

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова  
Российской академии наук**

На правах рукописи



**БОЛОБАНОВА Наталия Леонидовна**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА  
СТАЛЬНОГО ЛИСТОВОГО ПРОКАТА НА ОСНОВЕ  
ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕГО  
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ**

Специальность 2.6.4 – Обработка металлов давлением

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

Научный консультант:  
Юсупов Владимир Сабитович,  
доктор технических наук

**Москва – 2023**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение .....</b>	<b>6</b>
<b>Глава 1. Современное состояние исследований, практика и перспективы развития вопросов формообразования листового проката</b>	<b>21</b>
1.1 Практические аспекты проблемы формообразования широкой стальной листовой продукции .....	29
1.2 Анализ известных методов описания формообразования листового проката при прокатке в вертикальных и горизонтальных валках .....	28
1.3 Проблемы моделирования формообразования поперечного профиля листового проката и повышения технологического воздействия на профиль при прокатке .....	32
1.3.1 Анализ особенностей моделирования формообразования поперечного профиля листового проката .....	32
1.3.2 Анализ профилировок валков в листопрокатном производстве как фактора технологического воздействия на профиль листового проката, и методов их моделирования .....	39
1.4 Перспективы повышения стойкости и снижения расхода валков прокатных станов .....	47
1.5 Обзор исследований циклического знакопеременного деформационного воздействия на широкий стальной листовой прокат	54
1.5.1 Особенности циклического знакопеременного деформационного воздействия на полосу .....	54
1.5.2 Анализ существующих моделей расчета параметров процесса правки полос на роликовых правильных машинах .....	64
<b>Выводы по главе 1.....</b>	<b>68</b>

<b>Глава 2. Моделирование и исследование формообразования при прокатке слябов в вертикальных и горизонтальных валках .....</b>	<b>71</b>
2.1 Моделирование процесса формообразования раската при черновой прокатке на непрерывном широкополосном стане .....	71
2.2 Исследование влияния технологических параметров процесса черновой горячей прокатки на непрерывном широкополосном стане на величину смещения металла с узкой грани на широкую .....	75
2.2.1 Влияние деформационных режимов прокатки в черновой группе .....	75
2.2.2 Влияние профилировок валков.....	85
2.2.3 Влияние скоростных параметров и геометрии заготовки .....	92
<b>Выводы по главе 2 .....</b>	<b>95</b>
<b>Глава 3. Развитие методов формообразования поперечного профиля листового проката и профилирования валков листопрокатного производства .....</b>	<b>98</b>
3.1 Расчет упругих деформаций и напряжений валковых систем кварто	98
3.2 Моделирование формообразования поперечного профиля листового проката .....	107
3.3 Исследование влияния средств регулирования, профилировок и износа валков на напряженно-деформированное состояние валковой системы .....	116
3.4 Разработка методики выбора профилировок валков .....	133
3.5 Реализация методики выбора профилировки валковой системы толстолиствого стана 5000 .....	136
<b>Выводы по главе 3 .....</b>	<b>142</b>
<b>Глава 4. Исследование и повышение стойкости валков в процессе формообразования широкой стальной полосы при непрерывной прокатке .....</b>	<b>144</b>
4.1 Методологический подход к оценке параметров состояния	144

поверхностного слоя опорных валков .....	
4.2 Определение интенсивности работы опорного валка в клети стана .....	146
4.3 Определение напряжений в межвалковом контакте, исследование и моделирование деформационного упрочнения бочки опорного валка ...	152
4.4 Определение величины износа бочки опорного валка .....	170
4.5. Новый способ определения величины съема металла при шлифовке опорных валков после прокатной кампании .....	174
<b>Выводы по главе 4 .....</b>	<b>179</b>
<b>Глава 5. Исследование процесса формоизменения горячекатаных</b>	
<b>полос при правке в условиях циклической знакопеременной</b>	
<b>деформации для достижения новых возможностей улучшения</b>	
<b>плоскостности стальных полос .....</b>	
	<b>181</b>
5.1 Численное описание процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации .....	181
5.2 Исследование механизма возникновения остаточных напряжений при правке .....	188
5.3 Исследование напряженно-деформированного состояния полос при правке .....	192
5.4 Исследование влияния параметров правки знакопеременным изгибом на неоднородность распределения деформаций и напряжений по толщине горячекатаных полос .....	198
5.4.1 Влияние технологических параметров правки .....	198
5.4.2 Влияние конструктивных параметров роликовых правильных машин .....	203
5.5 Оценка влияния исходной неплоскостности горячекатаных полос на показатели правки .....	207
5.6 Разработка и реализация методики выбора режима правки на роликовых правильных машинах для получения проката для высокотехнологичной резки .....	210

<b>Выводы по главе 5 .....</b>	<b>219</b>
<b>Глава 6. Разработка и внедрение решений по повышению эффективности формообразования листового проката .....</b>	<b>222</b>
6.1 Разработка и внедрение решения по уменьшению величины смещения поверхностных дефектов от кромок раската в направлении середины ширины .....	222
6.2 Разработка и внедрение в производство новых профилировок валков .....	224
6.3 Апробирование и внедрение решений рациональной эксплуатации валков, определяющих процесс формообразования широких стальных полос при прокатке .....	233
6.3.1 Апробирование и внедрение новых требований к эксплуатации опорных валков непрерывного широкополосного стана горячей прокатки .....	233
6.3.2 Реализация мероприятий по рациональной эксплуатации рабочих валков непрерывного стана холодной прокатки .....	240
6.4 Разработка и внедрение технологических режимов правки горячекатаного листового проката, предназначенного для дальнейшей высокотехнологичной резки .....	249
<b>Выводы по главе 6 .....</b>	<b>256</b>
<b>Заключение .....</b>	<b>259</b>
<b>Список литературы .....</b>	<b>264</b>
<b>Приложение. Справка об экономическом эффекте .....</b>	<b>299</b>

## Введение

### **Актуальность темы исследования.**

Темпы развития машиностроения и других отраслей промышленности формируют все возрастающие потребности в высококачественных конструкционных материалах. В первую очередь это относится к листовому прокату. На всех этапах его производства от прокатки слябов до правки форма и размеры листового проката имеют решающее значение для реализации всех остальных свойств. Приобретает особую актуальность получение геометрии проката, соответствующей высшему мировому уровню и применимости для лазерной или плазменной обработки. Требуется уменьшать поперечную разнотолщинность широких стальных полос и обеспечивать минимальное отклонение деталей от плоскостности после лазерной или плазменной резки. Такие высокие конкурентные качества достигаются совершенствованием технологий производства стального листового проката, главным образом, за счет повышения эффективности его формообразования.

