схема очага деформации  $i$ -ой рабочей клетки широкополосного стана горячей прокатки:

$h_{i-1}$ ,  $h_i$  – толщина прокатываемой полосы на входе и выходе из очага деформации соответственно;  $x_{1упр}$ ,  $x_{пл}$ ,  $x_{2упр}$  – длины участков очага деформации, соответственно: 1<sup>го</sup> упругого сжатия полосы, пластической деформации, 2<sup>го</sup> упругого восстановления части толщины полосы на выходе из очага деформации;  $x_{пл.отст}$ ,  $x_{пл.опер}$  – длины зон отставания и опережения пластического участка очага деформации соответственно;  $l_{ci}$  – 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  $x_{1упр}$ ;  $h_n$  – толщина полосы в нейтральном сечении;  $\Delta h_{1упр}$ ,  $\Delta h_{2упр}$  – максимальные величины абсолютных упругих деформаций полосы по толщине на участках  $x_{1упр}$  и  $x_{2упр}$ ;  $h_{min}$  – минимальная толщина полосы при её прохождении через вертикальную осевую плоскость рабочих валков;  $\Delta h_i$  – абсолютная величина упругопластической деформации полосы на всей длине очага деформации  $l_{ci}$ ;  $p_x$ ,  $\tau_x$  – нормальные контактные и касательные

напряжения в рассматриваемом сечении толщиной  $h_x$ ;  $\sigma_{i-1}$ ,  $\sigma_i$  – удельные натяжения полосы (заднее и переднее); N–N – нейтральное сечение.

Она аналогична классической схеме А.И. Целикова [9-11], но отличается тем, что расчёт нормальных контактных напряжений и их средних значений выполняется сначала отдельно на каждом упругом и пластическом участке очага деформации, причём на упругих участках, вместо условия пластичности, используется уравнение упругости, предложенное авторами базовой методики, а затем по средним значениям на участках вычисляют среднее значение  $p_{cpi}$  для всего очага деформации  $i$ -й рабочей клетки. Именно это отличие и обеспечило базовой методике возможность существенно снизить погрешность вычисления силы прокатки по формуле:

$$P_i = p_{cpi} \cdot l_{ci} \cdot b, \quad (1.2)$$

где  $l_{ci}$  – длина очага деформации, которая, согласно схеме рис. 1.1, равна:

$$l_{ci} = x_{1упр} + x_{нл.отст} + x_{нл.опер} + x_{2упр}. \quad (1.3)$$

$b$  – ширина полосы, средняя для очага деформации (при прокатке тонких широких полос уширение незначительно и обычно принимают  $b = const$ ).

Из формулы (1.2) видно, что точность определения силы прокатки зависит от погрешности вычисления  $p_{cpi}$  и  $l_{ci}$ .

Выражения, использованные в базовой методике для расчёта величины  $p_{cpi}$ , приведены в таблицах 1.1 и 1.2. Как видно из этих таблиц, контактные напряжения на упругих участках пропорциональны модулю упругости материала полосы  $E_{II}$ , а на пластических участках – они пропорциональны среднему значению сопротивления пластической деформации  $\sigma_{ф.пл.}$

Точность расчёта по формуле (1.3) длины очага деформации зависит в значительной степени от погрешности вычисления длины второго упругого участка  $x_{2упр}$ . В базовой методике, как и в методике А.И. Целикова, для этого используется известная из теории упругости классическая формула Герца:

$$x_{2упр} = 8p_{cpi} R \left( \frac{1-\nu_B^2}{\pi E_B} + \frac{1-\nu_{II}^2}{\pi E_{II}} \right), \quad (1.4)$$

где  $R$  – радиус бочки рабочего валка;

$\nu_B, E_B$  – коэффициент Пуассона и модуль упругости материала рабочих валков;

$\nu_{II}, E_{II}$  – коэффициент Пуассона и модуль упругости материала полосы.

Таблица 1.1

Основные выражения, используемые в методике [7] для расчёта контактных напряжений на упругих участках очага деформации

Участок упругого сжатия длиной $x_{1упр}$	Участок упругого восстановления длиной $x_{2упр}$
<b>1. Дифференциальные уравнения равновесия</b>	
$d\sigma_x - (p_x - \sigma_x) \frac{dh_x}{h_x} + \frac{\mu p_x}{tg\alpha/2} \frac{dh_x}{h_x} = 0,$ <p>где <math>tg(\alpha/2) = \frac{\Delta h_i + \Delta h_{2упр}}{2x_1}</math></p>	$d\sigma_x - (p_x - \sigma_x) \frac{dh_x}{h_x} + \frac{\mu p_x}{tg\beta} \frac{dh_x}{h_x} = 0,$ <p>где <math>tg\beta = \frac{\Delta h_{2упр}}{2x_2}</math></p>
<b>2. Уравнение упругости</b>	
$p_x - \sigma_x = 1,15E_{II} \frac{h_x - h_{i-1}}{h_{i-1}}$	$p_x - \sigma_x = 1,15E_{II} \frac{h_x - h_i}{h_i}$
<b>3. Закон трения скольжения</b>	
$\tau_x = \mu_i p_x$	
<b>4. Формулы <math>p_x(h_x)</math></b>	
$p_x = 1,15E_{II} \left\{ \frac{1}{\delta_{i-1}} - \frac{2}{\delta_{i-1} + 1} \left( \frac{h_x}{h_{i-1}} \right) + \left( \frac{h_{i-1}}{h_x} \right)^{\delta_{i-1}} \left[ \frac{\delta_{i-1} - 1}{(\delta_{i-1} + 1)\delta_{i-1}} - \frac{\sigma_{i-1}}{1,15E_{II}} \right] \right\},$ <p>где <math>\delta_{i-1} = \frac{\mu_i}{tg(\alpha/2)}</math></p>	$p_x = 1,15E_{II} \left\{ \frac{1}{\delta_i} - \frac{2}{\delta_i + 1} \left( \frac{h_x}{h_i} \right) + \left( \frac{h_i}{h_x} \right)^{\delta_i} \left[ \frac{\delta_i - 1}{(\delta_i + 1)\delta_i} - \frac{\sigma_i}{1,15E_{II}} \right] \right\},$ <p>где <math>\delta_i = \frac{\mu_i}{tg\beta}</math></p>

Примечание:  $E_{II}$  – модуль упругости полосы;  $\mu_i$  – коэффициент трения между полосой и валками в очаге деформации.

Основные выражения, используемые в методике [7] для расчёта контактных напряжений на пластических участках очага деформации

1. Дифференциальное уравнение равновесия	$d\sigma_x - (p_x - \sigma_x) \frac{dh_x}{h_x} + \frac{\tau_x}{\operatorname{tg} \alpha / 2} \frac{dh_x}{h_x} = 0$
2. Уравнение пластичности	$p_x - \sigma_x = 1,15\sigma_{\phi, \text{пл}}$
3. Закон трения	$\tau_x = \tau_s \left( \frac{h_x - h_H}{h_{1\text{упр}} - h_H} \right)$
4. Формула $p_x(h_x)$	$p_x = 1,15\sigma_{\phi, \text{пл}} \left[ \frac{0,5}{\operatorname{tg} \alpha / 2} \frac{(h_{1\text{упр}} - h_x)}{(h_{1\text{упр}} - h_H)} + \left( 1 + \frac{0,5}{\operatorname{tg} \alpha / 2} \frac{h_H}{(h_{1\text{упр}} - h_H)} \right) + (\ln h_x - \ln h_{1\text{упр}}) + \frac{p_{1\text{упр}}}{1,15\sigma_{\phi, \text{пл}}} \right]$

Примечание:  $\tau_s \approx 0,57 \cdot \sigma_{\phi, \text{пл}}$  – сопротивление чистому сдвигу материала полосы;  $p_{1\text{упр}}$  – значение нормального контактного напряжения, рассчитанное по уравнению  $p_x(h_x)$  для первого упругого участка в сечении, где  $h_x = h_{1\text{упр}}$ .

Из формул (1.2)–(1.4) видно, что на точность определения силы прокатки погрешность расчёта величины  $p_{\text{ср}i}$  влияет не только непосредственно, но и опосредствовано – через погрешность вычисления длины очага деформации и её упругого участка, также зависящих от  $p_{\text{ср}i}$ . Кроме того, из формулы (1.4) видно, что точность вычисления длины  $x_{2\text{упр}}$  зависит от достоверности данных об упругих характеристиках материалов рабочих валков и полосы  $\nu_B, E_B, \nu_{\text{II}}, E_{\text{II}}$ .

Анализ влияния указанных факторов на точность энергосилового расчёта широкополосных станов авторы базовой методики [7] не проводили. В частности, не учитывался тот факт, что температура полосы существенно влияет на упругие характеристики её материала – величины  $\nu_{\text{II}}$  и  $E_{\text{II}}$ . Они принимались постоянными, без учёта того обстоятельства, что величина модуля упругости стали в диапазоне температур горячей прокатки не постоянна:  $E_{\text{II}} = (1,0-1,2) \cdot 10^5$  МПа [12].

Модуль упругости материала валков также не является постоянной величиной: если его значение для стали составляет  $2,15 \cdot 10^5$  МПа, то для

чугунных валков, в зависимости от состава чугуна  $E_B = (1,68-2,05) \cdot 10^5$  МПа [13, 14]. Существенно зависит от материала валков и коэффициент Пуассона. Так, по данным [13, 14], для валков из быстрорежущей инструментальной стали  $\nu_B = 0,35$ ; а для чугунных валков, в зависимости от марки чугуна  $\nu_B = 0,27-0,29$ .

Таким образом, анализ влияния на энергосиловые параметры процесса горячей прокатки тонких стальных полос достоверности выбора значений упругих характеристик материалов полосы и валков, учёт этого влияния – один из не использованных резервов повышения точности энергосилового расчёта широкополосных станов.

## 1.2 Анализ моделей сопротивления пластической деформации

Погрешности энергосиловых расчётов широкополосных станов горячей прокатки зависят не только от правильного учёта упругих характеристик полосы и валков, но и от достоверности используемых значений сопротивления деформации прокатываемых полос.

Сопротивление деформации при горячей прокатке зависит от химического состава материала полосы, деформационных, температурных и скоростных параметров процесса. Как правило, в формулы расчёта контактных напряжений сопротивление деформации входит прямым множителем, поэтому точность его определения непосредственно влияет на погрешность расчёта энергосиловых параметров.

Значение сопротивления деформации при горячей прокатке, в зависимости от различных значений температуры, скорости и степени деформации, В.И. Зюзиным предложено определять по зависимости [15; 16]:

$$\sigma_{\phi} = \sigma_{o.d.} k_t k_{\varepsilon} k_u, \quad (1.5)$$

где  $\sigma_{o.d.}$  – базисное сопротивление деформации, определенное при следующих параметрах: температура  $t = 1000$  °С, относительное обжатие  $\varepsilon = 10$  %, скорость деформации  $u = 10$  с<sup>-1</sup>;

$k_t$ ,  $k_\varepsilon$ ,  $k_u$  – коэффициенты, учитывающие влияние температуры, степени и скорости деформации соответственно.

В работах [15; 17] уравнение (1.5) представлено в виде:

$$\sigma_\phi = A_1 A_2 A_3 e^{-m_1 t} \varepsilon^{m_2} u^{m_3} \sigma_{o.d.}, \quad (1.6)$$

где  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  – постоянные коэффициенты, зависящие от материала полосы.

Основной недостаток формулы (1.6) – это узкий круг исследованных марок стали: отсутствуют данные для ряда углеродистых (кипящих, полуспокойных и спокойных), конструкционных и низколегированных марок стали. Еще один недостаток – ограничение скорости деформации величиной  $100 \text{ с}^{-1}$  (на современных станах горячей прокатки она значительно выше).

Обширные исследования сопротивления деформации металла проведены Л.В. Андреюком с соавторами [15, 18, 19].

Для определения истинного сопротивления деформации ими предложена зависимость:

$$\sigma_{\phi.n.l} = S \sigma_{o.d} u_i^a (10 \cdot \varepsilon_{\Sigma i})^b \left( \frac{t_i}{1000} \right)^c, \quad (1.7)$$

где  $S$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – постоянные числа, определяемые для каждой марки стали по результатам испытаний на пластометре;

$u_i$  – скорость деформации в  $i$ -й клетке;

$\varepsilon_{\Sigma i}$  – суммарное относительное обжатие за  $i$  проходов;

$t_i$  – температура полосы на выходе из  $i$ -й клетки.

В работах Л.В. Андреюка приводятся зависимости параметров  $S$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  от содержания химических элементов в стали, что является их преимуществом, т.к. сталь одной и той же марки может иметь разное содержание химических элементов. Кроме того, в последние десятилетия появились новые марки сталей, для которых справочные значения  $\sigma_{\phi.n.l}$  отсутствуют.

---

Диапазон действия зависимости (1.7) составляет:  $t=800-1300$  °С,  $\varepsilon = 5-55$  %,  $u=0,01-150$  с<sup>-1</sup>, экспериментальные данные получены для широкого диапазона марок сталей и сплавов. По данным авторов формулы (1.7), возможная ошибка определения значений сопротивления деформации с использованием этой формулы составляет 4 %. Учитывая это, при разработке усовершенствованной модели процесса горячей прокатки, изложенной в гл. 2, в основу определения сопротивления деформации была взята формула Л.В. Андреюка.

Существенный недостаток справочных данных авторов [15-19] заключается в том, что при испытаниях большинства марок сталей химический состав и процент содержания легирующих элементов были регламентированы стандартами 60<sup>х</sup> – 80<sup>х</sup> годов XX века (ГОСТ 380–60, ГОСТ 1050–88) по верхнему пределу. В условиях современного производства, в целях экономии, отечественные металлурги стремятся минимизировать процентное содержание легирующих элементов, помимо этого отсутствуют справочные данные для зарубежных стандартов (EN10025–93, EN 10130–98, ASTM A366/A366M–91).

Таким образом, уточнение значений сопротивления деформации сталей в процессе горячей прокатки, с учётом фактического их химического состава – ещё один резерв повышения точности энергосилового расчёта широкополосных станов.

### 1.3 Анализ известных моделей продольной разнотолщинности и способов её снижения

---

Согласно уравнению (1.1), одним из существенных факторов, влияющих на продольную разнотолщинность полос, является нестабильность усилия прокатки  $\Delta P_i$ . В связи с этим продольную разнотолщинность полосы, при постоянном исходном зазоре между рабочими валками, авторы ряда работ [8, 20, 21] представляют в виде дифференциального уравнения:

---

$$dh_1 = S_0 + \frac{dP_i}{M_{кл}}, \quad (1.8)$$

Для решения уравнения (1.8) необходимо найти величину  $dP$ , которая является функцией следующих величин:

$$P_i = f(h_0, h_1, R_p, b, \sigma_{ф.пл}, \mu, T_0, T_1), \quad (1.9)$$

где  $h_0, h_1$  – толщина полосы на входе в рабочую клетку и на выходе из неё;  $R_p$  – радиус бочки рабочего валка;  $b$  – ширина полосы;  $\sigma_{ф.пл}$  – значение сопротивления пластической деформации;  $\mu$  – коэффициент трения в очаге деформации;  $T_0, T_1$  – силы заднего и переднего натяжений.

Полный дифференциал уравнения (1.9) равен

$$dP = \frac{\partial P}{\partial h_0} dh_0 + \frac{\partial P}{\partial h_1} dh_1 + \frac{\partial P}{\partial R_p} dR_p + \frac{\partial P}{\partial b} db + \frac{\partial P}{\partial \sigma_{ф.пл}} d\sigma_{ф.пл} + \frac{\partial P}{\partial \mu} d\mu + \frac{\partial P}{\partial T_0} dT_0 + \frac{\partial P}{\partial T_1} dT_1. \quad (1.10)$$

Методы определения численных значений частных производных уравнения (1.10) и построение алгоритмов управления, настройки, стабилизации и контроля процесса прокатки на тонколистовых станах представлено в работах [8; 22-24], однако материал данных работ ориентирован преимущественно на разработку и моделирование систем автоматизации листовых станов. Другой существенный недостаток данных работ – использование для расчёта усилий горячей прокатки классических методик [9-11], которые разработаны без учёта напряжённого состояния прокатываемой полосы в упругих участках очага деформации, поэтому их применение для моделирования продольной разнотолщинности и энергосилового расчёта процесса горячей прокатки полос толщиной 0,8-3,5 мм не даст необходимой точности.

Наиболее перспективным способом моделирования продольной разнотолщинности может служить анализ графической интерпретации совместного решения уравнения упругой деформации клетки и зависимости усилия прокатки от толщины полосы (рис. 1.2), представленный в работе [25].

На схеме рис. 1.2 по вертикальной оси отложены усилия прокатки в  $i$ -й клетки стана горячей прокатки, а по горизонтальной – зазор между рабочими валками  $S_i$  и толщина прокатываемой полосы, изменяющаяся от  $h_{i-1}$  до  $h_i$ . Прямая 1 графически изображает уравнение упругой деформации клетки (изменение усилия прокатки  $P_i$  в функции зазора  $S_i$ ):

$$P_i = M_{\text{кл}}(S_i - S_0), \quad (1.11)$$

где  $S_0$  – предварительно установленный зазор (если  $S_0 < 0$ , валки предварительно сжаты, то есть находятся в «забое», что характерно для прокатки тонких полос, в этом случае абсолютные величины  $S_i$  и  $S_0$  в выражении (1.9) суммируются);

$M_{\text{кл}}$  – модуль жесткости рабочей клетки, МН/мм (усилие, необходимое для изменения зазора  $S_i$  на 1 мм); он численно равен тангенсу угла  $\varphi$  наклона прямой 1.

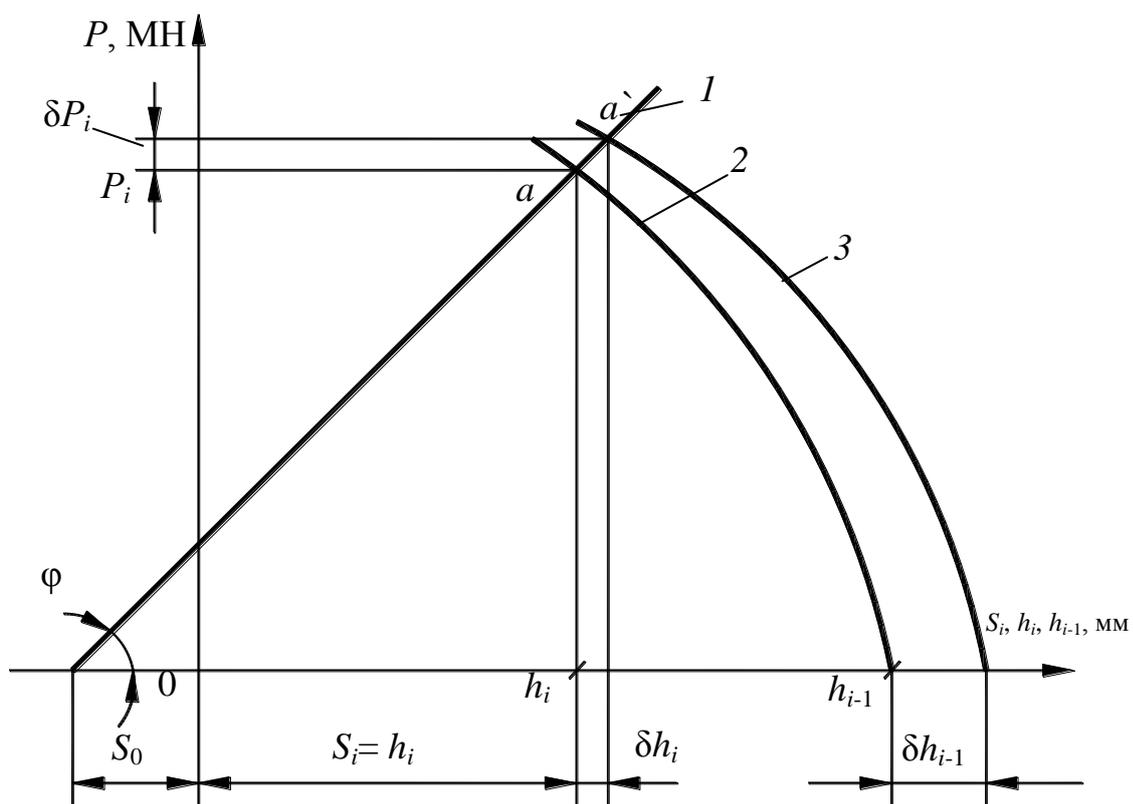


Рис. 1.2. Графическое решение уравнений упругой деформации  $i$ -й рабочей клетки и функциональной зависимости усилия прокатки от толщины полосы

Линия 2 графически изображает функциональную зависимость усилия прокатки от толщины выходящей из клетки полосы  $h_i$ , если толщина на входе в клетку равна  $h_{i-1}$ :

$$P_i = P_i(h_{i-1}; h_i) \quad (1.12)$$

Функция  $P_i(h_{i-1}; h_i)$  может быть получена расчетным путем с помощью модели энергосиловых параметров стана горячей прокатки [1-7], согласно которой, усилие прокатки, помимо обжатия (разности  $h_{i-1} - h_i$ ), увеличивается с ростом среднего сопротивления деформации в клетке  $\sigma_{\phi i}$ , коэффициента трения в очаге деформации  $\mu_i$ , скорости деформации и уменьшается с ростом температуры полосы (из-за уменьшения величины  $\sigma_{\phi i}$ ), а также ее натяжения.