Под формообразованием понимается получение заданной формы и размеров стального листового проката на основе деформации, как путем воздействия на технологические режимы, так и за счет влияния формы и размеров основного деформирующего инструмента – листопрокатных валков.

Проблемы формообразования стального листового проката на различных этапах его производства охватывают широкий круг сложных и многообразных процессов и для решения новых практических и научных задач по совершенствованию технологий листопрокатного производства весьма важным является дальнейшее изучение закономерностей взаимосвязи и взаимообусловленности факторов формообразования. При этом по-прежнему не теряют важности проблемы снижения расходного коэффициента металла и прокатных валков с обеспечением бесперебойной работы оборудования и одновременным увеличением объемов производства.

Перечисленное позволяет сделать вывод, что раскрытие новых закономерностей формообразования листового проката на всех этапах производства от прокатки слябов до правки горячекатаного стального листового проката с разработкой комплекса технических и технологических решений по повышению качественных показателей широкой стальной листовой продукции, стойкости деформирующего рабочего инструмента и экономии материальных ресурсов представляют собой актуальную задачу.

**Степень разработанности темы исследования.** Проблемы формообразования стального листового проката на различных этапах его производства являются весьма многоплановыми и многие аспекты изучены недостаточно глубоко и комплексно. К наиболее существенным проблемам можно отнести следующие.

1. Известные методы описания формообразования при горячей прокатке сляба в вертикальных и горизонтальных валках широкополосного стана не позволяют прогнозировать величину смещения поверхностных дефектов от кромок раската в направлении середины ширины, и вопросы разработки новых режимов прокатки и использования имеющихся резервов стана по уменьшению боковой обрезки широких стальных полос требуют дальнейшего развития.

2. Несмотря на большое внимание исследователей на проблему повышения точности формирования поперечного профиля широких стальных полос и листов при прокатке, требуется дальнейшее изучение вопросов в этом направлении. Существующие методы теоретических исследований формообразования поперечного профиля листового проката, основанные на применении различных моделей расчета валковых систем при прокатке, не позволяют в полной мере учитывать все возможности технологического оборудования прокатных станов и профилирования валков. Необходимо дальнейшее развитие теоретических исследований формообразования поперечного профиля листового проката для синтеза эффективного решения по профилированию валковых систем и обеспечению их стойкости.

3. Существующее состояние теории упругопластического изгиба горячекатаной полосы на завершающей стадии производства при правке на многороликовой машине в условиях знакопеременного деформирования не позволяет производить исследования и расчет технологических режимов правки с установлением взаимосвязи воздействий на листовый прокат при правке и плоскостностью деталей, получаемых при раскрое широких горячекатаных стальных листов лазером или плазмой.

Актуальность решения перечисленных проблем, направленных на повышение эффективности формообразования листового проката, обусловлена высокой важностью достижения конкурентного качества по поперечному профилю и плоскостности широких стальных полос и листов, в том числе после переработки такими методами, как плазменная или лазерная резка. При этом значимым остается вопрос обеспечения высокой стойкости валков, определяющих процесс формообразования при прокатке.

#### **Цель работы.**

Развитие теоретических положений по формообразованию стального листового проката на этапах от прокатки слябов до правки широких полос с разработкой и внедрением комплекса технических и технологических решений по совершенствованию процессов листопрокатного производства на основе повышения эффективности воздействий на форму, размеры проката и стойкость валков.

#### **Задачи работы.**

1. Теоретические и экспериментальные промышленные исследования закономерностей формоизменения металла при горячей прокатке сляба в вертикальных и горизонтальных валках широкополосного стана и перемещения поверхностных дефектов металла от кромок раската в направлении середины ширины для уменьшения величины боковой обрезки полос.

2. Исследование формообразования поперечного профиля листового проката при толстолистовой прокатке, горячей и холодной прокатке на



непрерывных широкополосных станах и разработка методики выбора и расчета профилировок валков, обеспечивающей повышение точности формирования поперечного профиля прокатываемых полос и листов и стойкости валковых систем.

3. Разработка нового научного подхода к анализу и оценке параметров состояния рабочего слоя валков непрерывных прокатных станов и нового способа эксплуатации валков, направленного на увеличение их стойкости, снижение их расхода и повышение эффективности технологического процесса непрерывной прокатки.

4. Комплексное исследование процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации для расширения возможностей воздействия на листовую прокат и обеспечения высокой плоскостности получаемых деталей при раскрое на установках лазерной или плазменной резки.

5. Апробирование и внедрение разработанных технологических и технических решений по повышению эффективности воздействий на форму, размеры проката и стойкость валков в действующее металлургическое производство.

#### **Научная новизна.**

1. Выявлены новые закономерности формообразования при горячей прокатке сляба в вертикальных и горизонтальных валках широкополосного стана. Установлено, что уменьшение перехода металла с узкой грани на широкую определяется только степенью деформации в горизонтальных валках, распределение обжатий между вертикальными валками существенного влияния на перемещение металла не оказывает. Уменьшение суммарного обжатия до 10 % в первых трех горизонтальных проходах приводит к уменьшению затекания металла с ребра на широкую грань после прокатки в черновой группе стана до 20 %. Установлено, что выполнение на боковых ребрах сляба равнобедренных скосов размером, равным разнице между начальной шириной сляба и требуемой

шириной полосы, существенно ограничивает переход металла с узкой грани на широкую: величина затекания точек скосов узкой грани сляба уменьшается в 2,5 раза и нижняя точка скоса на узкой грани сляба переходит на край полосы.

2. Разработана новая методика эффективного профилирования валков листопрокатного производства, отличающаяся от известных применением пространственной конечно-элементной модели валковой системы и непрерывным описанием профиля бочки. Методика включает определение поперечного профиля листового проката на основе геометрического суммирования кривых упругих деформаций, профиля износа валков, теплового профиля и поиск профилировок валков с учетом исходной неплоскостности проката и возможностей регулирующих воздействий осевой сдвижки рабочих валков и их гидравлического изгиба. Методика позволяет исследовать и проектировать профилировки валковых систем для различных листовых станов по критериям обеспечения геометрических показателей качества листового проката и стойкости валков. Показано, что методика профилирования валков обеспечивает значение поперечной разнотолщинности широких полос не более 2 % от номинальной толщины без снижения стойкости валков.

3. Разработан новый научный подход к анализу и оценке параметров состояния основного деформирующего инструмента – листопрокатных валков непрерывного стана. Подход состоит в определении длины прокатанных полос, межвалковой нагрузки, упрочнения, износа бочек валков после прокатной кампании и величины съема при шлифовке в зависимости от номера клетки непрерывного стана. Подход обоснован результатами исследований опорных валков непрерывного стана горячей прокатки. Показано, что содержательной характеристикой состояния опорного вала является деформационное упрочнение его бочки после прокатки. Получена закономерность деформационного упрочнения бочки при прокатке, описывающая влияние длины прокатанных полос и межвалковой нагрузки. Разработан новый способ определения величины

сьема при шлифовке опорного валка, основанный на учете роста приращения твердости бочки валка в 1,2–1,9 раза в клетях по ходу прокатки.

Практическая реализация разработанного подхода по определению параметров состояния валков непрерывного стана позволяет решать вопросы увеличения объема прокатных кампаний опорных валков и снижать их расход с обеспечением стойкости.

4. На основе комплекса теоретических и экспериментальных исследований процесса холодной правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации раскрыт механизм взаимосвязи технологических режимов правки и отклонений листового металла при последующей плазменной или лазерной резке. Установлено, что величина пластической деформации при правке и неоднородность распределения деформаций по толщине полосы определяют отклонение листового металла при раскрое лазером или плазмой. Выявлено, что уровень пластических деформаций в начале процесса правки не менее 90 % по толщине полосы гарантированно исключает искривление листов при резке и минимизирует влияние остаточных напряжений и накопленной потенциальной энергии упругих деформаций после правки.

Получена зависимость, описывающая влияние числа роликов, их шага, разницы перемещений по вертикали первого и последнего роликов верхней кассеты, толщины и условного предела текучести материала полосы на коэффициент проникновения пластической деформации по толщине при правке и позволяющая прогнозировать максимальную относительную деформацию поверхности полосы при знакопеременном изгибе. Показано, что параметрами, влияющими на величину пластической деформации при правке, в большей степени, являются число роликов и величина, характеризующая наклон верхней кассеты. Увеличение числа роликов при правке в 1,5 раза без изменения остальных параметров процесса приводит к росту уровня пластических деформаций не менее, чем на 15 %. Возрастание в два раза величины,

характеризующей наклон верхней кассеты, приводит к росту уровня пластических деформаций в 1,2 раза.

Разработана методика выбора режима правки, учитывающая неоднородность напряженно-деформированного состояния проката в условиях циклической знакопеременной деформации и обеспечивающая нахождение технологического режима правки, гарантирующего получение проката для лазерной или плазменной резки.

### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Теоретическая значимость работы состоит в раскрытии новых закономерностей формообразования листового проката на всех этапах его производства. Результаты моделирования и совокупность экспериментальных исследований вносят вклад в понимание физических процессов получения заданной формы и размеров стального листового проката, раскрывают новые аспекты теории формообразования и создают основу для разработки новых технических и технологических решений по совершенствованию процессов листопрокатного производства для достижения точности геометрических показателей проката и стойкости деформирующего инструмента.

Практическая значимость работы заключается в следующем.

1. Предложены решения по усовершенствованию технологии горячей прокатки на непрерывном широкополосном стане 2000, направленные на ограничение смещения поверхностных дефектов от кромок раската в направлении середины ширины и минимизацию величины обрезки кромок полос.

2. Разработаны и внедрены в производство профилировки валков непрерывных широкополосных станов горячей и холодной прокатки, обеспечивающие эффективное воздействие на поперечный профиль полосы и повышение стойкости валков.

3. Разработаны новые способы, направленные на повышение эксплуатационной стойкости опорных валков при производстве широких стальных полос и листов, на увеличение наработки рабочего слоя опорных валков

без роста степени наклепа и износа бочки с обеспечением снижения расхода валков. Новизна технических решений подтверждается патентами Российской Федерации на изобретения № 2585594 и № 279566, а также свидетельством о регистрации государственной программы для ЭВМ, описывающей процессы функционирования валковой системы и прокатываемой полосы.

4. Разработан комплекс методик и алгоритмов, применение которых позволяет выдавать практические рекомендации для:

– определения значений коэффициентов дифференцированного съема и величины съема при шлифовке опорных валков чистовой группы по актуальным данным за прокатную кампанию по клетям непрерывного широкополосного стана горячей прокатки 2000;

– прогнозирования величины износа и приращения твердости бочки опорных валков по клетям чистовой группы стана 2000 за прокатную кампанию.

На основе предложенных методик и алгоритмов разработан и внедрен программный инструмент в формате онлайн-приложения, позволяющего оперативно обрабатывать информацию об эксплуатации опорных валков чистовой группы за выбранный период и выдавать результаты обработки участку подготовки валков производства плоского проката листопрокатного цеха № 2 ПАО «Северсталь» – значения коэффициентов съема по клетям и значения самих съемов при перешлифовке валков. Разработаны практические рекомендации по периодичности перевалки опорных валков чистовой и черновой групп непрерывного широкополосного стана горячей прокатки, направленные на увеличение объема производства на стане и снижение производственных затрат, связанных с эксплуатацией валков.

5. Разработаны, испытаны и внедрены технологические режимы правки на роликовых правильных машинах, установленных в линиях агрегатов поперечной резки № 3 и № 4 цеха отделки металла № 2 ПАО «Северсталь», обеспечивающие получение проката, пригодного для лазерной или плазменной резки.