Совместное решение уравнений (1.11) и (1.12) графически выражено точкой  $a$  пересечения линий 1 и 2, определяющей усилие прокатки  $P_i$  при заданной толщине выходящей полосы  $h_i$ . Если в процессе прокатки возникло отклонение  $\delta h_{i-1}$  от заданной толщины подката  $h_{i-1}$ , то для подката толщиной  $(h_{i-1} + \delta h_{i-1})$  зависимость (1.12) усилия прокатки от толщины полосы графически выражается кривой 3, а точка  $a'$  пересечения кривой 3 с прямой 1 даст новые значения толщины полосы на выходе из клетки  $(h_i + \delta h_i)$  и усилия прокатки  $(P_i + \delta P_i)$ , а также величины колебаний этих параметров  $\delta h_i$  и  $\delta P_i$ , зависящие от колебаний толщины подката  $\delta h_{i-1}$ .

При этом относительная продольная разнотолщинность подката при правильной настройке стана сохранится:

$$\frac{\delta h_{i-1}}{h_{i-1}} = \frac{\delta h_i}{h_i},$$

а абсолютное ее значение уменьшится пропорционально коэффициенту обжатия:

$$\delta h_i = \delta h_{i-1} \cdot \eta, \text{ где } \eta = \frac{h_i}{h_{i-1}}.$$

На рис. 1.3 графически сопоставлены величины продольных разнотолщинностей полосы на выходе из 4<sup>ой</sup> клетки ШПСГП «1700» ЧерМК ОАО «Северсталь» при рабочем и усовершенствованном режимах на примере прокатки полосы из стали  $S235JR$  шириной 1000 мм толщиной 1,2 мм [25]. В рабочем режиме толщина полосы на входе в 4<sup>ю</sup> клетку  $h_{3p}=3,28$  мм, а на выходе  $h_{4p}=2,05$  мм, коэффициент обжатия  $\eta_{4p}=0,625$ . Считая, что максимальное

значение продольной разнотолщинности составляет 8 % от толщины полосы, ее значение на входе в 4<sup>ю</sup> клеть  $\delta h_{3p} = 0,08 \cdot 3,28 = 0,26$  мм, а на выходе  $\delta h_{4p} = \delta h_{3p} \cdot \eta_{4p} = 0,164$  мм.

В усовершенствованном режиме полоса после третьей клетки имеет толщину меньшую, чем в рабочем режиме:  $h_{3y} = 2,6$  мм,  $\frac{h_{3y}}{h_{3p}} = 0,79$ .

Следовательно, на входе в 4<sup>ю</sup> клеть продольная разнотолщинность составит:  $\delta h_{3y} = \delta h_{3p} \cdot 0,79 = 0,205$  мм.

Толщина полосы на выходе из 4<sup>й</sup> клетки при усовершенствованном режиме равна  $h_{4y} = 1,74$  мм, коэффициент обжатия  $\eta_{4y} = 0,67$ . Следовательно, продольная разнотолщинность на выходе из 4<sup>й</sup> клетки будет равна  $\delta h_{4y} = \delta h_{3y} \cdot \eta_{4y} = 0,13$  мм, то есть по сравнению с рабочим режимом, она уменьшилась на 21 %. Соответственно уменьшились и колебания усилия прокатки. Заштрихованные на рис. 1.3 области колебаний толщины и усилия прокатки наглядно демонстрируют преимущество уменьшения обжатий в последних клетях за счет увеличения их в первых клетях чистой группы стана горячей прокатки, реализованное в усовершенствованном режиме.

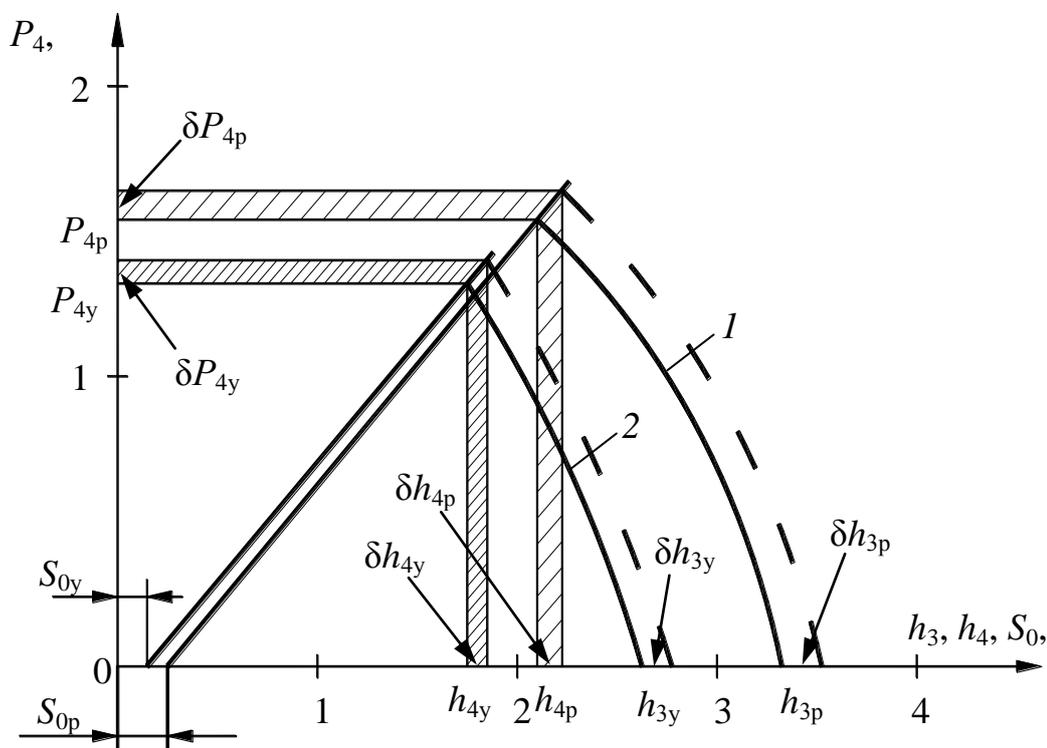


Рис. 1.3 Сопоставление продольных разнотолщинностей полосы на выходе из 4<sup>й</sup> клетки ШПСГП «1700» при обычной технологии («р» – рабочий режим) и при усовершенствованном режиме обжатий («у»)

Авторы работы [25] отмечают, что процесс уменьшения колебаний толщины полосы продолжается далее в 5<sup>й</sup> и 6<sup>й</sup> клетях, в результате на выходе из 6-клетевого стана «1700» ЧерМК ОАО «Северсталь» ее продольная разнотолщинность уменьшается весьма значительно. На рис. 1.4 показаны в качестве примера характерные диаграммы изменений по длине полосы усилия прокатки в наиболее нагруженной клетке № 5 при прокатке полосы 1,5x1000 мм по рабочему и усовершенствованному режимам. В связи с вибрационным фоном на диаграммах усилия фиксировались в виде диапазонов колеблющихся значений. Как видно, фактические колебания усилий в результате оптимизации режима снизились почти в 2 раза. Все приведенные данные свидетельствуют о больших резервах повышения эффективности технологии и точности прокатки на современных непрерывных широкополосных станах горячей прокатки.

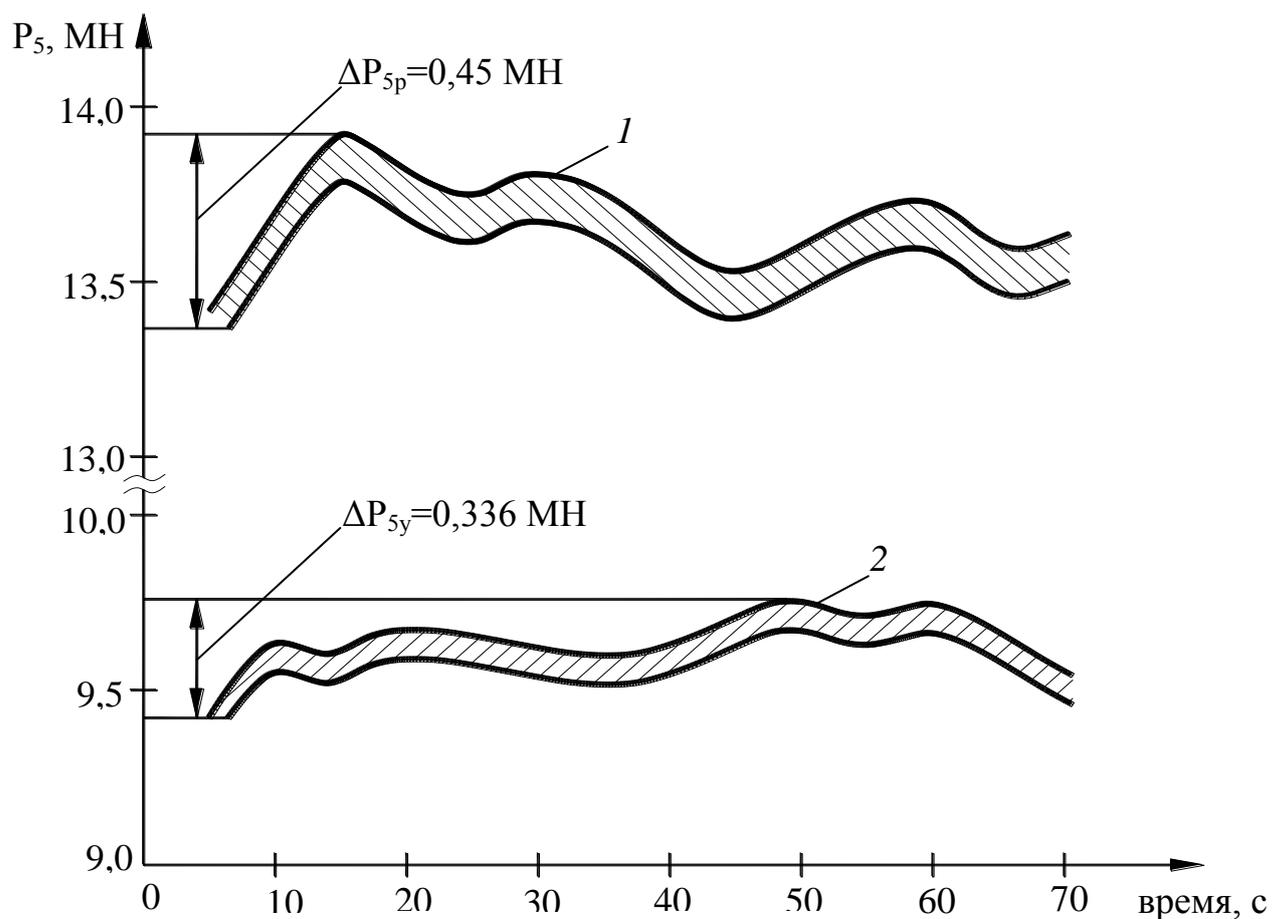


Рис. 1.4. Характерные диаграммы записи изменений усилия прокатки в клетке № 5 при прокатке одной полосы по рабочему (1) и усовершенствованному (2) режимам [25]

Чтобы эмпирический опыт, изложенный в работе [25], использовать для уменьшения продольной разнотолщинности полос на других широкополосных станах, необходимо подвести под него теоретическую базу: разработать математическую модель формирования продольной разнотолщинности в процессе её горячей прокатки, а затем использовать эту модель для создания алгоритма оптимизации режима прокатки по критерию «минимум продольной разнотолщинности», что является актуальной научно-технической задачей.

## **Выводы по главе 1**

Анализ базовой методики расчёта энергосиловых и технологических параметров широкополосных станов горячей прокатки [7] показал, что она обладает следующими недостатками, которые существенно снижают точность результатов расчётов:

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

2. Не в полной мере учитывалось фактическое содержание 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.

Помимо энергосилового расчёта, требуют совершенствования методы технологических расчётов станов горячей прокатки, позволяющие получать горячекатаные полосы с продольной разнотолщинностью, не превышающей  $\pm 2,2$  % от номинальной толщины.

Из проведенного литературного обзора выявились существенные недостатки известных математических моделей взаимосвязи продольной разнотолщинности горячекатаных полос с факторами технологического процесса ШПСГП. Ниже перечислены наиболее существенные из этих недостатков:

1. Большинство математических моделей продольной разнотолщинности горячекатаных полос разработано без учета напряженного состояния полосы в упругих участках очага деформации, что снижает точность результатов расчета.

2. Ни для одной из рассмотренных моделей в литературных источниках не предусмотрен алгоритм оптимизации её к условиям 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.

Из вышеизложенного следует, что устранение указанных недостатков энергосилового и технологического расчётов широкополосных станов горячей прокатки является весьма актуально научно-технической задачей.

## 2. Совершенствование методики энергосилового расчёта ШПСГП

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

В публикациях [2-4] параметры очага деформации вычисляли при постоянных значениях упругих характеристик полосы и валков: для полосы принимали:  $E_{II} = 2,15 \cdot 10^5$  МПа (справочная величина для стали при температуре  $20^0C$ ); для чугунных рабочих валков, обычно используемых в чистовых клетях ШПСГП, принимали усреднённое значение  $E_B = 1,55 \cdot 10^5$  МПа. Значение коэффициента Пуассона для полосы принимали  $\nu_{II} = 0,3$ ; для рабочих валков –  $\nu_B = 0,27$ .

Для большинства марок углеродистых сталей (08пс, 08Ю, 1пс и др.), по справочным данным [12], 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  $20^0C$ .

Поскольку в формуле (1.4) величина  $E_{II}$  находится в знаменателе, длина упругих участков очагов деформации в рабочих клетях чистовых групп ШПСГП при прокатке тонких полос должна быть больше, чем указано в работах [1-4]. Чтобы уточнить её, мы выполнили математическую аппроксимацию графика на рис. 2.1, в результате получили следующие зависимости модуля упругости полосы от температуры:

$$E_{Pi} = E_{IIбаз} \cdot f\left(\frac{t_i}{t_{баз}}\right), \quad (2.1)$$

где  $E_{Pi}$  – модуль упругости полосы в  $i$ -ой клетке;

$t_i$  – средняя температура полосы в  $i$ -ой клетке, фиксируемая АСУ ТП стана;

$E_{IIбаз} = 2,15 \cdot 10^5$  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:

$$f\left(\frac{t_i}{t_{баз}}\right) = 1,008 - 1,29 \cdot 10^{-4} \left(\frac{t_i}{t_{баз}}\right)^2 - 6,71 \cdot 10^{-3} \left(\frac{t_i}{t_{баз}}\right) \quad (2.2)$$

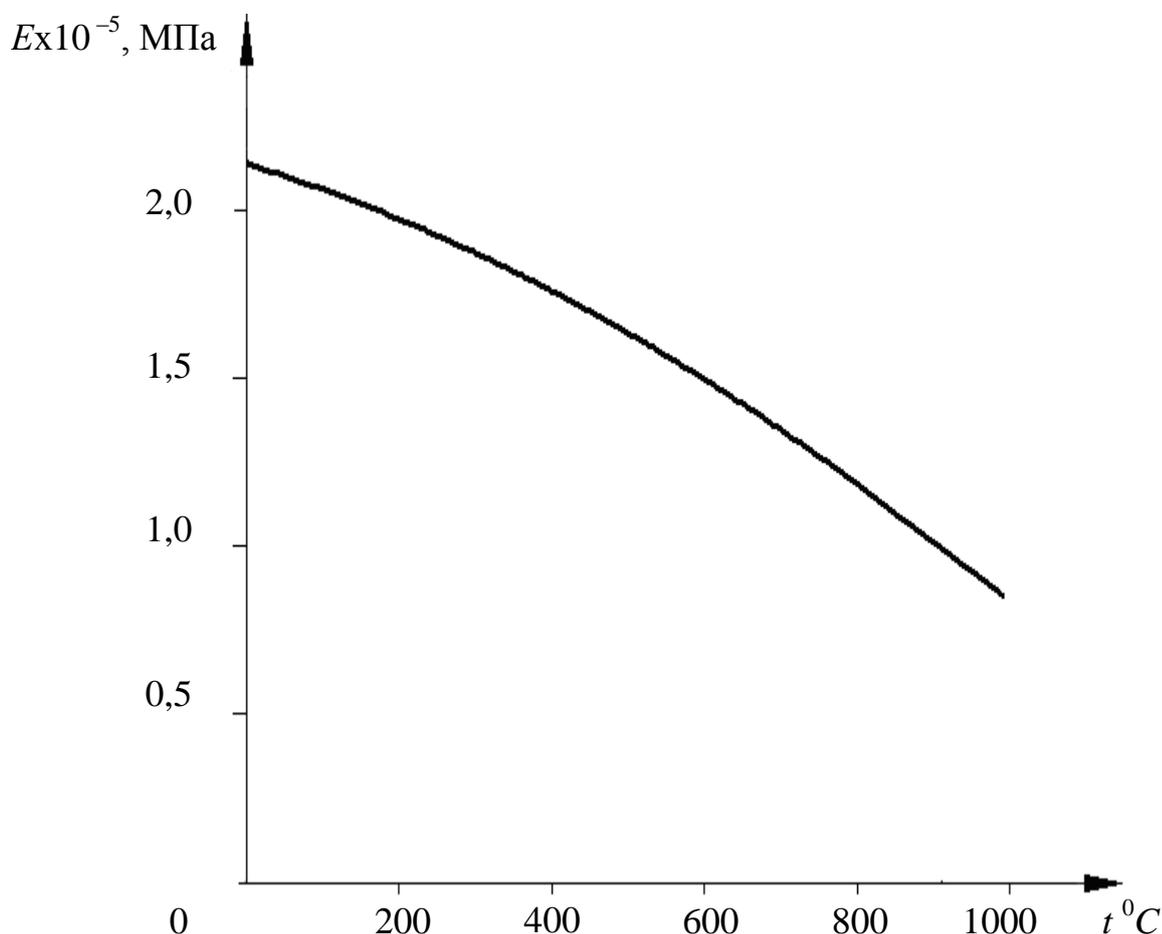


Рис. 2.1 Зависимость модуля упругости углеродистых сталей от температуры [12]

Достоверность зависимостей (2.2) и (2.1) подтверждена критерием Фишера (при уровне значимости  $\alpha=0,05$  расчетное значение критерия превысило его табличное значение) и коэффициентом множественной детерминации  $R^2 = 0,999$ , что подтвердило практически адекватное соответствие выражений (2.1) и (2.2) графику  $E_{Пi}(t_i)$ , приведённому на рис. 2.1.