6. Суммарный экономический эффект от внедрения новых технических и

технологических решений, полученных по результатам работы, в условиях действующего промышленного производства составляет более 26 млн руб. в год.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе и при проведении научно-исследовательской работы студентов по направлению подготовки «Металлургия» в федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования «Череповецкий государственный университет».

#### **Методология и методы исследования.**

Работа включает комплекс исследований, основанных на использовании совокупности современных научных методов, применяемых в области обработки металлов давлением. Теоретические исследования выполнены с применением математических методов моделирования, включая метод конечных элементов, реализованный в программных комплексах DEFORM и SIMULIA Abaqus, и статистических методов анализа. Лабораторные исследования механических свойств материала стальных горячекатаных полос при циклическом нагружении проводилось по стандартным методикам с использованием универсальной испытательной машины Galdabini Quasar 50. Исследование влияния высокотехнологичной обработки на изгиб листов производилось в промышленных условиях на машине плазменной резки SatroniK LS3000 и на установке лазерной резки BYSPRINT 3015. Промышленные эксперименты проводились на прокатных станах и роликовых правильных машинах в условиях действующего металлургического производства ПАО «Северсталь».

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Закономерности формообразования при горячей прокатке сляба в вертикальных и горизонтальных валках широкополосного стана и принципы снижения расхода металла за счет уменьшения величины смещения поверхностных дефектов от кромок раската в направлении середины ширины.

2. Методика профилирования валков листопрокатного производства, основанная на методе формообразования поперечного профиля листового проката

с применением пространственной конечно-элементной модели валков с непрерывным описанием профиля бочки и обеспечивающая достижение высоких геометрических показателей качества листового проката и повышение стойкости валков.

3. Новый подход к определению параметров состояния рабочего слоя опорных валков и величины съема при перешлифовке, учитывающий разную интенсивность работы валков по клетям непрерывного стана и обеспечивающий увеличение стойкости валков, снижение расхода валков и повышение эффективности технологического процесса непрерывной прокатки.

4. Теоретическое обоснование процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации, раскрывающее механизм взаимосвязи технологических режимов правки и отклонений листового металла при его последующей обработке лазером или плазмой, и методика поиска режимов правки горячекатаных широких полос на многороликовых правильных машинах для получения листового проката, пригодного для лазерной или плазменной резки.

#### **Степень достоверности и апробация результатов.**

Достоверность результатов диссертационного исследования основана на применении математического описания, базирующегося на современных достижениях в области теории обработки металлов давлением, статистической обработке данных, подтверждается комплексом исследований и экспериментов на действующих толстолистовом и широкополосном станах горячей прокатки, непрерывных станах холодной прокатки, различных роликовых правильных машинах и обеспечивается соответствием результатов теоретических исследований промышленным экспериментам.

Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на различных международных научно-технических конференциях «Современная металлургия начала нового тысячелетия (г. Липецк, 2012 г.), «Научно-технический прогресс в черной металлургии» (г. Череповец, 2013 г.,

2015 г., 2017 г., 2019 г.), «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования» (г. Вологда, 2015 г.), NUMISHEET 2018 – 11th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes (г. Токио, Япония, 2018 г.), «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (г. Москва, 2019 г.), «Павловские чтения» (г. Москва, 2021 г.), «Интеллектуально-информационные технологии и интеллектуальный бизнес» (г. Вологда, 2022 г.), «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки. Технология – Оборудование – Инструмент – Качество» (г. Минск, Республика Беларусь, 2023 г.), а также на Конгрессе прокатчиков (г. Выкса, 2019 г., г. Москва, 2022 г.).

#### **Личный вклад автора.**

Научные положения и результаты работы, выносимые на защиту, основываются на исследованиях, выполненных непосредственно под руководством и с активным участием автора. Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач исследования, обоснованном выборе методов решения технических и технологических проблем, проведении лабораторных и промышленных экспериментальных исследований, анализе и обобщении результатов работы и обоснования всех положений, выносимых на защиту. Апробирование и внедрение в производство предложенных новых технических и технологических решений осуществлялось при непосредственном участии автора.

#### **Публикации.**

Материалы диссертации представлены в 39 публикациях, в том числе 16 статей опубликовано в журналах, рекомендованных ВАК, 3 – в изданиях, входящих в наукометрические базы Web of Science и Scopus, 14 публикаций в сборниках трудов международных конференций; получено 2 патента на изобретения Российской Федерации и 1 свидетельство на регистрацию программы для ЭВМ; выпущено 2 монографии и 1 учебное пособие.



### **Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложения. Текст диссертации изложен на 299 страницах машинописного текста, иллюстрирован 128 рисунками, содержит 34 таблицы. Библиографический список включает 286 источников.

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

В *первой главе* представлен анализ современного состояния и перспективных направлений исследований формообразования листового проката на всех этапах производства от прокатки сляба до правки проката на роликовых правильных машинах. Сделаны выводы об уровне развития теории в области формообразования широкого стального листового проката и перспективах совершенствования технологии его производства. Сформулированы задачи исследования.

Во *второй главе* описана реализация модели процесса прокатки сляба в вертикальных и горизонтальных валках черновой группы непрерывного широкополосного стана горячей прокатки на основе применения программного комплекса конечно-элементного моделирования, обеспечивающая сходимость результатов моделирования с данными измерений формоизменения раската при черновой прокатке. На основе экспериментальных исследований и численного моделирования получены новые закономерности при прокатке сляба в вертикальных и горизонтальных валках черновой группы. Для совершенствования режимов горячей прокатки в целях уменьшения боковой обрезки широких стальных полос разработаны технологические решения, направленные на уменьшение перехода металла с узкой грани на широкую.

В *третьей главе* с использованием метода конечных элементов решены связанные задачи моделирования формообразования поперечного профиля листового проката и профилирования валков листопркатного производства. Предложено развитие метода формообразования поперечного профиля листового проката в концепции геометрического суммирования кривых упругих

деформаций, износа и теплового расширения валков за счет применения пространственной конечно-элементной модели валковых систем с непрерывным описанием профиля бочки. Обосновано соответствие результатов моделирования с данными измерений поперечного профиля при толстолистовой и непрерывной прокатке. Представлены результаты исследований влияния выпукло-вогнутых асимметричных профилировок валковых систем и средств регулирования на формирование поперечного профиля прокатываемых полос. Показано наличие резерва регулирования поперечного профиля за счет корректировки выпуклости и вогнутости профилировки рабочего валка без изменения выпукло-вогнутой профилировки опорных валков. Обоснована новая методика профилирования валков листопркатного производства, обеспечивающая достижение высоких геометрических показателей качества листового проката и повышение стойкости валков. Показана реализация методики при разработке принципиально новой профилировки опорных валков с выпуклым профилем бочки, состоящим из отрезков трех парабол, плавно сопрягающихся между собой и с торцом бочки для снижения контактных напряжений между опорным и рабочим валками и увеличение срока службы валков.

В *четвертой главе* для решения перспективных вопросов по повышению эффективности процессов непрерывной прокатки разработан новый методологический подход к оценке параметров состояния поверхностного слоя опорных валков, определяющих работоспособность рабочих в процессах формообразования широкого листового проката при прокатке. Представлены результаты его реализации для непрерывного широкополосного стана горячей прокатки 2000 ПАО «Северсталь». Применение такого подхода позволяет решать вопросы обоснованного увеличения прокатной кампании опорных валков, снижения расхода валков, увеличения их стойкости и разработки новых требований к их эксплуатации.

В *пятой главе* на основании комплексного исследования процесса формоизменения горячекатаных широких стальных полос при правке раскрыт и

описан механизм возникновения остаточных напряжений в условиях циклической знакопеременной деформации. Теоретическими исследованиями показана и экспериментально подтверждена взаимозависимость между накопленной энергией пластических деформаций в полосе после правки с отклонением листов при высокотехнологичной резке. Введены новые показатели процесса формоизменения стальных полос при правке в условиях знакопеременного деформирования, раскрыто влияние технологических и конструктивных параметров роликовых правильных машин на эффективность воздействий на листовую прокат и обеспечение плоскостности после его обработки высокотехнологичными методами. Разработана и обоснована методика выбора технологического режима правки для получения листового проката, пригодного для лазерной или плазменной резки.

В *шестой главе* представлен комплекс технических и технологических решений по совершенствованию технологий производства широкой стальной листовой продукции в направлении повышения точности геометрических показателей, стойкости валков и экономии материальных ресурсов. Приведены практические данные по использованию и внедрению в производство разработанных технологий и способов в условиях ведущего металлургического предприятия металлургической отрасли Российской Федерации.

Работа выполнялась в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН) и федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования «Череповецкий государственный университет» в период с 2010 г. по 2023 г.

Результаты диссертационного исследования получены автором при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ между Череповецким государственным университетом и ПАО «Северсталь» (шесть завершенных работ), а также при поддержке Министерства науки и высшего

образования Российской Федерации в рамках проектной части государственного задания (проект № 11.3943.2017/4.6).

Автор выражает признательность профессору, доктору технических наук Э.А. Гарберу за поддержку, содействие и полезные советы, полученные в процессе подготовки диссертационной работы.

## **Глава 1. Современное состояние исследований, практика и перспективы развития вопросов формообразования листового проката**

### **1.1 Практические аспекты проблемы формообразования широкой стальной листовой продукции**

Важнейшим условием развития металлургической отрасли в Российской Федерации является производство конкурентоспособной высокорентабельной металлопродукции. Стальной листовой прокат был и остается одним из востребованных видов сортамента черной металлургии, на который сохраняется большой спрос в различных отраслях машиностроения, строительной индустрии, автомобильной отрасли, нефтегазовой и трубной промышленности и обрабатывающих отраслях. Одновременно с ростом потребления листовой стали непрерывно повышаются требования к ее качественным показателям. Важнейшими показателями качества на всех этапах производства от прокатки сляба до правки стального листа являются его форма и размеры. Формообразование на каждом этапе производства характеризуется различными особенностями и определяет реализуемость всех свойств листовой металлопродукции.

Наибольшая доля производимого листового проката приходится на непрерывные широкополосные станы горячей прокатки (НШСГП) [1–5] и достигает 65–70 %. Такое широкое распространение НШСГП получили за счет высокой производительности, возможности получать разнообразный сортамент по маркам стали и профилеразмерам с высокой точностью по геометрии и с соответствием заданным механическим свойствам полос. За все годы существования НШСГП сохраняют общую конфигурацию: участок нагревательных печей, черновая группа клетей, промежуточный рольганг, чистовая группа, отводящий рольганг и моталки. Одна из основных тенденций современного развития НШСГП связана с постоянным расширением сортамента

для обеспечения потребностей в трубных, судостроительных, сверхпрочных сталях, сталях для машиностроения и автомобилестроения, а также с ростом его производительности. Стремление расширять сортамент на непрерывных широкополосных станах горячей прокатки, в первую очередь, обуславливается экономической составляющей – процесс прокатки характеризуется меньшим расходным коэффициентом металла и затратами энергии в сравнении с производством аналогичной продукции на толстолистовых прокатных станах. На рисунке 1.1 в качестве примера НШСГП представлена схема расположения основного оборудования стана 2000 ПАО «Северсталь».

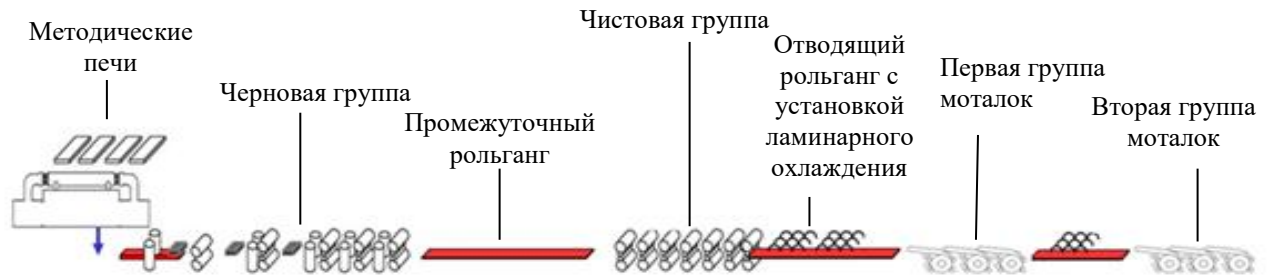


Рисунок 1.1 – Схема расположения оборудования НШСГП 2000 ПАО «Северсталь»

Формообразование на стадии черновой прокатки на НШСГП характеризуется сложным формоизменением сляба при последовательных обжатиях в вертикальных и горизонтальных валках, определяющим такие потери металла на стане, как торцевая обрезь раската после черновой прокатки, боковая обрезь широких полос и отсортировка продукции по предельным отклонениям по ширине горячекатаных полос с необрезной кромкой. По ГОСТ 19903-2015 предельные отклонения по ширине горячекатаных полос в этом случае составляют +20 мм – при ширине до 1000 мм включительно и +30 мм при ширине свыше 1000 мм.