Что касается коэффициента Пуассона прокатываемой полосы, то он связан с модулем упругости соотношением из работы [12]:

$$\nu = \frac{E_{П}}{2G} - 1, \quad (2.3)$$

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

Для полос из углеродистых сталей величина  $\nu_{II}$ , рассчитанная по формуле (2.3), оказалась в диапазоне 0,24–0,32, причём анализ показал, что её можно без заметной погрешности принять постоянной  $\nu_{II} = 0,3$ .

Однако для рабочих валков значения  $\nu_B$ ,  $E_B$  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 (табл. 2.1).

Таблица 2.1

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, $\nu_B$	Модуль упругости $E_B$ , МПа (средние значения)	Клеть №	Материал рабочих валков	Коэффициент Пуассона, $\nu_B$	Модуль упругости $E_B$ , МПа (средние значения)
1	Полубыстрорежущая 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	$1,83 \cdot 10^5$

В таблице 2.1 приведены в качестве примера данные о материалах рабочих валков, используемых при прокатке на 6-клетевом ШПСГП «1700» и в

чистой группе ШПСГП «2000» ЧерМК ОАО «Северсталь». Там же по данным [13; 14] указаны значения их коэффициентов Пуассона и модулей упругости, которые, в зависимости от материала валков, изменяются по клетям в диапазонах:

$$\nu_B = 0,27-0,35; E_B = (1,68-2,15) \cdot 10^5 \text{ МПа.}$$

## 2.2 Определение сопротивления деформации с учётом фактического содержания в стали химических элементов

Формула (1.7) – наиболее достоверное эмпирическое выражение сопротивления деформации стали при горячей прокатке, используемое в энергосиловых расчётах ШПСГП по методике [7].

Преимущество формулы (1.7) перед другими эмпирическими методами расчёта сопротивления деформации состоит в том, что она даёт возможность учесть реальное содержание химических элементов в выплавленной стали, что весьма существенно, т.к. стандарты России и ряда других стран регламентируют содержание легирующих элементов в той или иной марке стали либо по верхнему, либо по нижнему пределам. Поэтому сталь одной и той же марки может иметь разное содержание химических элементов, влияющих при горячей прокатке на сопротивление деформации. Это обстоятельство металлурги используют для экономии легирующих элементов: выплавляют сталь с их минимально допустимым содержанием, если это не ухудшает микроструктуру и механические свойства готового проката. Чтобы учесть фактический химический состав стали при определении величины  $\sigma_{ф.пл}$ , в методике [15, 18, 19] для определения постоянных коэффициентов формулы (1.7) предложены следующие эмпирические выражения:

$$s\sigma_{o,d} = 66,8 + 0,1[(K'_1 \cdot X_1 + K''_1 \cdot X_1^{1,5}) + \dots + (K'_{13} \cdot X_{13} + K''_{13} \cdot X_{13}^{1,5})]; \quad (2.4)$$

$$a = 0,126 + 0,01[(l'_1 \cdot X_1 + l''_1 \cdot X_1^{1,5}) + \dots + (l'_{13} \cdot X_{13} + l''_{13} \cdot X_{13}^{1,5})]; \quad (2.5)$$

$$b = 0,125 + 0,01[(m'_1 \cdot X_1 + m''_1 \cdot X_1^{1,5}) + \dots + (m'_{13} \cdot X_{13} + m''_{13} \cdot X_{13}^{1,5})]; \quad (2.6)$$

$$c = -2,82 + 0,01[(n'_1 \cdot X_1 + n''_1 \cdot X_1^{1,5}) + \dots + (n'_{13} \cdot X_{13} + n''_{13} \cdot X_{13}^{1,5})]. \quad (2.7)$$

В выражениях (2.4)–(2.7) символами  $X_1...X_{13}$  обозначены процентные содержания в стали 13 химических элементов (они указаны в таблице 2.2), а коэффициенты при этих символах получены автором методики [15] путём пластометрических испытаний стальных образцов разного химического состава (значения этих коэффициентов также указаны в таблице 2.2).

Таким образом, методика Л. В. Андреюка 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, а в сталях стандартных марок, таких, как Ст.1пс, Ст.3сп, изменился химический состав.

Таблица 2.2

Значение эмпирических коэффициентов в выражениях (2.4)...(2.7)

Химический элемент	Обозначение его элементного содержания	Значение эмпирических коэффициентов							
		$K'$	$K''$	$l'$	$l''$	$m'$	$m''$	$n'$	$n''$
C	$X_1$	-65,7	141,0	9,17	-5,24	23,0	-18,6	-63,0	43,1
Mn	$X_2$	134	-36,2	-0,314	0,107	2,37	-0,591	-25,6	8,07
Si	$X_3$	31,9	-37,8	-4,98	3,57	5,30	-3,39	59,3	-45,5
Cr	$X_4$	155	-31,3	-0,29	0,0612	1,32	-0,385	-15,9	2,66
Ni	$X_5$	70,6	-5,04	-0,315	0,0319	0,450	-0,037	7,28	-0,633
W	$X_6$	-155	40,1	0,559	-0,148	1,90	-0,549	-29,3	11,0
Mo	$X_7$	-371	175	3,07	-1,07	-2,64	0,428	16,5	5,56
V	$X_8$	2204	1521	-20,8	19,3	-28,9	24,0	286	-495
Ti	$X_9$	757	-625	-8,44	5,56	-0,0365	-6,19	-44,7	28,3
Al	$X_{10}$	1303	-908	15,2	-9,55	60,6	-36,5	-804	503
Co	$X_{11}$	1874	-412	23,1	-5,63	63,9	-15,2	-1155	270
Nb	$X_{12}$	-291	219	-7,09	5,30	56,3	-63,9	-1529	1610
Cu	$X_{13}$	-84,0	127	4,96	-2,62	-7,59	6,43	-242	124

Все изложенные выше уточнения (определение упругих и пластических характеристик полосы с учётом её температуры и химического состава, дифференцированный учёт упругих характеристик валков в разных клетях) были включены в усовершенствованную методику энергосилового расчёта ШПСГП [26, 27].

### 2.3 Сопоставительный анализ точности усовершенствованной и базовой методик расчёта энергосиловых параметров ШПСГП

Для проверки достоверности усовершенствованной методики была осуществлена ее программная реализация.

Поскольку совместное решение уравнений, описывающих среднее значение нормальных контактных напряжений  $p_{cpi}$  и длину дуги контакта полосы с рабочим валком  $l_{ci}$ , в явном виде невозможно, то расчет вышеуказанных параметров производили методом итераций. Суть этого метода состоит в том, что расчет  $p_{cpi}$  выполняется последовательно многократно с подстановкой в каждом последующем цикле результатов предыдущего цикла расчета. После каждого цикла расчета проверяется условие:

$$\frac{p_{cp} - p'_{cp}}{p'_{cp}} \leq \Delta, \quad (2.8)$$

где  $p_{cp}$ ,  $p'_{cp}$  – среднее значение нормальных контактных напряжений после данного и предыдущего цикла расчета:

$$p_{cpi} = \frac{1}{l_{ci}} (p_1 x_{1ynp} + p_{23} x_{nl} + p_4 x_{2ynp})$$

$\Delta$  – заданная точность расчета (например  $\Delta = 0,01$ )

Расчёт считается законченным после выполнения условия (2.8).

Алгоритм энергосилового расчета на основе упругопластической модели очага деформации с применением итерационной процедуры представлен в Приложении 1, блок-схема алгоритма – на рис. 2.2.



Рис. 2.2. Блок-схема энергосилового расчета процесса горячей прокатки

Для апробации уточнённой методики энергосилового расчёта ШПСГП были рассчитаны структурные параметры очагов деформации и силы прокатки при производстве на 6-клетьевом стане «1700» ЧерМК ОАО «Северсталь» горячекатаных полос шириной 1000 мм толщиной 0,9 мм, 1,2 мм, 1,5 мм, из углеродистых сталей марок Ст.1пс, Ст.3сп, S235JR, S235JRC, химические составы которых указаны в табл. 2.3, а фактические режимы прокатки – в табл. 2.4 [26, 27].

Таблица 2.3

Химические составы полос толщиной 0,9-1,5 мм, прокатанных на ШПСГП «1700» при апробации уточнённой методики энергосилового расчёта

Сталь (стандарт)	C( $X_1$ ), %	Mn( $X_2$ ), %	Si( $X_3$ ), %	Cu( $X_4$ ), %	Ni( $X_5$ ), %	Cr( $X_6$ ), %	Al( $X_7$ ), %
Ст.1пс (ГОСТ 14637–89)	0,1	0,3	0,005	0,006	-	-	-
Ст.3сп (ГОСТ 14637–89)	0,16	0,46	0,21	0,07	0,03	0,036	0,052
S235JR (EN10025.93)	0,13	0,38	0,02	0,07	0,08	0,078	0,04
S235JRC (EN10025.93)	0,13	0,47	0,02	0,06	0,03	0,033	0,035

Таблица 2.4

Режимы прокатки полос на ШПСГП «1700», использованные для апробации уточнённой методики энергосилового расчёта (толщина подката 25 мм)

Режим №	Марка стали	Толщины по клетям $h_i$ , мм						Удельные натяжения по клетям $\sigma_i$ , МПа						Скорость прокатки $v$ , м/с
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	
1	Ст.1пс	10,15	3,95	2,18	1,71	1,04	0,87	0,48	0,81	1,83	1,97	2,43	3,2	11,74
2	S235JRC	10,25	4,43	2,6	1,74	1,36	1,2	25,4	33,9	40,8	47,1	49,8	35	11,2
3	S235JR	10,82	5,16	3,28	2,05	1,39	1,2	3,8	3,8	19,6	22,7	24,1	29	11,18
4	Ст.3сп	10,5	5,25	3,11	2,24	1,79	1,56	25	32,4	33,8	40,2	44,7	43	11,19
5	Ст.3сп	12,33	6,16	3,28	2,47	1,77	1,52	4,4	4,0	13,6	19,6	21	23,1	11,18

Результаты расчёта по уточнённой методике структурных параметров очагов деформации и сил прокатки для всех режимов, указанных в табл. 2.4, приведены в табл. 2.5. Там же приведены фактические значения сил прокатки, результаты расчёта сил прокатки по базовой методике [7] и сопоставлены погрешности расчёта по базовой и уточнённой методикам. Подробные расчёты параметров очагов деформаций и проверка точности расчётов по усовершенствованной методке для

рабочих технологических режимов чистой группы ШПСГП «2000» представлены в Приложении 2.

Таблица 2.5

Результаты расчёта структурных параметров и сил прокатки по уточнённой методике, сопоставление сил прокатки, рассчитанных по базовой и уточнённой методикам, с фактическими значениями сил прокатки (по данным АСУТП стана «1700»).

Номер режима	Номер клетки	$l_{ci}$ , мм	$x_2$ , мм	$\frac{x_{1упр} + x_{2упр}}{l_{ci}}$ , %	Сила прокатки $P_i$ , МН			Погрешность Расчёта $\Delta P_i$ , %	
					фактическая	расчётная		базовая методика	уточнённая Методика
						базовая методика	уточнённая методика		
1	1	73,75	3,25	4,7	21,5	21,71	21,7	1	0,9
	2	49,9	4,5	9,1	20,9	19,86	20,77	5	0,6
	3	32,45	7	22	19,8	18,1	19,3	8,8	2,5
	4	19,56	5,95	31	10,5	9,82	10,76	6,46	2,5
	5	20,9	8,27	40	15,6	16,7	15,95	7	2,2
	6	15,46	5,9	39	8,5	8,26	8,63	2,8	1,5
2	1	73,46	3	4,3	19,85	21,45	19,54	8,04	1,6
	2	49	4,65	9,8	19,83	20,26	19,56	2,2	1,3
	3	30,3	5,05	17,2	13,9	14,82	13,52	6,59	2,7
	4	24,2	6,4	27,1	13,02	13,07	13	0,38	0,15
	5	18,6	5,95	33	9,53	9,08	9,8	4,76	3
	6	12,8	4,35	35,7	5,66	5,18	5,66	8,5	0
3	1	72	2,93	4,3	19,71	22,18	19,17	11,1	2,75
	2	48,3	4,5	9,65	19,58	20,26	19,58	3,5	0
	3	31,2	5,5	18,1	13,9	13,4	13,98	1,5	0,55
	4	27	6,1	23,3	13,96	15,46	13,72	10,7	1,7
	5	23,8	7,3	31,4	16	16,29	15,79	1,86	1,325
	6	14,33	5,06	36,7	7,1	6,55	7,23	7,8	1,8
4	1	73,1	3,1	4,5	20,05	21,9	19,46	5	3
	2	46,2	4	9	17,22	17,64	16,97	2,4	1,45
	3	31,2	5,57	17,5	14,71	15,08	15,06	2,5	2,4
	4	24	5,96	25,65	11,84	10,7	11,74	11	0,85
	5	23,8	5,8	30,8	9,6	8,57	9,65	10,7	0,6
	6	14,4	4,76	35	5,9	5,26	6,12	10,8	3,6
5	1	68,6	3,28	5,1	20	19,1	20,5	4,5	2,5
	2	49,4	3,75	7,9	17,22	18,7	16,76	8,6	2,7
	3	33,3	5,05	15,9	14,7	13,95	14,2	5,1	3,4
	4	27,5	5,54	21	12,84	14,07	12,48	9,6	2,8
	5	23,4	6,7	29,55	13,6	12,88	13,95	5,3	2,5
	6	14,65	4,46	32	5,9	6,4	5,8	8,4	1,7

Из таблицы 2.5 и Приложения 2 можно сделать следующие выводы:

1. Диапазон погрешностей расчёта сил прокатки на ШПСГП «1700» для 30 фактических данных составил: по базовой методике [7] 0,3 –11,1% (среднее значение 5,79%); по уточнённой методике [26, 27] 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 чистовой группе ШПСГП «2000» для 185 фактических данных 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. 2.3 показана усреднённая графическая зависимость величины  $\frac{x_{1упр} + x_{2упр}}{l_{ci}}$  от толщины полосы на выходе из очага деформации, построенная по расчётным данным таблиц 2.4 и 2.5, 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  $x_{2упр}$  второго упругого участка).

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 в чистовых клетях ШПСГП модуль упругости полосы уменьшается почти в 2 раза.

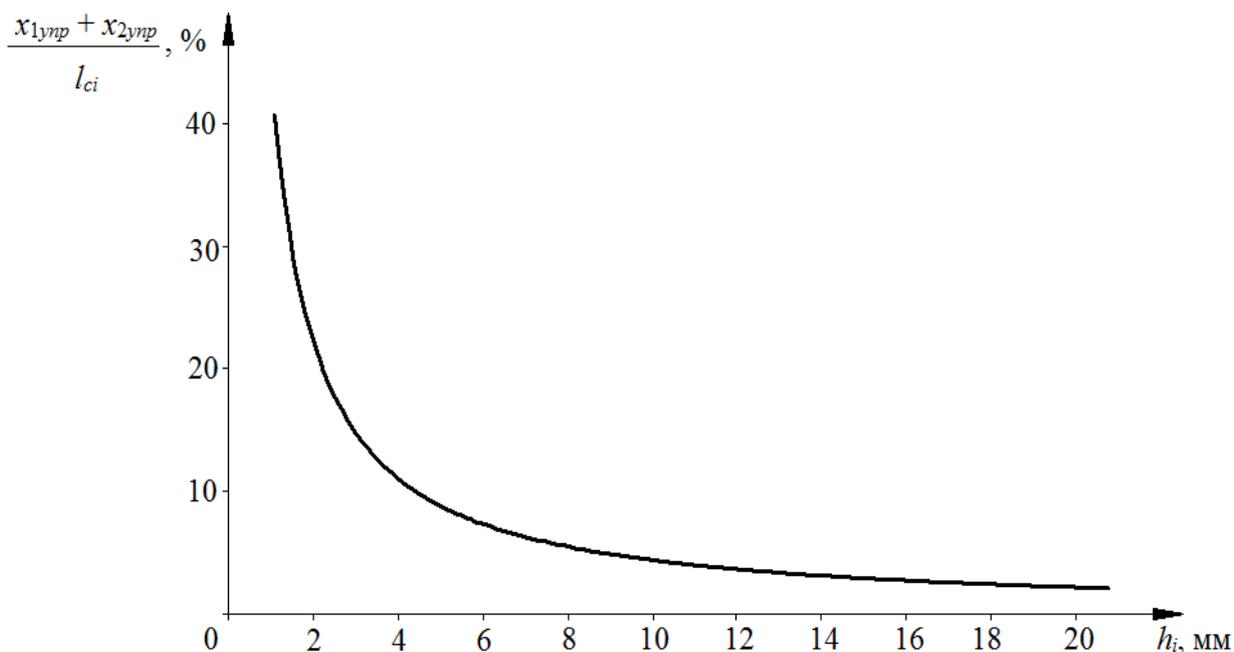


Рисунок 2.3. Зависимость величины  $\frac{x_{1упр} + x_2}{l_{ci}}$  от толщины полосы на выходе из

клетки.

## Выводы по главе 2

1. Методика расчёта энергосиловых параметров процесса горячей прокатки тонких стальных полос, основанная на упругопластической модели очага деформации [7], дополнена учётом влияния температуры полосы на модуль упругости её материала и на длину упругих участков очага деформации.

2. Благодаря дополнениям, указанным в п. 1, установлено, что при горячей прокатке наиболее тонких полос ( $h_i = 0,8-1,2$  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 %.

3. Установлено, что 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 (модуль упругости, коэффициент Пуассона и сопротивление пластической деформации).

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

### **3. Моделирование процесса образования продольной разнотолщинности стальных полос на ШПСГП**

#### **3.1 Математическое моделирование процесса образования продольной разнотолщинности широких полос при горячей прокатке**

Чтобы уменьшить колебания толщины по всей площади листа до значений  $\pm 2,2$  % от номинального (заданного) значения, надо решить две взаимосвязанные, но самостоятельные задачи – уменьшить продольную и поперечную разнотолщинности полос.

В данной главе рассмотрены результаты моделирования процесса образования продольной разнотолщинности (вопросы уменьшения поперечной разнотолщинности листов рассмотрены в работах [28-30]).

Решение задачи уменьшения продольной разнотолщинности горячекатаных полос мы выполняли, руководствуясь следующими положениями [31-33]:

1. Система автоматического регулирования толщины полосы имеет ограниченные возможности как по диапазону устраняемых колебаний толщины, так и по части инерционности отработки сигналов датчиков – измерителей толщины. Поэтому для максимально возможного уменьшения её отклонений от номинальных значений необходимо оптимизировать процесс настройки стана, в частности – распределение суммарного обжатия между его клетями.

2. Опыт настройки широкополосных станов показал, что минимальная продольная разнотолщинность горячекатаной полосы при постоянной продольной разнотолщинности подката достигается, если суммарное обжатие в чистовой группе стана распределить между клетями по следующему принципу: в первых клетях установить максимально возможные обжатия, а в последних клетях – минимально возможные.

Так, например, в работе [25] изложены результаты перераспределения обжатий и натяжений между клетями 6<sup>ти</sup> клетцевого стана горячей прокатки «1700» ЧерМК ОАО «Северсталь», при производстве полос толщиной 1,2–1,5 мм. Освоение технологии прокатки таких особо тонких полос привело к росту суммарных обжатий, в результате чего в рабочих валках последних клеток этого стана возникли очень высокие контактные напряжения, опасные для их стойкости. Чтобы разгрузить последние клетки, авторы работы [25] перераспределили обжатия между клетями: в 1<sup>й</sup>, 2<sup>й</sup> и 3<sup>й</sup> клетях частные обжатия были увеличены, а в 4<sup>й</sup>, 5<sup>й</sup> и 6<sup>й</sup> уменьшены. Одновременно увеличили межклетевые удельные натяжения со слишком низкого уровня 1–2 % до оптимального диапазона 10–12 % от сопротивления пластической деформации металла. В результате основная задача – снизить опасные для стойкости валков контактные напряжения в последних клетях стана – была достигнута, при этом несколько увеличившиеся контактные напряжения в первых клетях оставались в допустимых пределах. Однако обработка результатов промышленных испытаний усовершенствованных режимов прокатки показала, что кроме ожидаемого результата был получен незапланированный, но не менее важный результат – продольная разнотолщинность и разноширинность горячекатаных полос уменьшилась в 1,7–2,0 раза. Этот результат в статье [25] был объяснён с помощью графической интерпретации решения системы двух уравнений (рис. 3.1):

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

$$P_i = f(h_{i-1}, h_i, \sigma_{ф.плi}, \mu_i, v_i, b, \sigma_{i-1}, \sigma_i), \quad (3.1)$$

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 ( $\varepsilon_i$ ) и скорости деформации ( $u_i$ );  $\mu_i$  – коэффициент трения в очаге деформации  $i$ -ой клетки;

$v_i$  – скорость полосы на выходе из  $i$ -ой клетки;  $b$  – ширина полосы;  $\sigma_{i-1}, \sigma_i$  – заднее и переднее удельные натяжения соответственно.

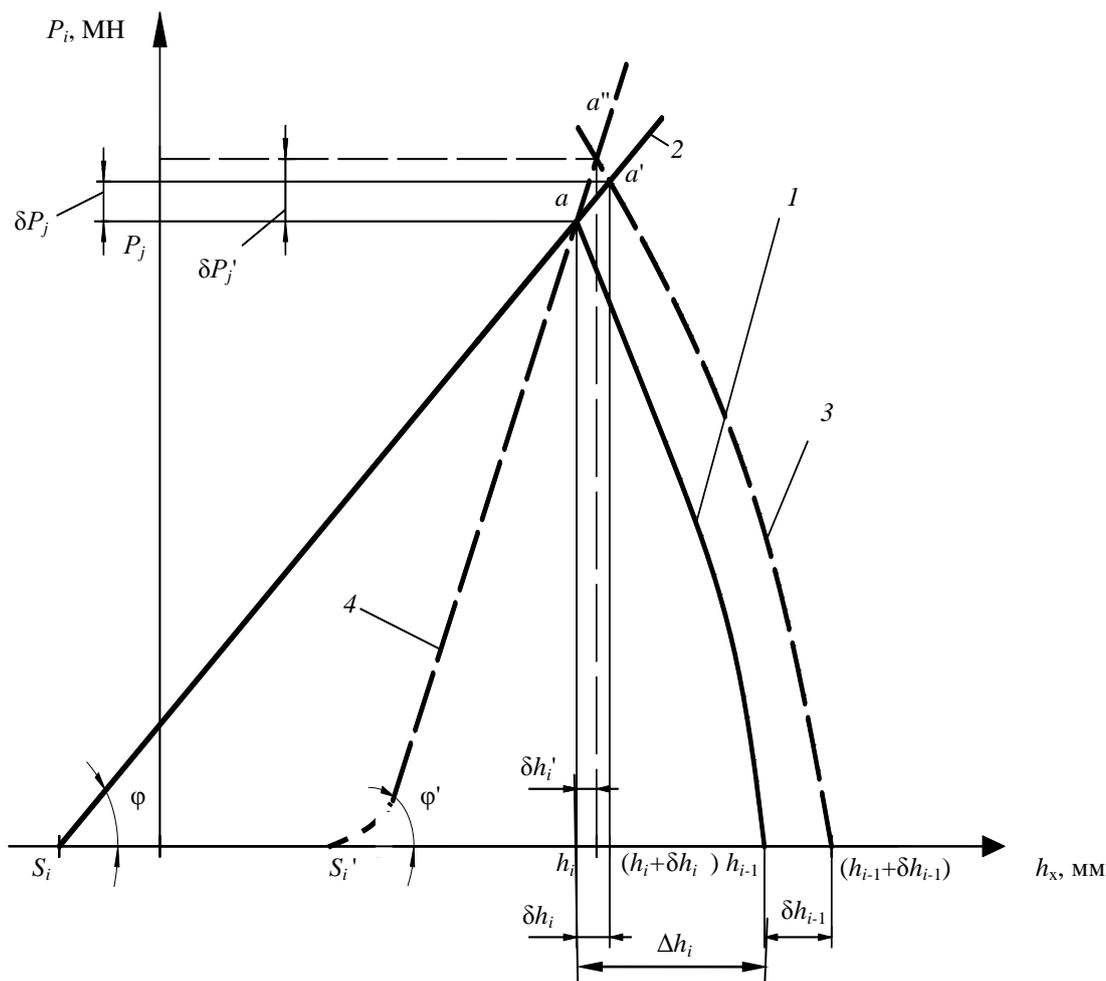


Рис. 3.1 – Графическое определение продольной разнотолщинности полосы на выходе из  $i$ -ой клетки ( $\delta h_i$ ) в зависимости от разнотолщинности на входе в клеть ( $\delta h_{i-1}$ ) и коэффициента жёсткости клетки ( $M_{кл}$ ).

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

$$P_i = M_{кл}(h_i - S_i), \quad (3.2)$$

где  $M_{кл}$  – модуль жёсткости клетки, МН/мм;  $S_i$  – предварительно установленный зазор между рабочими валками  $i$ -ой клетки, мм.

На рис. 3.1 линейная зависимость (3.2)  $P_i$  от  $h_i$  показана в виде прямой линии 2. Из рис. 3.1 видно, что, сила прокатки  $P_i$ , необходимая для обжатия  $\Delta h_i = h_{i-1} - h_i$ , определяется графически путём пересечения вертикальной

прямой, проведённой из точки  $h_i$  на оси абсцисс, с кривой  $I$  в точке  $a$ . Наклонная прямая 2, выражающая уравнение (3.2), проведённая из точки  $a$ , определяет в точке пересечения с осью  $0-h_x$  величину  $S_i$  – необходимого предварительного зазора валков (в показанном на рис. 3.1 случае отрицательное значение  $S_i$  означает, что при настройке валки необходимо установить «в забой», т.е. упруго сжатыми).

Если из-за продольной разнотолщинности подката толщина полосы на входе в клетку увеличилась на  $\delta h_{i-1}$ , то функция (3.1) на рис. 3.1 будет представлена в виде кривой 3, а пересечение прямой 2 и кривой 3 произойдет в точке  $a'$ , которая определяет величину продольной разнотолщинности  $\delta h_i$  на выходе из клетки и возникшее при этом колебание усилия прокатки  $\delta P_i$ . Модуль жёсткости клетки  $M_{кл}$  на рис. 3.1 представляет собой тангенс  $\varphi$  – угла наклона прямой 2. При увеличении  $M_{кл}$  уравнение упругой деформации клетки (3.2) займёт положение кривой 4, а необходимый исходный зазор между валками будет равен  $S_i'$ , причём продольная разнотолщинность на выходе из клетки уменьшится и станет равной  $\delta h_i'$ . Изменение формы прямой 2 в кривую 4, при увеличении  $M_{кл}$ , объясняется выборкой зазоров между деталями при нагружении рабочей клетки [21].

Чтобы эмпирический опыт, изложенный в работе [25], использовать для уменьшения продольной разнотолщинности полос на других широкополосных станах, необходимо подвести под него теоретическую базу: разработать математическую модель формирования продольной разнотолщинности в процессе её горячей прокатки, а затем использовать эту модель для создания алгоритма оптимизации режима прокатки по критерию «минимум продольной разнотолщинности».

Сущность разработанной нами математической модели формирования продольной разнотолщинности полос в процессе горячей прокатки состоит в превращении графического определения величины  $\delta h_i$ , показанной на рис. 3.1, в последовательность математических операций, выполняемых поочередно для всех клеток широкополосного стана или для его непрерывной чистовой группы.

Проиллюстрируем эту модель на примере расчёта продольной разнотолщинности  $\delta h_i$  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  $\delta h_{i-1}$ .

Математическая модель продольной разнотолщинности представляет собой выполнение следующих вычислительных операций, проиллюстрированных на блок-схеме рис. 3.2 (в качестве примера представлен расчёт для непрерывной чистовой группы ШПСГП «2000»):

1. Расчёт силы прокатки  $P_j$  с помощью упругопластической модели энергосиловых параметров [26, 27] по формуле (3.1) для номинального режима прокатки с абсолютным обжатием  $\Delta h_j = h_{i-1} - h_i$ . В результате на графике рис. 3.1 становится известным положение точки  $a$  (координаты  $h_i$  и  $P_i$ ).

2. Серия расчётов по формуле (3.1) значений  $P_j$  для обжатий в  $i$ -ой клетки, меньших чем  $\Delta h_i$ . Для этого интервал  $[h_i; h_{i-1}]$  разбивается на  $n$  одинаковых отрезков и для каждого отрезка (толщины  $h_j$ ) с номерами  $j$  ( $j = 1, 2, 3, \dots, n$ ) вычисляется значение  $P_j$  при обжатии  $\Delta h_j = h_{i-1} - h_j$ . Результат этой серии расчётов – построенная кривая 1 (рис. 3.1), соединяющая точки  $h_{i-1}$  и  $a$ .

3. Расчёт требуемой величины предварительного зазора между валками по выражению, вытекающему из формулы (3.2):

$$S_i = h_i - \frac{P_i}{M_{\text{кл}}}. \quad (3.3)$$

4. Построение по двум точкам  $S_i$  и  $a$  прямой линии 2 (рис. 3.1), представляющей собой уравнение (3.2) упругой линии  $i$ -ой 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. 3.1), выражающая зависимость (3.1) силы  $P_j + \delta P_j$  от обжатия при увеличенной толщине подката  $(h_{i-1} + \delta h_{i-1})$ , и набор значений  $P_j + \delta P_j$  при разных абсолютных обжатиях.

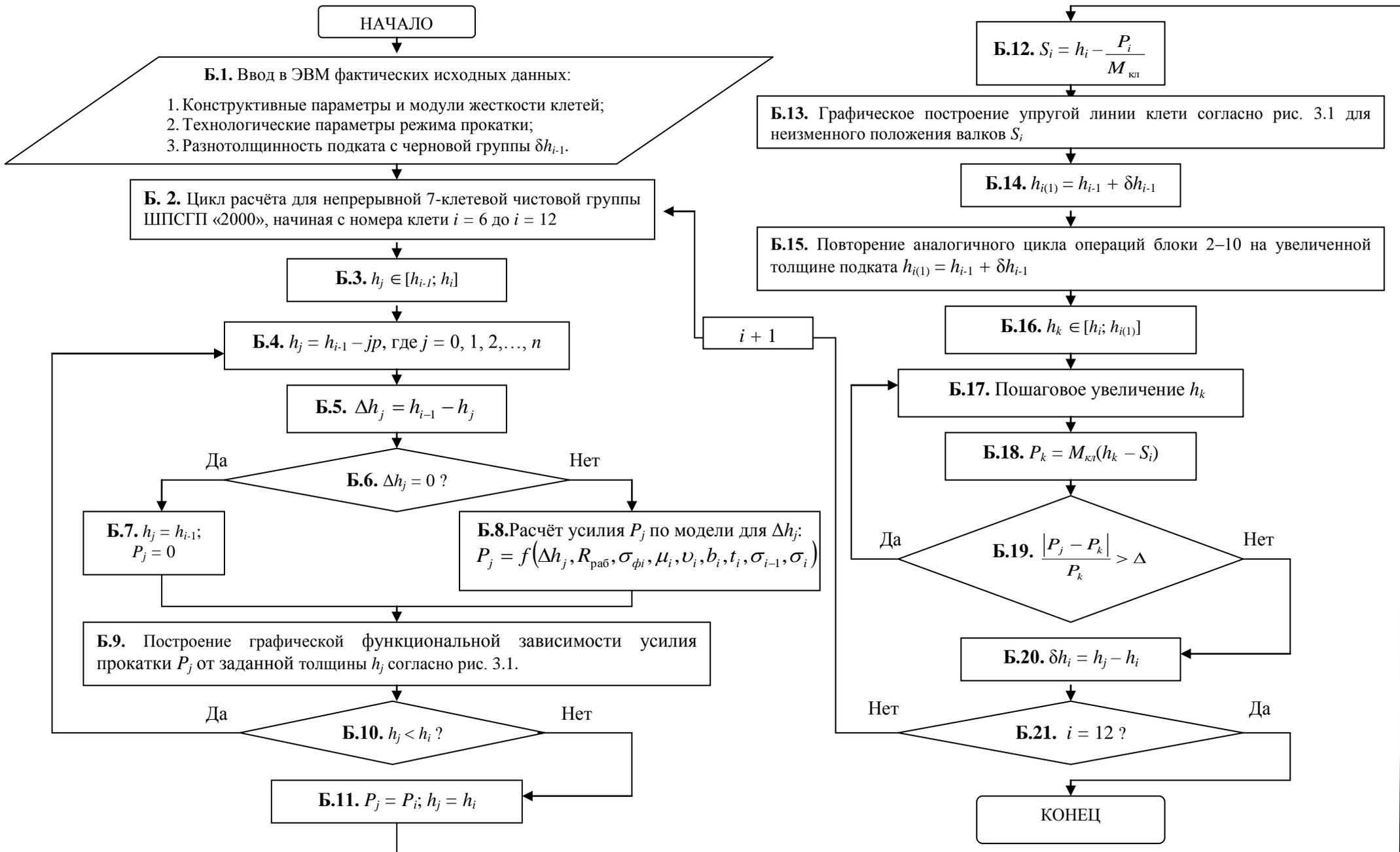


Рис. 3.2 Блок-схема математической модели продольной разнотолщинности.

6. Выполнение серии расчётов по формуле (3.2) силы  $P_k$ , возникающей при упругой деформации клетки под воздействием пошагово увеличивающегося обжатия, начиная со значения  $h_k = h_i$  с шагом  $\frac{\Delta h_{i(1)}}{n}$ . Результат этой серии расчётов – продление прямой линии 2 (рис. 3.1) от точки  $a$  в сторону пересечения её с кривой 3 и набор значений силы  $P_k$ , рассчитанных по формуле (3.2) при каждом новом значении  $h_i + j \cdot \frac{\Delta h_{i(1)}}{n}$ , где  $j = 0, 1, 2, 3, \dots, n$ .

7. Сравнение значений сил прокатки, рассчитанных по формулам (3.1) и (3.2) согласно пунктам 5 и 6 описываемого алгоритма, при каждом пошаговом значении толщины полосы:

$$\frac{|P_j - P_k|}{P_k} < \Delta, \quad (3.4)$$

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

Если неравенство (3.4) при каком-то шаге расчёта оказалось выполненным, то кривая 3 и прямая 2 на рис. 3.1 пересеклись в точке  $a'$ , координата которой на оси  $0-h_x$  определяет искомые значения продольной разнотолщинности  $\delta h_i$  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  $i$ -клетевой непрерывной группы. В валки  $1^{ой}$  клетки входит подкат, имеющий номинальную толщину  $h_{i-1}$  и фактическую продольную разнотолщинность  $\delta h_{i-1} = h_i + \delta h_{i-1}$ . Величина  $\delta h_i = h_k$ , полученная на выходе из последней ( $i$ -той) рабочей клетки (рис. 3.2), и будет являться выходным параметром модели формирования продольной разнотолщинности горячекатаной полосы  $i+1$  – ой клетки.

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

Достоверность математической модели продольной разнотолщинности, изложенной в п. 3.1, проверяли путем сопоставления средних расчетных и

измеренных томографом (рис. 3.3) значений продольной разнотолщинности  $\delta h_{i(\text{cp})}$  в рабочей клети № 12 чистовой группы ШПСГП «2000» ЧерМК ОАО «Северсталь», и статистического анализа погрешностей расчёта – расхождений между рассчитанными и измеренными значениями. Для этого, используя данные стационарного контроля технологических и энергосиловых параметров и выполнив большой объем измерений на действующем стане, создали базу данных о режимах прокатки широкого диапазона профилеразмеров полос и марок сталей номинальной толщиной  $h_{\text{НОМ}} = 2,0 - 3,5$  мм и шириной 1010–1625 мм. В соответствии с принятой методикой статистического анализа [57-59], определяли диапазоны погрешностей, их среднее значение, моду и характеристики рассеивания – дисперсию и среднее квадратическое отклонение.

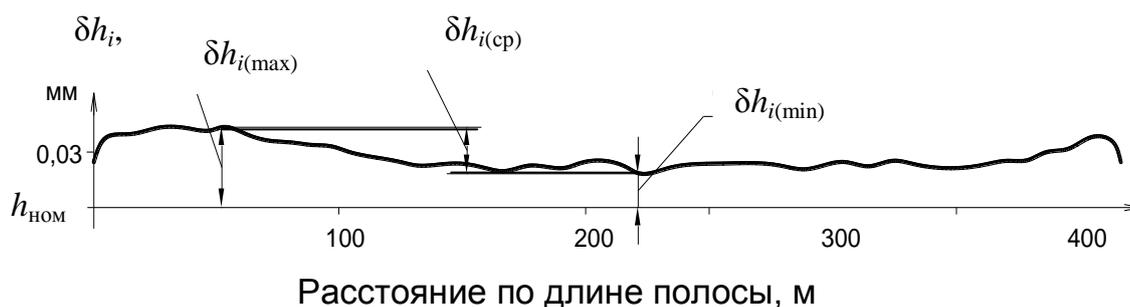


Рис. 3.3. Характерная профилограмма изменения продольной разнотолщинности по длине горячекатаной полосы в клети № 12 чистовой группы ШПСГП «2000» ( $h_{\text{НОМ}} = 3,2$  мм табл. 6 Приложение 2)

Информация о расхождениях измеренной и расчётной продольной разнотолщинности полос, полученная в результате промышленной апробации математической модели, была обработана с помощью программного пакета «Statistica», статистический ряд расхождений содержит 206 членов (проанализировано 206 томограмм продольной разнотолщинности полос).

Для наглядного представления статистических распределений на рисунке 3.4 представлена гистограмма, а в таблице 3.1 – количественные данные, характеристики распределений представлены в таблице 3.2.