Для снижения торцевой обрезки, обусловленной различным уширением свободных концевых участков в сравнении с остальной частью раската, станы оснащаются системами, реализующими переменное обжатие в вертикальных валках [6–11]. Для снижения расхода металла при обрезке кромок широких полос требуется решать вопросы уменьшения величины перехода металла с узкой грани на широкую при прокатке в вертикальных и горизонтальных валках. В работах [3, 12, 13] отмечается, что чем больше различие ширины сляба и ширины полосы, тем выше стабильность ширины полосы, как по длине, так и в партии. Это подтверждает практика работы стана 2000 ПАО «Северсталь» – в среднем, разница между начальной шириной сляба и шириной полосы составляет 50 мм. В этих условиях в процессе формообразования при прокатке в вертикальных и горизонтальных валках весьма важно минимизировать течение металла с узкой грани раската на широкую. Это позволит уменьшить или исключить переход дефектов различной морфологии с боковых граней сляба на поверхность широких полос.

Формообразование на стадии чистовой прокатки горячекатаных полос и в дальнейшем при прокатке полос на станах холодной прокатки характеризуется таким показателем качества, нормируемым международными стандартами, как отклонение толщины  $\delta h$  от номинального (заданного) значения  $h_{\text{ном}}$  по всей площади полосы. Полоса соответствует по этому показателю мировому уровню качества, если  $\delta h \leq 0,02h_{\text{ном}}$ . Это требование относится и к такой важной разновидности показателя  $\delta h$ , как поперечная разнотолщинность:

$$\delta h_{\text{поп}} = h_{\text{с}} - \frac{h_{\text{лев}} + h_{\text{пр}}}{2}, \quad (1.1)$$

где  $h_{\text{с}}$ ,  $h_{\text{лев}}$ ,  $h_{\text{пр}}$  – толщина полосы в середине ширины, по левой и правой боковым кромкам.

Поперечный профиль широких стальных полос при прокатке стремятся сформировать выпуклой формы (рисунок 1.1). В этом случае возникают поперечные силы, удерживающие полосу на середине бочки валков, а процесс

прокатки широких полос с формированием выпуклой формы профиля протекает более устойчиво, чем при идеально ровной форме профиля. Требование к поперечной разнотолщинности при выпуклой форме профиля  $h_c > h_{\text{лев}}$ ,  $h_c > h_{\text{пр}}$  выражается неравенством:

$$\delta h_{\text{поп}} \leq 0,02 h_{\text{ном}} \quad (1.2)$$

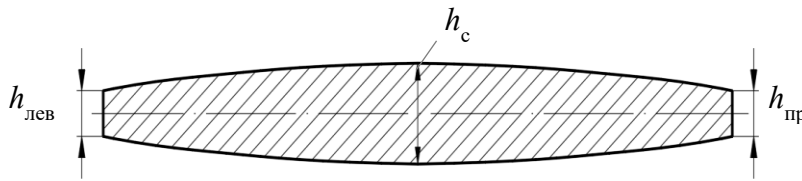


Рисунок 1.1 – Поперечный профиль полосы выпуклой формы

В листопрокатном производстве для достижения уровня лучших мировых стандартов по геометрии широкой стальной продукции осуществляется модернизация оборудования и технологий прокатки, усовершенствуются профилировки валков, повышаются возможности систем регулирования процесса прокатки. На точность работы исполнительных механизмов систем регулирования процесса прокатки, таких как осевая сдвижка, гидравлический изгиб, многозонное охлаждение бочек валков, а также системы автоматического регулирования толщины и натяжений полосы, оказывают колебания толщины подката, износ бочек валков, неодинаковый по их длине, и другие нестабильные факторы технологии, что приводит к тому, что требование (1.2) не всегда выполняется. Также практика работы непрерывных станов показывает, что осваиваются технологии прокатки полос толщиной, меньшей, а шириной, большей, чем предусмотрено первоначальными проектами [12, 14–16], что приводит к существенному росту нагрузки на оборудование, в первую очередь, на основной упругодеформируемый инструмент – прокатные валки. В этих условиях существенное влияние на точность геометрии листового проката и стойкость



валков, и, как следствие, на эффективность процесса формообразования при листовой прокатке оказывает выполняемое профилирование валков перед их установкой в прокатную клеть.

Для листопрокатного производства важное значение имеет решение проблемы синтеза новых профилировок валков. При этом для достижения заданной формы и размеров стального проката необходимо учитывать все технологические возможности листопрокатных станов и обеспечивать высокую стойкость валков. Кроме того, важным аспектом при совершенствовании процессов прокатки стальной листовой продукции, помимо увеличения стойкости валков, существенно влияющей на качество продукции и производительность прокатных станов, является уменьшение их расходного коэффициента. По оценке ряда исследований [17, 18], расходы на прокатные валки в структуре себестоимости прокатного передела достигают 15–20 %. В [19] отмечается, что расход валков на 1 т прокатной продукции характеризуется весьма широким диапазоном и составляет от 0,05 до 25 кг/т.

Таким образом, для практики прокатного производства весьма актуально расширение технологических воздействий на геометрические параметры широких стальных полос и листов при прокатке с одновременным снижением расхода и повышением стойкости прокатных валков.