Частота погрешностей расчета продольной разнотолщинности полос

Интервал погрешности, %	Частота (число случаев)	Накопленная частота	Частота, %
$0,0 < x_i \leq 2,0$	30	30	14,57
$2,0 < x_i \leq 4,0$	43	73	20,87
$4,0 < x_i \leq 6,0$	46	119	22,33
$6,0 < x_i \leq 8,0$	48	167	23,3
$8,0 < x_i \leq 10,0$	18	185	8,74
$10,0 < x_i \leq 12,0$	13	198	6,31
$12,0 < x_i \leq 14,0$	5	203	2,43
$14,0 < x_i \leq 16,0$	3	206	1,45

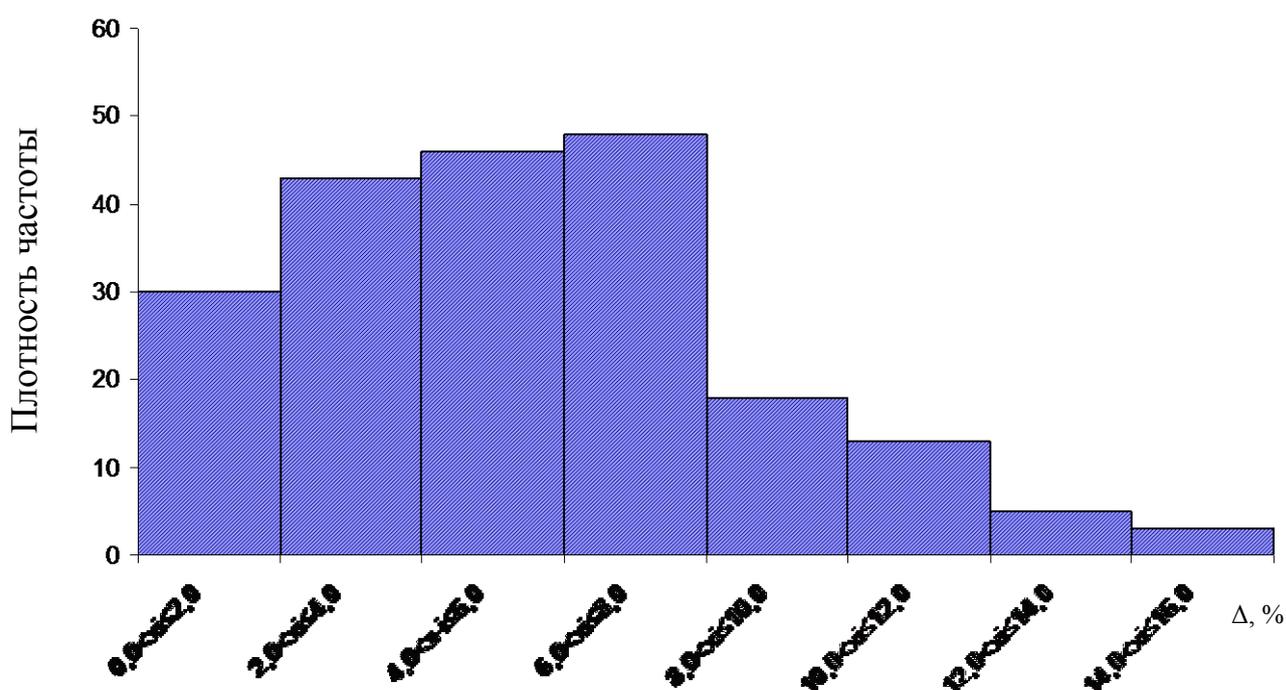


Рис. 3.4. Гистограмма распределения погрешностей расчёта продольной разнотолщинности полос по математической модели

Поскольку процент частоты погрешностей расчёта продольной разнотолщинности полос для интервала  $12,0 < x_i \leq 16,0$  (табл. 3.1 и рис. 3.4) составляет менее 5 %, то можно принять, с надёжностью  $\gamma = 0,95$ , что основная масса погрешностей лежит в доверительном интервале  $0 < x_i \leq 12,0$  (максимальная погрешность расчёта для данного интервала 11,87 %).

Статистические характеристики распределения погрешностей расчёта продольной разнотолщинности по математической модели

Параметр	Продольная разнотолщинность
Среднее значение $x_B$ , %	5,24
Минимум, %	0,1
Максимум, %	11,87
Мода, %	4,5
Дисперсия $D_B$ , %	16,74
Среднее квадратическое отклонение $\sigma$ , %	3,39

Анализ гистограммы и таблиц позволил сделать следующие выводы:

1. Максимальная погрешность расчёта продольной разнотолщинности полосы  $\Delta h_{i(\text{ср})}$  с надёжностью  $\gamma = 0,95$  составила 11,87 %. В 81,07 % случаев расхождения расчетных 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) составила 3,39 %, т.е. основная масса погрешностей расчёта (приблизительно  $\approx 66$  % с надёжностью  $\gamma = 0,95$ ) лежит в интервале 4,77-6,71 %.

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».

### Выводы по главе 3

1. Разработана математическая модель продольной разнотолщинности полосы, отличающаяся от известных моделей тем, что расчёт энергосиловых параметров процесса горячей прокатки осуществляется по наиболее точной усовершенствованной методике, основные положения которой изложены в главе 2.

2. Модель процесса образования продольной разнотолщинности горячекатаных полос в функции параметров режима горячей прокатки реализована в виде компьютерной программы для чистовой группы ШПСГП.

3. По результатам статистической обработки максимальная погрешность расчёта продольной разнотолщинности с надёжностью  $\gamma = 0,95$  составила 11,87 %; в 81,07 % случаев расхождения расчетных и измеренных значений не превысили 8 %.

4. Выполненный сопоставительный статистический анализ подтвердил достоверность разработанной математической модели расчёта продольной разнотолщинности и целесообразность ее использования для совершенствования технологических режимов горячей прокатки по критерию «минимум продольной разнотолщинности».

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

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

Анализируя кривые 1 – 4 на рис. 3.1, авторы статьи [25] качественно объяснили, почему при перераспределении суммарного обжатия между клетями шестиклетевого клетевого стана горячей прокатки «1700» ЧерМК ОАО «Северсталь» почти в 2 раза уменьшилась продольная разнотолщинность горячекатаных полос. Этот эффект был достигнут под воздействием двух факторов.

Во-первых, увеличение суммарного обжатия в трёх первых клетях существенно уменьшило номинальную толщину полосы, поступающей в последние клетки. Это снизило колебания толщины на входе в последние клетки, т.к. между уровнем колебаний толщины и её номинальным значением имеется прямая (хотя и не пропорциональная) зависимость.

Во-вторых, уменьшение обжатий в трёх последних клетях снизило в них силы прокатки; это вызвало в каждой из них уменьшение упругой деформации под воздействием продольной разнотолщинности на входе в клетку. Так как в каждую следующую клетку полоса поступала с меньшими колебаниями толщины, эффект уменьшения продольной разнотолщинности последовательно накапливался и к выходу из шестой клетки разнотолщинность стала минимальной. Что касается дополнительной загрузки трёх первых клеток, то в них, из-за более высокой температуры и меньшего наклёпа, сопротивление пластической деформации меньше, чем в последних клетях. Поэтому силы прокатки и упругие деформации в этих клетях повысились в меньшей степени, и некоторый рост продольной разнотолщинности полос на выходе из первых клеток был перекрыт её уменьшением в трёх последних.

Чтобы эмпирический опыт, изложенный в статье [25], использовать для уменьшения продольной разнотолщинности полос на других широкополосных станах, необходимо было разработать методику оптимизации режима прокатки по критерию «минимум продольной разнотолщинности». Такая методика была нами разработана для непрерывной группы чистовых клетей ШПСГП [31]. Её сущность заключается в следующем:

*Первый этап.* Непрерывная группа клетей условно разбивается на две подгруппы: с количеством клетей  $k_1$  и  $k_2$ . Если общее число клетей 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 [4, 26] 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 клетей первой подгруппы и максимально возможное в ней суммарное обжатие  $\varepsilon_{\Sigma 1}$ .
2. Минимально возможная толщина полосы, входящей во вторую подгруппу клетей и минимально возможное в ней суммарное обжатие  $\varepsilon_{\Sigma 2}$ .

*Второй 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 [35]. 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 клетке.

#### Результаты второго этапа:

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

*Третий этап.* Включается в работу изложенная выше модель формирования продольной разнотолщинности полосы [31–33]. Сначала рассчитывается продольная разнотолщинность на выходе полосы из первой подгруппы клеток, а затем для каждого усовершенствованного варианта распределения обжатий между клетками 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 ( $\delta h_i \rightarrow \min$ ).

На рис. 4.1 показана блок-схема методики компьютерной оптимизации по критерию «минимум продольной разнотолщинности» для семиклетевой чистовой группы ШПСГП «2000» ЧерМК ОАО «Северсталь».

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

Изложенные вычислительные процедуры (рис. 4.1) были реализованы на ЭВМ в виде компьютерной программы, состоящей из двух подпрограмм: первая реализовала модель формирования продольной разнотолщинности полосы, вторая – алгоритм оптимизации режима прокатки.

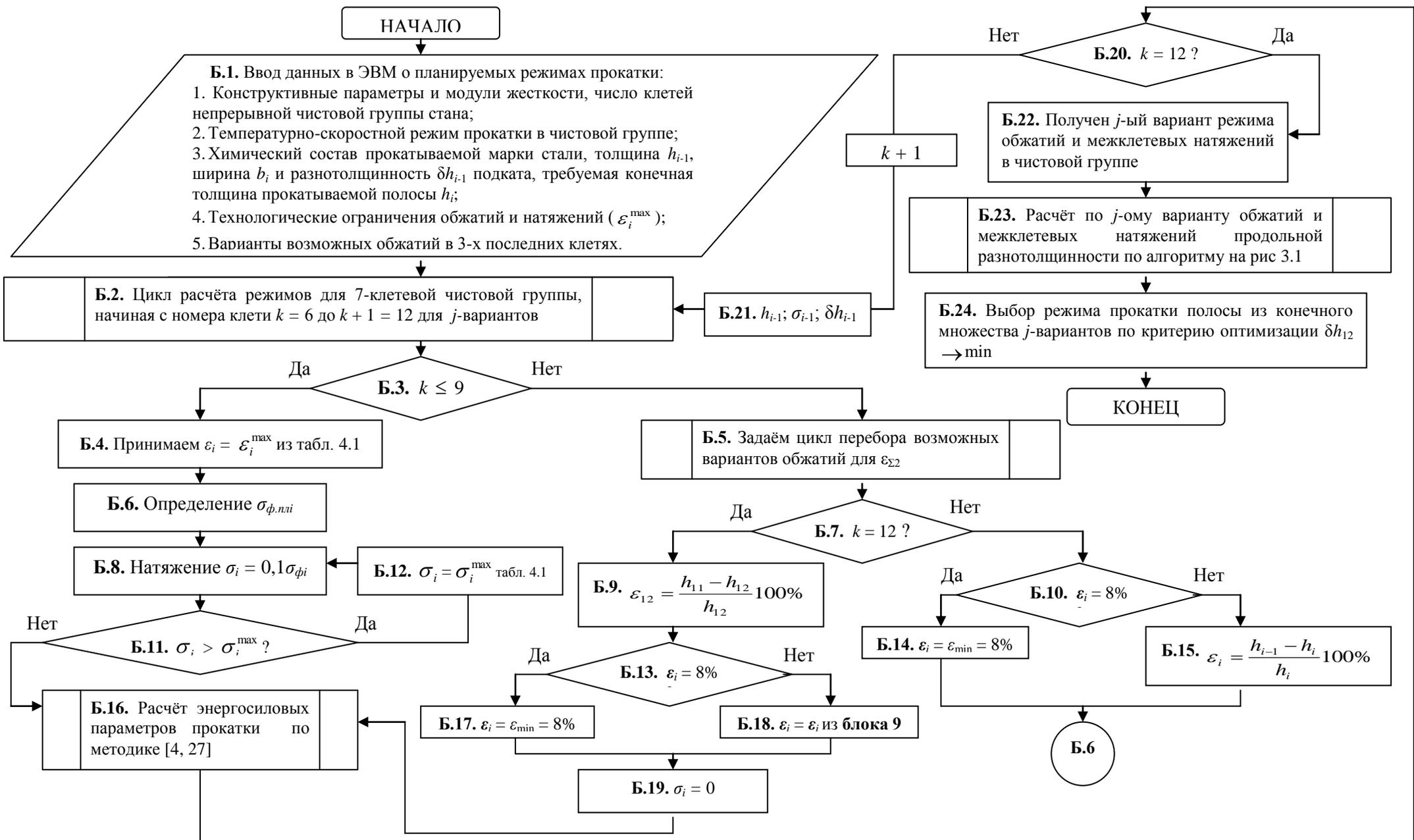


Рис. 4.1 Блок-схема методики компьютерной оптимизации режимов горячей прокатки в чистой группе ШПСГП «2000» по критерию «минимум продольной разнотолщинности»

Указанная компьютерная программа была применена на действующем двенадцатиклетевом стане «2000» ЧерМК ОАО «Северсталь», имеющем чистовую группу в составе 7 клеток (с 6<sup>ой</sup> по 12<sup>ую</sup>) 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 табл. 4.1.

Таблица 4.1

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

Параметр	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:**  $\sigma_i^{\max}$  – максимальное допустимое удельное натяжение за  $i$ -ой клетью.

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 показала, что максимальные отклонения от номинальной толщины полосы на входе в чистовую группу этого стана (т.е. после 5<sup>ой</sup> клетки черновой группы) составляли:  $\delta h_5 = 1,62$  мм (4,43 % от  $h_{\text{ном}}$ ). 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 %).

При оптимизации режима прокатки, выполненной по результатам компьютерного расчёта по указанной программе, были также увеличены

межклетевые удельные натяжения до оптимального уровня (10 % от величины сопротивления пластической деформации  $\sigma_{ф.плл}$ ).

В табл. 4.2 приведены и сопоставлены параметры рабочего и оптимизированного режимов прокатки и значения продольной разнотолщинности полос. Как видно из табл. 4.2, суммарное относительное обжатие в первой подгруппе клеток в рабочем режиме составило 88,89 %, а в оптимизированном 91,65 %; толщина полосы на входе в 10<sup>у10</sup> клеть в рабочем режиме 4,06 мм, а в оптимизированном 3,05 мм.

Таблица 4.2

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 клеток стана «2000» из подката толщиной 36,55 мм.

Режим	Клеть №	$v_i$ , м/с	$h_i$ , мм	$\varepsilon_i$ , %	$\varepsilon_{\Sigma i}$ , %	$\sigma_{ф.плл}$ , МПа	$\mu_i$ , б/п	$\sigma_i^*$ , МПа	$t_i$ , °С	$P_i$ , МН	$\delta h_i$ , 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:  $\sigma_i$  – удельное натяжение за  $i$ -ой клетью.

Благодаря уменьшению в 1,33 раза толщины полосы на входе в 10<sup>у10</sup> клеть 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 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. 4.2 в качестве графической иллюстрации эффекта оптимизации режима прокатки представлены, по аналогии с рис. 1.3, графические зависимости (3.1) и (3.2) для десятой клетки (первой во второй подгруппе) при рабочем и оптимизированном режимах. Из графиков видно, что уменьшение толщины полосы на входе в 10<sup>ю</sup> 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 %).

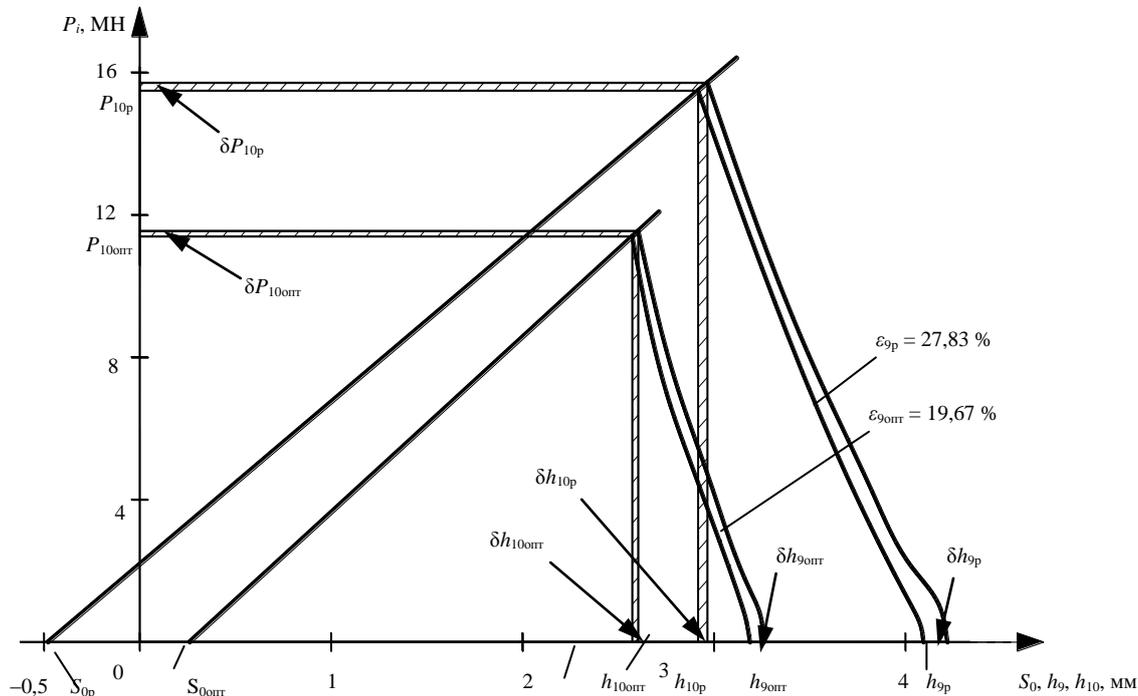


Рисунок 7 – Сопоставление продольных разнотолщинностей полосы на выходе из 10<sup>й</sup> клетки чистовой группы ШПСГП «2000» при обычной технологии («р» – рабочий режим) и при оптимизированном режиме прокатки («опт»).

### 4.3 Анализ точности методики компьютерной оптимизации режима прокатки полос на ШПСГП

По аналогии с п. 4.2 были рассчитаны на ЭВМ и реализованы оптимизированные режимы горячей прокатки полос толщиной 2,0 – 3,5 мм и шириной 1020 – 1625 мм в чистой группе ШПСГП «2000» ЧерМК ОАО «Северсталь». Рекомендуемые диапазоны обжатий и удельных межклетевых натяжений представлены в таблицах 4.3 и 4.4.

Таблица 4.3

Рекомендуемые значения обжатий

0 / / / 3 Диапазон толщины подката с черновой группы для всех режимов: 37 – 34 мм*.								
Толщина проката, мм	Ширина проката, мм	Диапазон относительных обжатий по клетям, %						
		6	7	8	9	10	11	12
2,3 – 2,49	до 1450	55-50	50-47	47-45	30-26	20-17	12-10	9-8,0
	св. 1450	50-47						
2,5– 2,74	все ширины	50-45,6	50-42,5	46-43	30-25	19-16,5	10-9	8,3-7
2,75– 3,0	все ширины	50-41,2	42,5-40	43,7-41,5	32-30	22-19	11-9	9,1-8
3,01– 3,2	все ширины	50-41,2	46,7-40	41,7-39	32-23	22-14,4	11-9	9,1-8,5
3,21– 3,5	все ширины	50-45,6	46,7-40	39-37	25-23	16-14,4	9-8,4	8,6-7,9

Примечание\*: Меньшему значению толщины прокатываемой полосы соответствует большее обжатие в каждой клетке чистой группы стана.

Таблица 4.4

Рекомендуемые диапазоны значений удельных межклетевых натяжений

Удельные межклетевые натяжения $\sigma_i^*$ , МПа					
Клеть №					
6	7	8	9	10	11
<b>13-15</b>	<b>17-19</b>	<b>23-25</b>	<b>27-29</b>	<b>32-34</b>	<b>32-34</b>

Примечание:  $\sigma_i^*$  - натяжение за  $i$ -ой клетью. Большие значения натяжений соответствуют прокатке более толстых полос.

Информация о расхождениях измеренной и расчётной продольной разнотолщинности полос, по аналогии с п 3.2, полученная в результате промышленной апробации алгоритма оптимизации, была обработана с помощью программного пакета «*Statistica*», статистический ряд расхождений содержал 202 члена (проанализировано 202 профилограммы продольной разнотолщинности полос).

Для наглядного представления статистических распределений на рисунке 4.3 представлена гистограмма, а в таблицах 4.5 и 4.6 – количественные данные и характеристики распределений.

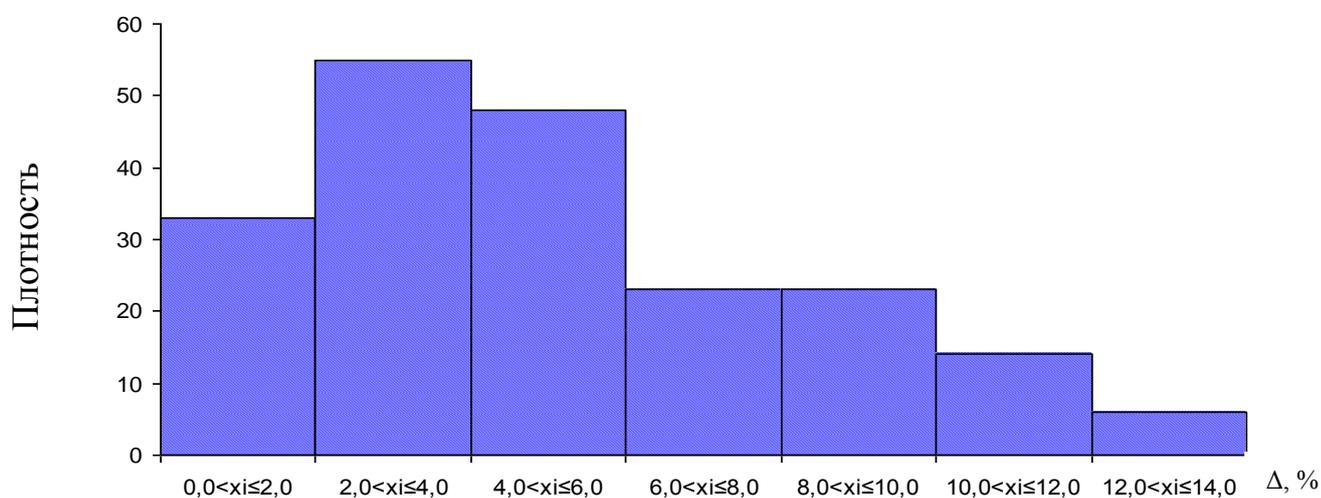


Рис. 4.3. Гистограмма распределения погрешностей расчёта продольной разнотолщинности полос при оптимизации процесса горячей прокатки

Таблица 4.5

Частота погрешностей расчета продольной разнотолщинности по оптимизированным режимам прокатки

Интервал погрешности, %	Частота (число случаев)	Накопленная частота	Частота, %
$0,0 < x_i \leq 2,0$	33	33	16,34
$2,0 < x_i \leq 4,0$	55	88	27,23
$4,0 < x_i \leq 6,0$	48	136	23,76
$6,0 < x_i \leq 8,0$	23	159	11,38
$8,0 < x_i \leq 10,0$	23	182	11,38
$10,0 < x_i \leq 12,0$	14	296	6,93
$12,0 < x_i \leq 14,0$	6	202	2,97

Статистические характеристики распределения погрешностей расчёта продольной разнотолщинности при оптимизации режимов горячей прокатки

Параметр	Продольная разнотолщинность
Среднее значение $x_{в}$ , %	5,19
Минимум, %	0,12
Максимум, %	14,0
Мода, %	-
Дисперсия $D_{в}$ , %	11,59
Среднее квадратическое отклонение $\sigma$ , %	2,74

Анализ гистограммы и таблиц позволил 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. Средняя величина колеблемости погрешности расчёта вокруг среднего значения (среднее квадратическое отклонение  $\sigma$ ) составила для расхождения расчётных и измеренных значений продольной разнотолщинности – 2,74 %, основная масса погрешностей (приблизительно 65 %) лежит в интервале 4,81-5,38 %.

По результатам опытно-промышленной проверки оптимизированных режимов горячей прокатки (табл. 4.3) на ШПСГП «2000» 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 алгоритм оптимизации технологических режимов горячей прокатки по критерию «минимум продольной разнотолщинности» является достоверным и может быть использован для совершенствования технологии горячей прокатки полос с требованиями точности к колебаниям толщины по всей площади  $\pm 2$  % от номинальной толщины.

#### **Выводы по главе 4**

1. Для уменьшения колебаний продольной разнотолщинности горячекатаных полос в непрерывной чистовой группе клетей широкополосного стана разработана и реализована в виде компьютерной программы методика оптимизации режимов горячей прокатки по критерию «минимум продольной разнотолщинности».

2. По результатам опытно-промышленной проверки оптимизированных режимов горячей прокатки на ШПСГП «2000» по критерию «минимум продольной разнотолщинности», по сравнению с рабочими режимами, продольная разнотолщинность для 106 полос уменьшилась в 1,62–2,14 раза.

3. Алгоритм оптимизации технологических режимов горячей прокатки по критерию «минимум продольной разнотолщинности» является достоверным и может быть использован для совершенствования технологии горячей прокатки полос с требованиями точности к колебаниям толщины по всей площади  $\pm 2\%$ .

## **5. Промышленные испытания оптимизированных режимов горячей прокатки полос в чистовой группе ШПСГП «2000»**

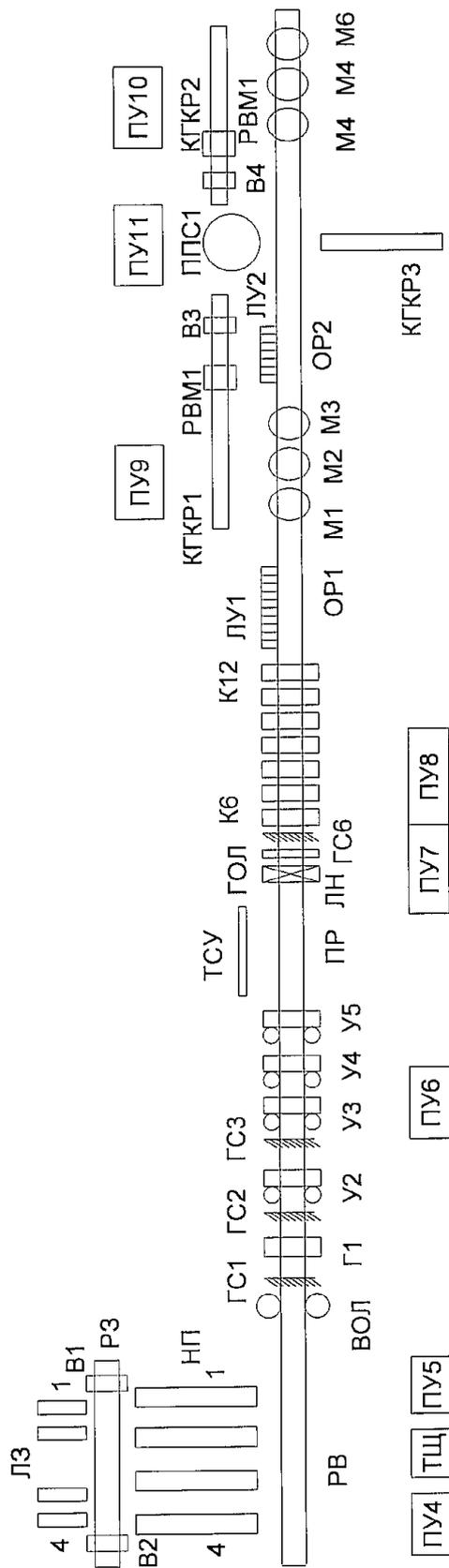
### **5.1 Общая характеристика ШПСГП «2000»**

Сортамент ШПСГП «2000» включает горячекатаные листы и полосы толщиной от 1,2-1,5 мм до 16-25 мм, шириной 800-1820 мм. Полосы толщиной до 3,9 мм составляют свыше половины всего объема производства; выпуск полос толщиной 4-7 мм и 8-15 мм примерно одинаков. Исходным материалом для производства широкополосной стали служат слябы: катаные с размерами: толщина – 90-350 мм, ширина – 600-1200 мм, длина – 1500-11000 мм; литые толщиной 100-350 мм при максимальной ширине до 1340 мм; масса слябов до 30 т и имеет тенденцию к увеличению до 36 т.

Схема расположения основного оборудования стана представлена на рис. 5.1.

Температура нагрева слябов перед прокаткой в зависимости от химического состава и назначения стали составляет в большинстве случаев 1150-1300°C. Нагретые до требуемой температуры слябы поступают от нагревательных печей в валки вертикального окалиноломателя, горизонтальной клетки дуо, универсальные клетки кварто №№2-5. Раскат после черновой группы подаётся на промежуточный рольганг, в конце которого установлены летучие ножницы для обрезки концов подката.

Общее обжатие в чистовой группе составляет 10-30 % от суммарного обжатия по всему стану. Применяемые обжатия последовательно уменьшаются от первой (максимальные обжатия 50-55%) к последней (до 15-8%) клетки. Между чистовыми клетями расположены петледержатели, обеспечивающие натяжение полосы в процессе прокатки; устройства для гидросбива окалина, которые используют и для понижения температуры при прокатке толстых полос, а также направляющие линейки и проводки.



ЛЗ – линии загрузки №1-4  
 В1, В2 – весы для взвешивания слябов  
 РЗ – рольганг загрузки  
 НП – нагревательные печи №1-4  
 РВ – рольганг выдачи  
 ПУ – посты управления №4-11  
 ТЩ – тепловой щит  
 ВОЛ – вертикальный окалиномател  
 ГС – гидробивы №1,2,3,6  
 Г1 – горизонтальная клеть Дуо  
 У – универсальные клетки №2-5

ПР – промежуточный рольганг  
 ТСУ – теплоберегающая установка  
 ЛН – летучие ножицы  
 ГОЛ – горизонтальный окалиномател  
 К – клетки Кварто №6-12  
 ОР – отводящие рольганги №1,2  
 ЛУ – ламинарные установки №1,2  
 М – моталки №1-6  
 КГКР – конвейера горячекатаных рулонов №1-3  
 РВМ – рулонно-вязальные машины №1,2  
 В3, В4 – весы для взвешивания рулонов

Рис. 5.1 – Схема расположения основного оборудования ШПСГП 2000

Для выравнивания температуры по длине полосы прокатку в чистовой группе ведут с ускорением. После прокатки в чистовой группе клетей полоса поступает на отводящий рольганг, где в процессе транспортирования ее подвергают охлаждению водой сверху и снизу из душирующих устройств, а затем сматывают в рулон одной из моталок, и по конвейеру рулоны поступают в отделение отделки горячекатаной продукции.

Основой оборудования чистовой группы ШПСГП «2000» являются рабочие клетки «кварто» с опорными валками большого диаметра ( $D_{оп} = 1600$  мм), рабочими валками меньшего диаметра ( $D_p = 920 - 800$  мм) и массивными станинами закрытого типа, отличающимися большой жесткостью.

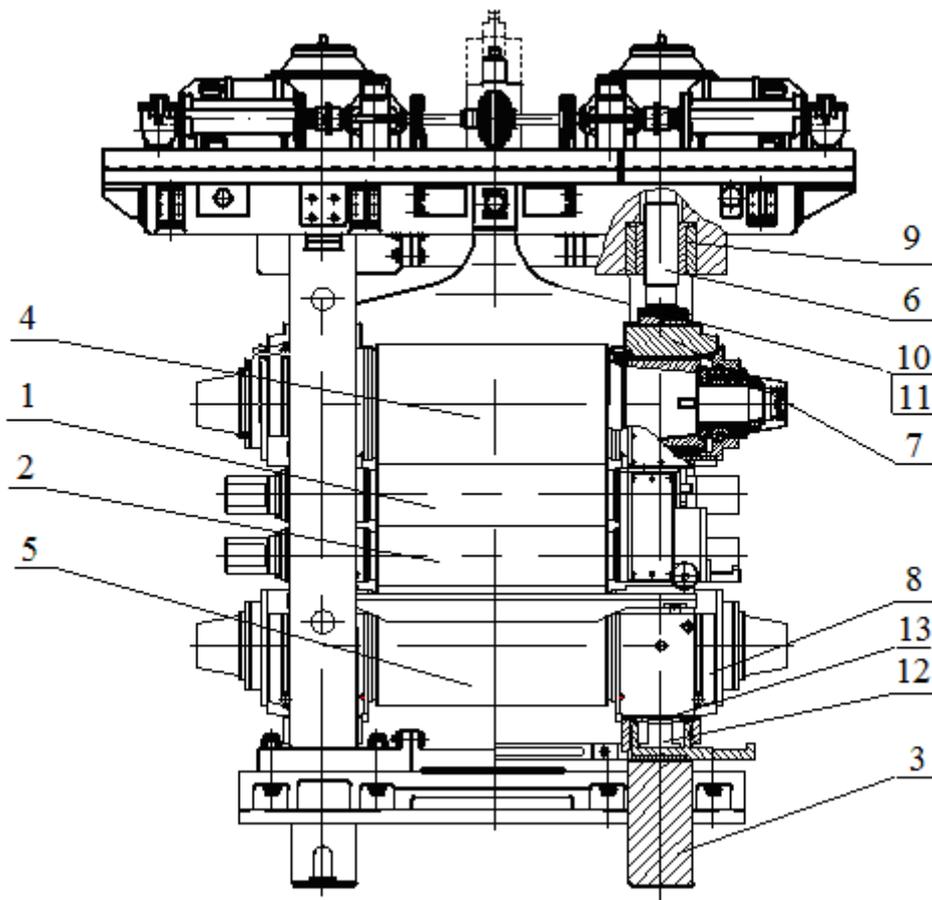


Рис. 5.2 – Конструктивное исполнение клетки «кварто»: 1 и 2 – рабочие валки; 3 – станина закрытого типа; 4 и 5 – опорные валки; 6 – нажимной винт; 7 и 8 – подушки верхнего и нижнего валков соответственно; 9 – нажимная гайка; 10 – подпятник нажимного винта; 11 – месдоза нажимного винта; 12 – опора подушки нижнего опорного валка; 13 – месдоза нижней подушки.

Конструктивное исполнение валкового узла рабочей клетки чистовой группы ШПСГП «2000» и его установка в станинах клетки «кварто» показаны в разрезе осевой вертикальной плоскостью на рис. 5.2, а подробные технические характеристики клеток представлены в Приложении 3. Регулирование зазора между валками производится нажимным устройством рабочей клетки по сигналу, поступающему от датчиков толщины или от датчиков усилия, которые смонтированы в месдозах нажимных винтов и нижних подушках.

Высокая жесткость в вертикальной плоскости, создаваемая массивными опорными валками, позволяет прокатывать полосы минимальной толщиной до 2,0-3,5 мм с минимальными допусками, которые регламентированы существующими стандартами. Подробный расчёт модуля жёсткости и упругих деформаций деталей клеток кварто (рис. 5.2) чистовой группы ШПСГП «2000» для режимов горячей прокатки табл. 4.2 представлен в Приложении 4.

## 5.2 Анализ взаимосвязи требований к точности холоднокатаных автомобильных листов и горячекатаных полос, используемых в качестве подката для их холодной прокатки

Требования к точности автомобильных холоднокатаных листов, выпускаемых российскими металлургическими предприятиями, в первом десятилетии XXI века повысились в связи с организацией в Российской Федерации производства легковых автомобилей ведущих зарубежных автопроизводителей.

Один из основных показателей точности – колебания толщины по всей площади листа. Как видно из табл. 5.1, ГОСТ 19904-90, которым ранее руководствовались российские металлурги, допускает отклонения от номинальной толщины автомобильных листов, не превышающие 5,5-8,3 %, в то время, как, согласно стандартам заводов «Форд» и «Дженерал Моторс», в которых установлены самые жёсткие требования, по сравнению со стандартами других автомобильных заводов, эти отклонения не должны превышать 2,2-3,3 %.

Таблица 5.1

Допуски на отклонения от номинальной толщины холоднокатаных листов, установленные разными стандартами (диапазоны номинальных толщин 0,5-0,9 мм, номинальных ширин 1000-1500 мм)

Стандарт	Номинальная толщина, мм	Допускаемые отклонения от номинальной толщины	
		мм	%
ГОСТ 19904-90, Россия	0,6–0,9	высокая точность ±0,05	±(8,3–5,5)
		повышенная точность ±0,06	±(10–6,7)
ES6 G91-1N260-AA (2008) «Форд»	0,5–0,9	±0,02	±(3,3–2,2)
B53 3072 «Пежо»	0,57–0,8	±0,03	±(5–4,4)
	0,82–1,37	±0,04	±(5–4,4)
RENAULT 11-00-214/-D-02 «Рено»	0,6–0,75	±0,03	±(5–4,4)
	0,8–1,1	±0,04	±(5–4,4)
GMW3234 «General Motors»	0,5–0,94	±0,02	±(3,3–2,2)

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 [39].

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  $\delta h_{\text{ном}}^{\text{дон}} = +0,01 h_{\text{ном}}$  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.

### 5.3 Промышленная реализация установленных требований к горячекатаным полосам

Чтобы выполнить требования к горячекатаным полосам, изложенные в п. 5.2, мы разработали более жёсткие нормы для стандарта предприятия (СТП), регламентирующего выпуклость поперечного профиля горячекатаных полос (табл. 5.2).

Таблица 5.2

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 табл. 5.2, 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 табл. 5.2.

Значения шлифовочных вогнутостей рабочих валков определяли численным методом по методике [40] с учётом их упругих деформаций и теплового профиля. Усреднённое значение тепловой выпуклости рабочих валков определяли, обработав базу данных АСУ ТП ШПСГП «2000», а также используя результаты исследования теплового режима валков данного стана, содержащиеся в работе [41].

Полученные таким методом усреднённые величины тепловых выпуклостей оказались равными:

- на длине  $L$  бочки валков:  $\Delta D_{\text{тепл.}L} = 0,5$  мм;
- на ширине полосы  $b$ :  $\Delta D_{\text{тепл.}b} \approx 0,5$  мм.

Скорректированные величины шлифовочных вогнутостей рабочих валков приведены в табл. 5.3 в сопоставлении с вогнутостями, принятыми по действовавшей технологии.

Из табл. 5.3 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.

## 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 табл. 4.3 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 [35]:  $(0,01 - 0,12)\sigma_{ф.пл.i}$ . После изложенных подготовительных мероприятий включили в действие разработанную нами методику компьютерной оптимизации технологических режимов горячей прокатки по критерию «минимум продольной разнотолщинности», подробно описанную в гл. 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 (табл. 5.3), режимы обжатий и натяжений (табл. 4.2 и 4.3) для разных профилеразмеров полос, причём потребовалось определённое время на психологическую адаптацию технологического персонала к новым требованиям СТП и операционных карт, касающихся уменьшению допусков по толщине поперечного и продольного профиля. 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  $h_{\text{НОМ}}$  [39].

Затем была осуществлена холодная прокатка этого подката на 5<sup>ти</sup> клетевом стане «1700». Обработка данных, полученных из АСУ ТП 5<sup>ти</sup> клетевого 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  $\pm 2$  % от номинальной толщины  $h_{\text{НОМ}}$ , составила 93–96 % (в среднем 95 %) от общей длины рулона [39].

На основании этих результатов принято решение внедрить разработанные с участием автора технологические решения в производство на ЧерМК ОАО «Северсталь» (Приложение 5).

### **Вывод по главе 5**

С использованием критерия «минимум продольной разнотолщинности» разработаны и успешно испытаны в чистовой группе ШПСГП «2000» оптимизированные технологические режимы горячей прокатки полос, предназначенных в качестве подката для холодной прокатки полос автомобильного сортамента. Установлено, что при использовании оптимизированных технологических режимов горячей прокатки обеспечивается получение автомобильных листов с колебаниями толщины по всей площади, не превышающими  $\pm 2$  % от номинальной толщины.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 расчёта 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 расчёта 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.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гарбер Э.А. Распределение контактных напряжений по длине очага деформации при прокатке тонких широких полос. Производство проката. № 5. 2005. – С. 3-12.
2. Э.А.Гарбер, И.А.Кожевникова, П.А.Тарасов, А.А.Завражнов, А.И.Трайно. Моделирование контактных напряжений и усилий горячей прокатки тонких широких полос с учетом зоны прилипания и упругих участков очага деформации. Металлы. № 2. 2007. – С. 26-34.
3. Гарбер Э.А., Кожевникова И.А. Сопоставительный анализ напряженно-деформированного состояния металла и энергосиловых параметров процессов горячей и холодной прокатки тонких широких полос. Производство проката. № 1. 2008. – С. 10-15.
4. Гарбер Э.А., Кожевникова И.А., Тарасов П.А. Расчет усилий горячей прокатки тонких полос с учетом напряженно-деформированного состояния в зоне прилипания очага деформации. Производство проката. № 4. 2007. – С. 7-15.
5. Гарбер Э.А., Кожевникова И.А., Тарасов П.А. Уточненный расчет мощности двигателей главного привода широкополосных станов горячей прокатки. Производство проката. № 10. 2007. – С. 5-12.
6. Э.А.Гарбер, И.А.Кожевникова, П.А.Тарасов, А.И.Трайно. К вопросу о влиянии трения первого и второго рода на энергосиловые параметры горячей прокатки в клетях кварто. Металлы. № 6. 2007. – С. 47-56.
7. Кожевникова И.А., Гарбер Э.А. Производство проката. Т.1. Кн.1. Развитие теории тонколистовой прокатки для повышения эффективности работы широкополосных станов. – М.: Теплотехник, 2010. – 252 с.
8. Ткалич К.Н., Коновалов Ю.В. Точная прокатка тонких полос. – М.: Металлургия, 1972. – 176 с.
9. Целиков А.И. Теория расчета усилий в прокатных станах. – М.: Металлургиздат, 1962. – 494 с.