Помимо точности толщины, другим важнейшим геометрическим показателем листопрокатной продукции является отклонение от плоскостности, определяемое как наибольшее расстояние от точек реальной поверхности до прилегающей плоскости. На рисунке 1.2 в качестве примера представлена неплоскостность листа в виде краевой волнистости (*a*) и схема измерения отклонений от плоскостности (*б*). Как правило, измерение производится на 1 м длины. Вопросы исследования плоскостности горячекатаного листового проката рассмотрены в различных работах, как российских, так и зарубежных исследователей [20–49]. В них предложены и реализованы решения по совершенствованию технологий горячей прокатки, управлению охлаждением

полосы на отводящем рольганге, настройке режимов смотки полосы и охлаждения рулонов. Все перечисленные мероприятия производства на непрерывных прокатных станах с последующей правкой горячекатаных полос на современных роликовых правильных машинах (РПМ) позволяют получать полосы и листы с допустимыми (таблица 1.1) и меньшими отклонениями от плоскостности.

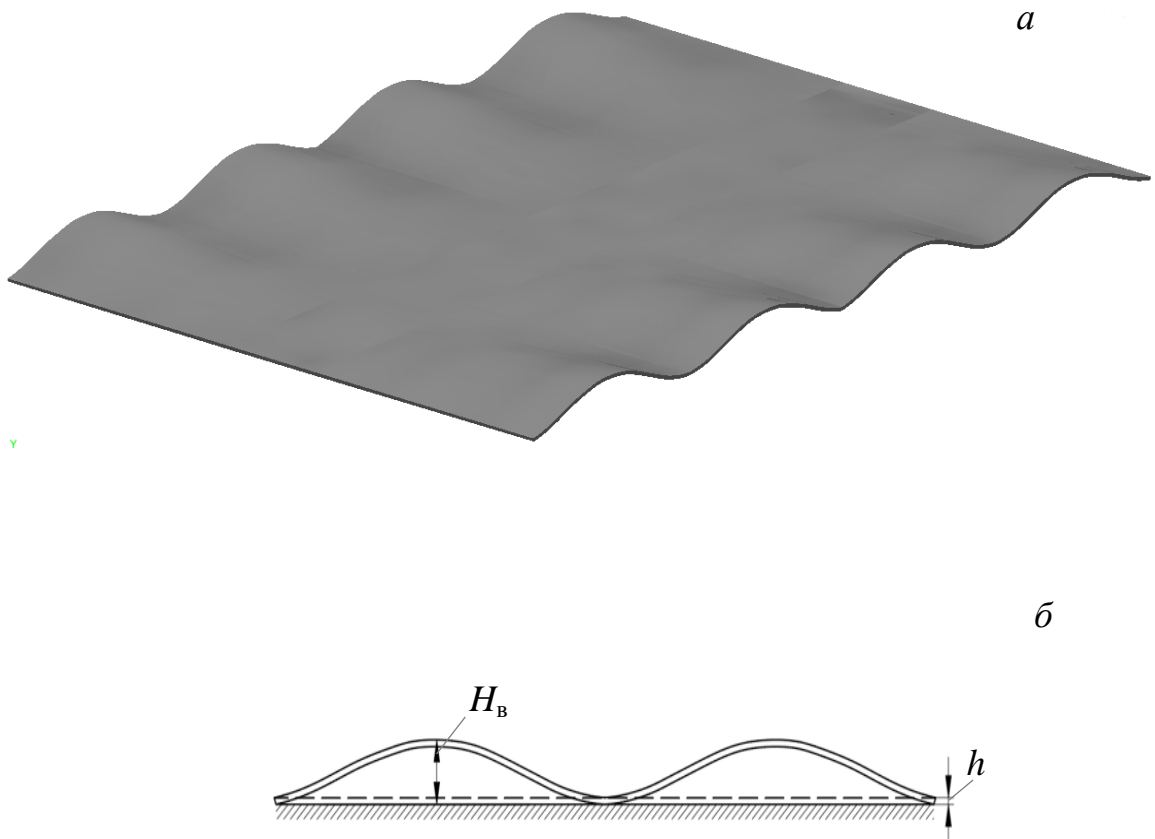


Рисунок 1.2 – Неплоскостность – краевая волнистость – *a*,  
измерение отклонения от плоскостности  $\Delta = H_b - h$   
( $H_b$  – высота волны,  $h$  – толщина полосы) – *б*

Таблица 1.1 – Допустимые отклонения от плоскостности горячекатаного стального проката на 1 м длины, установленные стандартами ряда стран (все размеры в мм)

Страна (группа стран)	Стандарт	Группы требований		Отклонения от плоскостности при ширине листа $b$ и толщине $h$					
Россия	19903-74	$\sigma_B \leq 700$ МПа	Особо высокая	$b \geq 50$					
				$h = 1,5-3,9$			$h \geq 4$		
				8			5		
			Высокая	10			8		
			Улучшенная	12			10		
Нормальная	15			12					
Европейский союз	EN 10051-10	Класс А: $\sigma_T \leq 300$ МПа	Нормальная	$b \leq 1200$		$b = 1200 - 1500$		$b \geq 1500$	
				$h \leq 2$	$h = 2-25$	$h \leq 2$	$h = 2-25$	$h \leq 2$	$h = 2-25$
				18	15	20	18	25	23
			Ограниченная	9	8	10	9	13	12
		Класс В: $300 < \sigma_T \leq 900$ МПа	$h \leq 25$						
18		23		28					
Япония	JIS G 3193:2008	$\sigma_T < 460$ МПа	Общие	$b \geq 1250$					
				$h = 3,15-4$	$h = 4-5$	$h = 5-8$	$h = 8-25$	$h = 25-40$	
			16	14	13	12	9		
Специальные	-	9	8	7	6				

$\sigma_B$  – временное сопротивление;  $\sigma_T$  – предел текучести.

В тоже время, со стороны машиностроительных производств, использующих высокотехнологичные методы переработки горячекатаного листового проката, предъявляются дополнительные требования по обеспечению высокой плоскостности и после обработки, например методом лазерной или плазменной резки. На рисунке 1.3 показан изгиб горячекатаного листа толщиной 3 мм после раскроя на установке плазменной резки на полосы шириной 100 мм и длиной 1 метр. Отклонение от плоскостности у краевых полосок в этом случае было в пределах 70 мм.