10. Целиков А.И., Гришков А.И. Теория прокатки. – М.: Металлургия, 1970. – 356 с.
11. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.
12. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. М.: Металлургия, 1973. – 224 с.
13. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др.; Под общ. ред. В.Г. Сорокина. М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
14. Гиршович Н.Г. Чугунное литье. М.—Л.: Металлургия, 1949. – 708 с.
15. Коновалов Ю.В., Остапенко А.Л., Пономарев В.И. Расчет параметров листовой прокатки. Справочник. – М.: Металлургия, 1986. – 430 с.
16. Теория прокатки. Справочник/ А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин и др. – М.: Металлургия, 1982. – 335 с.
17. Зюзин В.И., Бровман М.Я., Мельников А.Ф. Сопротивление деформации сталей при горячей прокатке. М.: Металлургия, 1964. – 270 с.
18. Андреюк Л.В., Тюленев Г.Г. // Сталь. – 1972. – № 9. – С. 825-828.
19. Андреюк Л.В., Тюленев Г.Г., Прицкер Б.С. // Сталь. – 1972. – № 6. – С. 522-523.
20. И.М. Меерович, А.И. Герцев, В.С. Горелик, Э.Я. Классен. Повышение точности листового проката. – М.: Металлургия, 1969. – 264 с.
21. Машины и агрегаты металлургических заводов / Т.З. Машины и агрегаты для производства и отделки проката / А.И. Целиков, П.И. Полухин, В.М. Гребенник и др. – М.: Металлургия, 1969. – 262 с.
22. Железнов Ю.Д. Прокатка ровных листов и полос. – М.: Металлургия, 1971. – 200 с.
23. Григорян Г.Г., Железнов Ю.Д., Черный В.А., Кузнецов Л.А., Журавский А.Г. Настройка, стабилизация и контроль процесса тонколистовой прокатки. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.
24. Луговской В.М. Алгоритмы систем автоматизации листовых станов. – М.: Металлургия, 1974. – 320 с.

25. Гарбер Э. А., Кожевникова И. А., Тарасов П. А. Эффективные режимы горячей прокатки тонких полос на широкополосных станах. Производство проката. № 1. 2009. - С. 10-16.
26. Гарбер Э. А., Поспелов И.Д., Кожевникова И. А. Влияние фактического химического состава и упругих свойств полосы и валков на точность расчетов энергосиловых параметров широкополосных станов горячей прокатки. Производство проката. № 8. 2011. - С. 2-7.
27. Гарбер Э. А., Поспелов И.Д., Кожевникова И. А. Энергосилового расчет широкополосных станов горячей прокатки с учетом влияния температуры на упругие свойства горячекатаных тонких полос. Вестник ЧГУ. 2011. №3. - С. 9-13.
28. Э.А. Гарбер, М.В. Хлопотин и др. Промышленные испытания усовершенствованных профилировок рабочих валков на широкополосном стане горячей прокатки // Производство проката. 2008. №4. С. 18-22.
29. Э.А. Гарбер, М.В. Хлопотин, А.В. Кожевников, Е.С. Попов, А.Ф. Савиных, Р.Б. Палигин. Исследование неустойчивости поперечного профиля полос на непрерывных широкополосных станах горячей прокатки// Производство проката. 2010. №2. с. 2-9
30. Э.А. Гарбер, М.В. Хлопотин, А.В. Кожевников, Е.С. Попов, А.Ф. Савиных, Р.Б. Палигин. Стабилизация технологических режимов широкополосных станов для улучшения качества поперечного профиля горячекатаных полос// Сталь. 2010. №7. 56-60с.
31. 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.
32. 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.

33. Garber, E.A.. Simulation of the Longitudinal Thickness Deviation of the Steel Strips Hot Rolled in the Continuous Group of a Broad-Strip Mill / E.A. Garber, I.D. Pospelov, A.I. Traino, A.F. Savinykh, N.Yu. Nikolaev, and P.A. Mishnev // Russian Metallurgy. – Vol. 2012. – No. 9. – P. 831–836.
34. Гарбер Э.А., Кожевникова И.А., Тарасов П.А. Уточненный расчет мощности двигателей главного привода широкополосных станов горячей прокатки. Производство проката. № 10. 2007. – С. 5-12.
35. Технология прокатного производства. В 2-х книгах. Кн. 2. Справочник: Беняковский М.А., Богоявленский К.Н., Виткин А.И., и др. М.: Металлургия, 1991. – 432 с.
36. Ефимова М.Р., Петрова Е.В., Румянцев В.Н. Общая теория статистики: Учебник. – М.: ИНФРА-М, 1998. – 416 с.
37. Боровиков В.П., Боровиков И.П. STATISTICA: Статистический анализ и обработка данных в среде Windows. – М.: Издательский дом «Филин», 1998. – 608 с.
38. Статистика. Учеб. пос. / Харченко Л.П., Долженкова В.Г., Ионин В.Г. – М.: ИНФРА-М, 2005. – 384 с.
39. Промышленная технология производства холоднокатаных автомобильных листов с разнотолщиной по всей площади, не превышающей  $\pm 2\%$  / Э.А. Гарбер, М.А. Тимофеева, И.Д. Пospelov, С.И. Павлов, П.А. Мишнеv, И.А. Дятлов // Производство проката. – 2012. – № 6. – С. 10–14.
40. Профилирование валков широкополосных станов с применением метода конечных элементов / Э.А. Гарбер, Н.Л. Болобанова // Производство проката. – 2012. – № 6. – С. 14–20.
41. Повышение эффективности охлаждения валков широкополосного стана горячей прокатки с использованием адаптивных математических моделей теплового баланса / Э.А. Гарбер, М.В. Хлопотин, Е.С. Попов, А.Ф. Савиных, А.В. Голованов // Производство проката. – 2009. – № 4. – С. 12–24.

**Алгоритм усовершенствованного энергосилового расчета на основе  
упругопластической модели очага деформации**

Исходные данные: Химический состав прокатываемой стали,  $h_0, h_{i-1}, h_i, h_k, b, R, \mu_i, \sigma_{i-1}, \sigma_i, t_0, t_k, t_{\delta a3}, \nu, \nu_B, \nu_{II}, E_B, E_{II\delta a3}$

$$1. S\sigma_{o,d} = 66,8 + 0,1[(K'_1 \cdot X_1 + K''_1 \cdot X_1^{1,5}) + \dots + (K'_{13} \cdot X_{13} + K''_{13} \cdot X_{13}^{1,5})];$$

$$2. a = 0,126 + 0,01[(l'_1 \cdot X_1 + l''_1 \cdot X_1^{1,5}) + \dots + (l'_{13} \cdot X_{13} + l''_{13} \cdot X_{13}^{1,5})];$$

$$3. b = 0,125 + 0,01[(m'_1 \cdot X_1 + m''_1 \cdot X_1^{1,5}) + \dots + (m'_{13} \cdot X_{13} + m''_{13} \cdot X_{13}^{1,5})];$$

$$4. c = -2,82 + 0,01[(n'_1 \cdot X_1 + n''_1 \cdot X_1^{1,5}) + \dots + (n'_{13} \cdot X_{13} + n''_{13} \cdot X_{13}^{1,5})].$$

$$5. \Delta h_i = h_{i-1} - h_i;$$

$$6. \varepsilon_i = \frac{h_{i-1} - h_i}{h_{i-1}} 100\%;$$

$$7. \Gamma = \frac{t_0 - t_k}{h_0 - h_k} h_k;$$

$$8. t_i = t_0 - \Gamma \left( \frac{h_0}{h_i} - 1 \right);$$

$$9. f\left(\frac{t_i}{t_{\delta a3}}\right) = \begin{cases} 1,013 - 8,6 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{t_i}{t_{\delta a3}}\right)^2 - 8,14 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{t_i}{t_{\delta a3}}\right), & \text{если } 0 < t_i < 910 \text{ } ^\circ\text{C}; \\ 0,657 - 3,16 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{t_i}{t_{\delta a3}}\right), & \text{если } 910 \leq t_i \leq 1100 \text{ } ^\circ\text{C}. \end{cases};$$

$$10. E_{IIi} = E_{II\delta a3} \cdot f\left(\frac{t_i}{t_{\delta a3}}\right);$$

$$11. l_\delta = \sqrt{R\Delta h};$$

$$12. u_i = \frac{\nu}{l_\delta} \varepsilon_i;$$

$$13. \sigma_{\phi,ni} = S\sigma_{o,d} u_i^a (10\varepsilon_{\Sigma i})^b \left(\frac{t_i}{1000}\right)^c;$$

$$14. \Delta h_{1ynp} = h_{i-1} \frac{\sigma_{\phi.nl}}{E_{\Pi}};$$

$$15. \Delta h_{2ynp} = h_i \frac{\sigma_{\phi.nl}}{E_{\Pi}};$$

$$16. p'_{cpi} = 1,15 \sigma_{\phi.nl};$$

$$17. x_{2ynp} = 8p_{cpi} R \left[ \frac{1-\nu_B^2}{\pi E_B} + \frac{1-\nu_{\Pi}^2}{\pi E_{\Pi}} \right];$$

$$18. x_1 = \sqrt{R \Delta h_i + x_{2ynp}^2};$$

$$19. l_{ci} = x_1 + x_{2ynp};$$

$$20. tg \alpha/2 = \frac{\Delta h_i + \Delta h_{2ynp}}{2x_1};$$

$$21. tg \beta = \frac{\Delta h_{2ynp}}{2x_{2ynp}};$$

$$22. \delta_{i-1} = \frac{\mu_i}{tg \alpha/2};$$

$$23. \delta_i = \frac{\mu_i}{tg \beta};$$

$$24. x_{1ynp} = \frac{\Delta h_{1ynp} x_1}{\Delta h_i + \Delta h_{2ynp}};$$

$$25. x_{nl} = x_1 - x_{1ynp};$$

$$26. D = \frac{E_{\Pi}}{E_{\Pi} - \sigma_{\phi.nl}};$$

$$27. L = \frac{E_{\Pi} - \sigma_{\phi.nl}}{\sigma_{\phi.nl}};$$

$$28. p_1 = 1,15 E_{\Pi} \left\{ \frac{1}{\delta_{i-1}} + \frac{L}{\delta_{i-1} + 1} \left[ \left( \frac{\delta_{i-1} - 1}{(\delta_{i-1} + 1) \delta_{i-1}} - \frac{\sigma_{i-1}}{1,15 E_{\Pi}} \right) (D^{\delta_{i-1} + 1} - 1) - 2 \ln D \right] \right\};$$

$$29. h_{1ynp} = h_{i-1} - \Delta h_{1ynp};$$

$$30. h_{2ynp} = h_i - \Delta h_{2ynp};$$

$$31. p_{1max} = 1,15E_{II} \left\{ \frac{1}{\delta_{i-1}} - \frac{2}{\delta_{i-1}+1} \left( \frac{h_{1ynp}}{h_{i-1}} \right) + \left( \frac{h_{i-1}}{h_{1ynp}} \right)^{\delta_{i-1}} \left[ \frac{\delta_{i-1}-1}{(\delta_{i-1}+1)\delta_{i-1}} - \frac{\sigma_{i-1}}{1,15E_{II}} \right] \right\};$$

$$32. p_{4max} = 1,15E_{II} \left\{ \frac{1}{\delta_i} - \frac{2}{\delta_i+1} \left( \frac{h_{2ynp}}{h_i} \right) + \left( \frac{h_i}{h_{2ynp}} \right)^{\delta_i} \left[ \frac{\delta_i-1}{(\delta_i+1)\delta_i} - \frac{\sigma_i}{1,15E_{II}} \right] \right\};$$

$$33. h_H = \frac{2h_{1ynp} \operatorname{tg} \alpha / 2 [(p_{4max} - p_{1max}) / 1,15\sigma_{\phi.n.l} - \ln h_{2ynp} + \ln h_{1ynp}] - h_{1ynp} + h_{2ynp}}{2 \operatorname{tg} \alpha / 2 [(p_{4max} - p_{1max}) / 1,15\sigma_{\phi.n.l} - \ln h_{2ynp} + \ln h_{1ynp}] - \ln h_{1ynp} + \ln h_{2ynp}};$$

$$34. p_{23} = \frac{1,15\sigma_{\phi.n.l}}{h_{2ynp} - h_{1ynp}} \left\{ \left[ 1 + \frac{0,5}{\operatorname{tg} \alpha / 2 (h_{1ynp} - h_H)} \right] [h_{2ynp} (\ln h_{2ynp} - 1) - h_{1ynp} (\ln h_{1ynp} - 1)] - \right.$$

$$\left. \frac{0,25}{\operatorname{tg} \alpha / 2 (h_{1ynp} - h_H)} \frac{(h_{2ynp}^2 - h_{1ynp}^2)}{(h_{1ynp} - h_H)} + \frac{p_{1ynp}}{1,15\sigma_{\phi.n.l}} + \frac{0,5}{\operatorname{tg} \alpha / 2 (h_{1ynp} - h_H)} \frac{h_{1ynp}}{(h_{1ynp} - h_H)} - \left[ 1 + \frac{0,5}{\operatorname{tg} \alpha / 2 (h_{1ynp} - h_H)} \right] \ln h_{1ynp} (h_{2ynp} - h_{1ynp}) \right\};$$

$$35. p_4 = 1,15E_{II} \left\{ \frac{1}{\delta_i} + \frac{L}{\delta_i+1} \left[ \left( \frac{\delta_i-1}{(\delta_i+1)\delta_i} - \frac{\sigma_i}{1,15E_{II}} \right) (D^{\delta_i+1} - 1) - 2 \ln D \right] \right\};$$

$$36. p_{cpi} = \frac{1}{l_{ci}} (p_1 x_{1ynp} + p_{23} x_{n.l} + p_4 x_{2ynp});$$

$$37. P_i = p_{cpi} \cdot l_{ci} \cdot b.$$

## Приложение 2

### Рабочие режимы горячей прокатки полос в чистовой группе ШПСГП «2000»

Таблица 1

Рабочий режим №1 прокатки полосы из стали DC04 размером 2,0x1105 мм (толщина подката  $h_0 = 44,78$  мм)

Клеть №	$v_i$ , м/с	$h_i$ , мм	$\varepsilon_i$ , %	$\varepsilon_{\Sigma i}$ , %	$\sigma_{ф.пл}$ , МПа	$\mu_i$ , б/р	$\sigma_i$ , МПа	$t_i$ , °С	$p_{ср}$ , МПа	$P_i$ , МН		$\Delta P_i$ , %
										расч.	изм.	
6	1,0	20,92	53,28	53,28	135,3	0,49	8	987	205	24,16	22,86	5,7
7	2,08	9,77	53,3	78,18	173,5	0,44	8	979	292	25,1	24,2	3,66
8	3,36	6,2	36,54	86,15	204,5	0,38	12	967	338	15,35	14,42	6,48
9	4,89	4,26	31,29	90,48	237	0,33	20	946	423,5	15,86	16,31	2,73
10	6,89	3,01	29,34	93,28	277,6	0,29	20	922	434,6	13,59	13,88	2,04
11	9,04	2,31	23,54	95,2	335	0,255	14	895	444	14,56	14,13	3,03
12	10,48	2,069	10,04	95,38	353,6	0,24	5	867	500	10,33	10,19	1,37

Химический состав: C = 0,07 %; Mn = 0,28 %; Si = 0,03 %; Cu = 0,002%; Ni = 0,04 %; Cr = 0,03 %; Al = 0,03 %.

Таблица 2

Рабочий режим №2 прокатки полосы из стали DC04 размером 2,0x1105 мм (Толщина подката  $h_0 = 35,66$  мм)

Клеть №	$v_i$ , м/с	$h_i$ , мм	$\varepsilon_i$ , %	$\varepsilon_{\Sigma i}$ , %	$\sigma_{ф.пл}$ , МПа	$\mu_i$ , б/р	$\sigma_i$ , МПа	$t_i$ , °С	$p_{ср}$ , МПа	$P_i$ , МН		$\Delta P_i$ , %
										расч.	изм.	
6	1,12	18,98	46,78	46,78	140,5	0,5	8	978	215	21,37	20,6	3,7
7	2,14	9,77	48,89	78,34	178,5	0,44	8	972	317	24,1	24,89	3,27
8	3,36	6,04	37,73	86,51	203	0,38	12	947	349	16,24	16,24	0
9	5,08	4,12	31,29	90,8	235,7	0,33	20	930	444	16,87	16,54	2,05
10	7,09	2,96	28,16	93,39	294,5	0,28	20	909	453	13,94	14,06	0,86
11	9,08	2,34	20,95	94,77	345	0,258	14	886	550	15,14	15,48	2,23
12	10,64	2,059	12	95,4	373,8	0,25	5	854	512	11,39	11,34	0,44

Химический состав: C = 0,08 %; Mn = 0,33 %; Si = 0,045 %; Cu = 0,003 %; Ni = 0,04 %; Cr = 0,035 %; Al = 0,035 %.

Таблица 3

Параметры очагов деформации для рабочего режима №2 прокатки полосы из стали DC04 размером 2,0x1105 мм

Параметр	Клеть № 6	Клеть № 7	Клеть № 8	Клеть № 9	Клеть № 10	Клеть № 11	Клеть № 12
$l_{ci}, мм$	107,42	75,05	41,01	33,89	28,3	24,06	19,07
$x_{1упр}, мм$	0,24	0,21	0,185	0,19	0,19	0,27	0,38
$x_{пл}, мм$	104	70,37	36,77	27,97	22,4	17,6	11,64
$x_{2упр}, мм$	3,18	4,47	4,055	5,73	5,71	6,2	7,05
$\frac{x_{1упр} + x_2}{l_{ci}}, \%$	3,19	6,24	10,33	17,47	20,83	26,9	39
$X_i = \frac{x_{нл.омст}}{x_{нл.опер}}$	0,71	0,69	0,62	0,615	0,64	0,655	0,73
$p_{1max}, МПа$	153,9	179,7	203,9	240,6	307,6	435,2	403,1
$p_{4max}, МПа$	142,3	206,6	243,3	341,35	539	925,6	1020
$p_{23max}, МПа$	238	365	441	591	818	1273	1142
$h_{ц}, мм$	27,82	13,19	7,54	4,99	3,45	2,54	2,12

Таблица 4

Параметры очагов деформации для рабочего режима №2 прокатки полосы из стали DC04 размером 2,0x1105 мм

Параметр	Клеть № 6	Клеть № 7	Клеть № 8	Клеть № 9	Клеть № 10	Клеть № 11	Клеть № 12
$l_{ci}, мм$	89,5	68,85	42,16	34,28	27,82	25,025	20,13
$x_{1упр}, мм$	0,24	0,21	0,18	0,19	0,2	0,255	0,35
$x_{пл}, мм$	85,98	63,86	37,69	28,01	21,68	17,22	12,57
$x_{2упр}, мм$	3,28	4,78	4,29	6,08	5,94	7,55	7,21
$\frac{x_{1упр} + x_2}{l_{ci}}, \%$	3,93	7,25	10,62	18,28	22,08	31,17	37,55
$X_i = \frac{x_{нл.омст}}{x_{нл.опер}}$	0,67	0,69	0,62	0,645	0,63	0,7	0,705
$p_{1max}, МПа$	162	198,2	206,5	239	322,5	382,1	430,5
$p_{4max}, МПа$	151,16	224,7	250,8	401,1	563	951,7	1056,3
$p_{23max}, МПа$	254,8	393	457	617	862	1171	1234
$h_{ц}, мм$	24,49	12,56	7,4	4,79	3,37	2,52	2,13

Таблица 5

Рабочий режим №1 прокатки полосы из стали 08Ю размером 2,3x1005 мм (толщина подката  $h_0 = 34,85$  мм)

Клеть №	$v_i$ , м/с	$h_i$ , мм	$\varepsilon_i$ , %	$\varepsilon_{\Sigma i}$ , %	$\sigma_{ф.пл}$ , МПа	$\mu_i$ , б/р	$\sigma_i$ , МПа	$t_i$ , °C	$p_{ср}$ , МПа	$P_i$ , МН		$\Delta P_i$ , %
										расч.	изм.	
6	1,1	19,24	44,79	44,79	132,7	0,49	8	996	208	17,99	18,01	0,11
7	2,14	10,57	45,06	69,67	180,4	0,44	8	970	311	20,86	20,89	0,16
8	3,4	6,2	38,22	81,26	194,6	0,38	12	964	334	16,19	15,9	1,81
9	5,08	4,41	32,47	87,34	258,3	0,33	20	932	450	17,78	17,2	3,35
10	7,09	3,23	26,76	92,78	348,55	0,29	20	896	478	13,57	13,89	2,33
11	9,04	2,58	20,12	92,59	376,3	0,26	14	875	481	11,68	11,82	1,2
12	10,64	2,305	10,66	93,38	382,11	0,243	5	860	413	7,35	7,32	0,4

Химический состав: C = 0,08 %; Mn = 0,38 %; Si = 0,03 %; Cu = 0,012%; Ni = 0,05 %; Cr = 0,045 %; Al = 0,05 %.

Таблица 6

Рабочий режим №1 прокатки полосы из стали SPCEH размером 2,5x1360 мм (толщина подката  $h_0 = 35,0$  мм)

Клеть №	$v_i$ , м/с	$h_i$ , мм	$\varepsilon_i$ , %	$\varepsilon_{\Sigma i}$ , %	$\sigma_{ф.пл}$ , МПа	$\mu_i$ , б/р	$\sigma_i$ , МПа	$t_i$ , °C	$p_{ср}$ , МПа	$P_i$ , МН		$\Delta P_i$ , %
										расч.	изм.	
6	1,35	18,14	48,17	48,17	134,0	0,488	8	966	212	25,98	26,81	3,07
7	2,21	10,82	40,35	69,08	160,9	0,442	8	957	372	22,59	26,42	13,9
8	3,7	6,6	39,0	81,14	197,3	0,378	12	935	356	21,82	20,53	6,3
9	5,33	4,67	29,24	86,66	207,5	0,318	10	919	386	17,55	16,94	3,6
10	7,09	3,54	24,2	89,88	263,5	0,288	10	889	358	12,67	14,06	9,88
11	8,97	2,79	21,41	92,03	315,7	0,263	10	862	412	13,65	15,91	14
12	10,03	2,50	9,28	92,85	314,8	0,252	3	847	299	6,51	6,83	4,5

Химический состав: C = 0,04 %; Mn = 0,14 %; Si = 0,019 %; Cu = 0,025%; Ni = 0,02 %; Cr = 0,019 %; Al = 0,03 %; V = 0,002%.

Таблица 7

Параметры очагов деформации для рабочего режима №1 прокатки полосы из стали 08Ю размером 2,3x1005 мм

Параметр	Клеть № 6	Клеть № 7	Клеть № 8	Клеть № 9	Клеть № 10	Клеть № 11	Клеть № 12
$l_{ci}, мм$	86,6	75,05	41,01	33,89	28,3	24,06	19,07
$x_{1упр}, мм$	0,23	0,21	0,185	0,19	0,19	0,27	0,38
$x_{пл}, мм$	83,18	70,37	36,77	27,97	22,4	17,6	11,64
$x_{2упр}, мм$	3,19	4,47	4,055	5,73	5,71	6,2	7,05
$\frac{x_{1упр} + x_2}{l_{ci}}, \%$	3,96	6,24	10,33	17,47	20,83	26,9	39
$X_i = \frac{x_{нл.омст}}{x_{нл.опер}}$	0,68	0,69	0,62	0,615	0,64	0,655	0,73
$p_{1max}, МПа$	153,0	179,7	203,9	240,6	307,6	435,2	403,1
$p_{4max}, МПа$	156,3	206,6	243,3	341,35	539	925,6	1020
$p_{23max}, МПа$	243	365	441	591	818	1273	1142
$h_{н}, мм$	24,18	13,19	7,54	4,99	3,45	2,54	2,12

Таблица 8

Параметры очагов деформации для рабочего режима №1 прокатки полосы из стали SPCEN размером 2,5x1360 мм

Параметр	Клеть № 6	Клеть № 7	Клеть № 8	Клеть № 9	Клеть № 10	Клеть № 11	Клеть № 12
$l_{ci}, мм$	89,794	61,001	44,994	33,382	26,03	24,376	16,036
$x_{1упр}, мм$	0,22	0,2061	0,1854	0,1798	0,2068	0,2435	0,3118
$x_{пл}, мм$	86,454	56,694	40,46	27,93	21,111	18,336	11,414
$x_{2упр}, мм$	3,1197	4,1013	4,3489	5,2725	4,7127	5,7967	4,311
$\frac{x_{1упр} + x_2}{l_{ci}}, \%$	3,7193	7,0611	10,077	16,333	18,899	24,779	28,827
$X_i = \frac{x_{нл.омст}}{x_{нл.опер}}$	0,6947	0,6544	0,6412	0,6242	0,609	0,6257	0,6083
$p_{1max}, МПа$	154,54	177,78	218,08	228,31	296,32	358,85	361,36
$p_{4max}, МПа$	158,32	208,53	274,22	328,7	434,14	628,62	577,19
$p_{23max}, МПа$	218,18	285,88	383,31	435,1	398,77	465,56	321,56
$h_{н}, мм$	23,258	13,331	8,0997	5,3852	3,9725	3,0658	2,6062

Таблица 9

Рабочий режим №1 прокатки полосы из стали 08Ю размером 3,2x1005 мм (толщина подката  $h_0 = 34,87$  мм)

Клеть №	$v_i$ , м/с	$h_i$ , мм	$\varepsilon_i$ , %	$\varepsilon_{\Sigma i}$ , %	$\sigma_{ф.пл}$ , МПа	$\mu_i$ , б/р	$\sigma_i$ , МПа	$t_i$ , °С	$p_{ср}$ , МПа	$P_i$ , МН		$\Delta P_i$ , %
										расч.	изм.	
6	1,12	19,25	44,79	44,79	134,7	0,491	8	992	211	18,36	18,11	0,85
7	2,14	10,62	44,83	68,92	182,3	0,44	8	967	314	20,91	21,12	0,98
8	3,47	7,11	33,05	79,61	211,6	0,38	12	959	344	14,2	13,86	2,47
9	5,03	5,31	25,32	84,77	236,9	0,32	20	949	331	12,19	11,8	3,3
10	7,09	4,18	21,28	88	272,7	0,28	20	930	374	9,87	10,08	2
11	9,08	3,57	14,59	89,76	332,9	0,257	12	884	390	8,58	8,82	2,75
12	10,64	3,208	10,14	92,84	360,8	0,239	3	868	361	6,58	6,69	1,58

Химический состав: C = 0,068 %; Mn = 0,27 %; Si = 0,023 %; Cu = 0,002%; Ni = 0,04 %; Cr = 0,034 %; Al = 0,02 %.

Таблица 10

Рабочий режим №1 прокатки полосы из стали SPCD размером 4,5x1540 мм (толщина подката  $h_0 = 35,26$  мм)

Клеть №	$v_i$ , м/с	$h_i$ , мм	$\varepsilon_i$ , %	$\varepsilon_{\Sigma i}$ , %	$\sigma_{ф.пл}$ , МПа	$\mu_i$ , б/р	$\sigma_i$ , МПа	$t_i$ , °С	$p_{ср}$ , МПа	$P_i$ , МН		$\Delta P_i$ , %
										расч.	изм.	
6	1,34	22,43	36,39	36,39	117,8	0,477	8	994	178	21,83	24,04	9,17
7	2,09	14,27	36,38	59,53	148,2	0,44	12	976	233	22,7	25,1	10,5
8	2,96	10,11	29,1	71,32	177,8	0,406	14	950	281	19,25	16,46	15,9
9	3,93	7,63	24,53	78,36	195,3	0,367	15	931	314	17,33	15,67	10,6
10	5,01	6,0	21,36	82,98	198,7	0,343	15	890	326	15,27	15,37	0,6
11	5,96	5,07	15,64	85,62	278,1	0,322	16	863	275	10,17	12,12	16
12	6,82	4,5	11,24	87,24	220,9	0,306	4	841	350	11,04	11,31	2,58

Химический состав: C = 0,041 %; Mn = 0,16 %; Si = 0,02 %; Cu = 0,02%; Ni = 0,01 %; Cr = 0,01 %; Al = 0,04 %; V = 0,002 %.

Таблица 11

Параметры очагов деформации для рабочего режима №1 прокатки полосы из стали 08Ю размером 3,2x1005 мм

Параметр	Клеть № 6	Клеть № 7	Клеть № 8	Клеть № 9	Клеть № 10	Клеть № 11	Клеть № 12
$l_{ci}, мм$	86,67	66,532	41,317	31,226	26,583	21,89	18,274
$x_{1упр}, мм$	0,232	0,229	0,216	0,228	0,243	0,335	0,41
$x_{пл}, мм$	83,2	61,57	36,88	26,77	21,18	16,2	12,79
$x_{2упр}, мм$	3,238	4,733	4,221	4,228	5,16	5,361	5,074
$\frac{x_{1упр} + x_2}{l_{ci}}, \%$	4,0	7,46	10,74	14,27	20,33	26,0	30,0
$X_i = \frac{x_{нл.отст}}{x_{нл.опер}}$	0,68	0,68	0,61	0,59	0,59	0,6	0,6
$p_{1max}, МПа$	155,3	202,5	216,5	240,1	252,2	372,2	413,1
$p_{4max}, МПа$	158,9	244,9	254,1	296,7	350,1	549,7	620,1
$p_{23max}, МПа$	247	388	444	518	596	802	849
$h_{ц}, мм$	24,19	13,39	8,45	6,03	4,63	3,802	3,34

Таблица 12

Параметры очагов деформации для рабочего режима №1 прокатки полосы из стали SPCD размером 4,5x1540 мм

Параметр	Клеть № 6	Клеть № 7	Клеть № 8	Клеть № 9	Клеть № 10	Клеть № 11	Клеть № 12
$l_{ci}, мм$	79,589	63,338	44,402	35,868	30,397	23,977	20,995
$x_{1упр}, мм$	0,2299	0,2237	0,226	0,2265	0,2149	0,3154	0,2797
$x_{пл}, мм$	76,641	59,789	40,668	31,363	25,708	19,71	15,783
$x_{2упр}, мм$	2,718	3,3261	3,5082	4,278	4,4735	3,9513	4,9319
$\frac{x_{1упр} + x_2}{l_{ci}}, \%$	3,7039	5,6045	8,4099	12,559	15,424	17,795	24,823
$X_i = \frac{x_{нл.отст}}{x_{нл.опер}}$	0,6429	0,6372	0,6123	0,6035	0,597	0,5822	0,6211
$p_{1max}, МПа$	135,83	163	193,53	211,98	216,2	309,39	241,54
$p_{4max}, МПа$	134,58	174,37	217,55	255	273,13	388,57	361,67
$p_{23max}, МПа$	182,6	241,96	298,64	342,89	364,5	298,02	413,15
$h_{ц}, мм$	26,983	17,207	11,7	8,5981	6,6451	5,4491	4,7066

Приложение 3

Таблица 1

Технические характеристики чистовых клетей №№ 6-12 ШПСГП «2000»

Наименование	Кл.№6	Кл.№7	Кл.№8	Кл.№9	Кл.№10	Кл.№11	Кл.№12
Максимальная масса раската, т	36	36	36	36	36	36	36
Длина раската, м	69-157	92-288	166-450	142-650	160-1030	320-1480	536-2300
Макс. усилие прокатки, МН	38,5	36,0	36,0	32,0	31,0	19,0	17,0
Макс. крутящий момент прокатки, кН*м	2,3	2,3	1,3	1,3	0,8	0,8	0,35
Наибольший момент при захвате металла валками, кНм	280	280	170	130	130	130	85
Макс.доп. относит. Обжатия на ширине: до 1450мм свыше 1450мм	56 % 50 %	55 % 50 %	37 % 35 %	30 % 25 %	25 % 25 %	25 % 25 %	25 % 25 %
Максимальный подъем верхнего валка, мм	270	270	270	270	270	270	270
Расстояние до предыдущей клетки, м	141	6	6	6	6	6	6
Макс./мин. диаметр: раб.; опорных валков, мм	915/860 1600/1460		820/760 1600/1460				
Тип подшип.: Раб.; Опорного валка	771/500ХМ ПЖТ 1180-880		787196ХМ ПЖТ 1180-880				
Мощность двигателя, кВт (2-х якорные)	2x6000	2x6000	2x6300	2x6300	2x6300	2x6300	2x4800
	2x5200	2x5200	2x5200	2x5200	2x5500	2x5500	2x4200

Таблица 1

Расчётные значения модуля (коэффициента) жёсткости и упругих деформаций деталей клеток «кварто» чистовой группы ШПСГП «2000» по методике [21] для технологических режимов табл. 4.2

Узлы и детали клетки	Расчётные значения упругих деформаций по клетям <sup>*</sup> , мм						
	6	7	8	9	10	11	12
Система валков:	$\frac{2,319}{2,468}$	$\frac{2,762}{2,697}$	$\frac{2,081}{2,1}$	$\frac{1,708}{2,094}$	$\frac{1,732}{1,108}$	$\frac{1,485}{0,763}$	$\frac{0,952}{1,014}$
Равномерное сжатие рабочих валков в контакте с прокатываемой полосой	$\frac{0,255}{0,271}$	$\frac{0,32}{0,313}$	$\frac{0,46}{0,42}$	$\frac{0,352}{0,432}$	$\frac{0,378}{0,226}$	$\frac{0,274}{0,143}$	$\frac{0,171}{0,188}$
Равномерное сжатие опорного и рабочего валков	$\frac{1,238}{1,317}$	$\frac{1,318}{1,286}$	$\frac{0,931}{0,94}$	$\frac{0,812}{0,974}$	$\frac{0,81}{0,518}$	$\frac{0,726}{0,372}$	$\frac{0,452}{0,496}$
«Проседание» опорных валков	$\frac{0,826}{0,88}$	$\frac{1,124}{1,098}$	$\frac{0,734}{0,74}$	$\frac{0,544}{0,688}$	$\frac{0,544}{0,364}$	$\frac{0,484}{0,248}$	$\frac{0,302}{0,33}$
Станина	$\frac{0,614}{0,653}$	$\frac{0,73}{0,712}$	$\frac{0,547}{0,552}$	$\frac{0,366}{0,514}$	$\frac{0,366}{0,272}$	$\frac{0,327}{0,168}$	$\frac{0,204}{0,223}$
Нажимной узел	$\frac{0,238}{0,253}$	$\frac{0,274}{0,267}$	$\frac{0,205}{0,207}$	$\frac{0,157}{0,193}$	$\frac{0,157}{0,102}$	$\frac{0,14}{0,072}$	$\frac{0,087}{0,096}$
Подушки опорных валков	$\frac{0,115}{0,122}$	$\frac{0,132}{0,129}$	$\frac{0,099}{0,1}$	$\frac{0,076}{0,093}$	$\frac{0,076}{0,049}$	$\frac{0,068}{0,035}$	$\frac{0,042}{0,046}$
Упругие элементы месдозы и нижней опоры, стакана и подпятника верхней подушки	$\frac{1,184}{1,26}$	$\frac{1,364}{1,332}$	$\frac{1,024}{1,033}$	$\frac{0,782}{0,961}$	$\frac{0,782}{0,508}$	$\frac{0,698}{0,358}$	$\frac{0,435}{0,476}$
Расчётное значение модуля жёсткости, МН/мм	5,35	5,236	5,227	5,114	5,077	5,184	5,189

Примечание: \* – в числителе расчётные значения для рабочего режима, а в знаменателе расчётные значения для оптимизированного режима.



**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**  
**результатов работ**  
 по договору № 986НП/ТД0167 от 22.12.09 г.

**«Исследование факторов, вызывающих разнотолщинность холоднокатаной стали и наличие прикромочных участков полос со сверхнормативной шероховатостью; разработка усовершенствованной технологии её производства с допусками по толщине и шероховатости согласно требованиям заказчиков»**

Краткое описание выполненной работы:

На основании результатов успешных промышленных испытаний рекомендовано внедрить следующие технические мероприятия:

1. Исключить выполнение скосов по краям бочек опорных валков 5<sup>ти</sup> клетового стана «1700» ПХП, одновременно увеличить выпуклость рабочих валков при прокатке металла шириной менее 1200 мм.
2. Усовершенствованные технологические режимы и скорректированные профилировки валков чистовой группы стана «2000» ПГП (перераспределение обжатий, увеличение межклетевых удельных натяжений, уменьшение вогнутости рабочих валков).
3. Усовершенствованные технологические режимы и профилировки рабочих валков 5<sup>ти</sup> клетового стана «1700» ПХП (увеличить скорость прокатки участков со сварными швами до 2,75-3 м/с, увеличенная выпуклость рабочих валков).

Охраноспособный результат: отсутствует.

Срок начала фактического внедрения: 1 декабря 2011 г.

Начальник ПХП

С.И. Павлов

Заместитель директора – главного инженера –  
 начальник ЦТРК дивизиона СРС

Д.В. Коньгин

Старший менеджер ЦТРК

П.А. Мишнев

Главный специалист ЦТРК

В.В. Кузнецов

Руководитель работ от ОАО «Северсталь»

В.Ю. Антонов

*А.Н. Чистяков*

*[Signature]*

*Луценко СВ*

## Заключение по результатам НИОКР

*Наименование работы:* «Исследование факторов, вызывающих разнотолщинность холоднокатаной стали и наличие прикромочных участков полос со сверхнормативной шероховатостью; разработка усовершенствованной технологии её производства с допусками по толщине и шероховатости согласно требованиям заказчиков»

*Номер договора:* 986НП/ТД0167 от 22.12.09 г.

*Получен результат:* положительный.

*Сумма ожидаемой экономической выгоды (дохода):* фактический экономический эффект будет получен, начиная со второго квартала 2012 г.

*Срок, предполагаемый для внедрения:* 1 декабря 2011 г.

*Дата составления:* 27.09.2011 г.

Начальник ПХП

Заместитель директора – главного инженера –  
начальник ЦТРК дивизиона СРС

Старший менеджер ЦТРК 27.09.11

Главный специалист ЦТРК

Руководитель работ от ОАО «Северсталь»

С.И. Павлов

Д.В. Кобылин

П.А. Мишин

В.В. Кузнецов

В.Ю. Антонов