Рисунок 1.3 – Деформация горячекатаного листа  
после плазменной резки

Риск возникновения таких деформаций во время и после раскроя вынуждает потребителей металлопроката запрашивать обеспечение плоскостности деталей и после высокотехнологичной обработки листов. Последнее обстоятельство в значительной степени повышает актуальность дальнейшего исследования процесса формообразования широких горячекатаных стальных полос и листов для достижения существенно новых возможностей воздействия на листовую металлопродукцию для исключения ее деформации при последующей обработке.

Решение всех перечисленных проблем повышения геометрических

показателей широкой стальной листовой продукции, стойкости деформирующего рабочего инструмента и экономии материальных ресурсов предполагает выявление и раскрытие новых закономерностей формообразования листового проката на всех этапах производства с разработкой комплекса технических и технологических решений по совершенствованию процессов листопрокатного производства.

## **1.2 Анализ известных методов описания формообразования листового проката при прокатке в вертикальных и горизонтальных валках**

Вопросам теории формообразования листового проката при прокатке в вертикальных и горизонтальных валках, а также исследованиям неравномерности деформации по длине и ширине раскатов посвящены работы И.М. Павлова, А.И. Целикова, М.М. Сафьяна, А.М. Мелешко, В.В. Мельцера, Г.Э. Аркулиса, П.И. Полухина, Р.Л. Шаталова, В.М. Салганика, И.П. Шабалова, А.М. Песина, И.П. Мазура и других авторов [6, 9, 50–69]. В работах рассматриваются различные аспекты формообразования при производстве толстолистого проката и прокатке в черновой группе непрерывных широкополосных станах. Тем не менее, из-за сложного формообразования сляба вопросы прогнозирования величины смещения поверхностных дефектов от кромок раската в направлении середины ширины, а также разработки новых режимов прокатки и использования имеющихся резервов стана по уменьшению боковой обрезки широких стальных полос требуют дальнейшего развития.

С одной стороны, увеличение обрезки металла на НШСГП связано с различным уширением свободных концевых участков в сравнении с остальной частью раската, что приводит к его разноширинности и, как следствие, к увеличению боковой и концевой обрезки. При обжатии сляба в клетки с вертикальными валками приконтактное утолщение неодинаково по его длине: высота наплывов уменьшается от границ зон установившегося процесса к торцам

сляба. Различная величина утолщения кромок по длине раската приводит к разной величине уширения при последующей прокатке в горизонтальном проходе и получению разноширинного раската. В этом случае происходит заужение головных и хвостовых участков раската. Снижение разноширинности на современных непрерывных станах решается на основе применения переменного обжатия в вертикальных валках с уменьшением величины деформации на концевых участках сляба. Для реализации этого мероприятия на НШСГП 2000 ПАО «Северсталь» была произведена реконструкция по установке гидронажимных устройств для задания переменного раствора валков вертикального окалиноломателя (2016 г.) и вертикальных валков последней универсальной клетки (2018 г.), а также введена в действие система автоматического регулирования ширины с установкой дополнительного шириномера и контроллеров системы управления. Это позволило уменьшить только отсортировку продукции по предельным отклонениям по ширине горячекатаных полос с необрезной кромкой не менее чем на 15 тыс. т в год.

С другой стороны, потери металла связаны с ростом величины боковой обрезки из-за смещения дефектов от кромок в направлении середины ширины раската. Такими дефектами могут быть пузыри, трещины и другие поверхностные дефекты, располагающиеся на боковых гранях сляба и не выявленные и не удаленные со сляба после непрерывной разливки [70, 71]. Несмотря на имеющееся значительное число работ [72–84] по исследованию смещения дефектов от кромок в направлении середины ширины раската, этот вопрос из-за влияния большого числа технологических факторов до конца не раскрыт. В работах [72, 73] показано, что на участках поверхности толстых листов и полос, обрезавшихся из-за перехода металла с боковых граней непрерывнолитых слябов на широкую поверхность, в большинстве случаев отмечается повышенное дефектообразование, например, в виде трещин. На рисунке 1.4 показан внешний вид раскатанного подкоркового пузыря на прокате. Подкорковый пузырь располагался в ребровой зоне сляба.



Рисунок 1.4 – Внешний вид раскатанного подкоркового пузыря на прокате

Ширина полосок перехода металла с узкой грани на широкую зависит от величины деформаций в вертикальных и горизонтальных валках, от формы калибровки вертикальных валков, условий трения и других факторов. При значительном переходе металла дефекты остаются на кромках листового проката и после обрезки или требуется увеличивать боковую обрезь металла. В работе [74] на основе промышленного эксперимента установлено, что использование вогнутых боковых граней сляба с одновременным уменьшением бокового обжатия в вертикальных валках обеспечивает меньшее смещение прикромочных дефектов к продольной оси раската. Авторами работ [75–77] показана эффективность использования вертикальных валков с ящичными калибрами за счет снижения деформации в ребровых зонах сляба и уменьшения смещения дефектов к середине широких граней.

В последнее время при исследовании сложного формоизменения раската при чередовании обжатий в вертикальных и горизонтальных валках, анализе поведения дефектов при черновой прокатке предпочтение отдается методу конечных элементов. В работах [79–81] использовано конечно-элементное моделирование для установления основных закономерностей трансформации поверхностных продольных и поперечных трещин сляба в дефекты поверхности широкополосного проката при деформации в горизонтальных валках черновой группы стана. В работах [82–84] приводятся результаты численного исследования процесса прокатки в трех универсальных клетях черновой группы при различных

обжатиях в вертикальных валках и постоянных обжатиях в горизонтальных валках. Допущение о постоянстве выбранных обжатий в горизонтальных валках требует дальнейшего исследования и моделирования процесса деформации сляба в черновой группе стана 2000. Кроме того, необходимо учитывать, что прокатка в черновой группе НШСП включает пять проходов в вертикальных и горизонтальных валках.

Выполненный анализ известных методов описания формообразования показал, что не все аспекты процесса прокатки сляба в вертикальных и горизонтальных валках рассмотрены комплексно и глубоко и требуется дальнейшее изучение закономерностей на основе численного моделирования и экспериментальных промышленных исследований для совершенствования процесса прокатки на непрерывном широкополосном стане и увеличения выхода годной металлопродукции.

### **1.3 Проблемы моделирования формообразования поперечного профиля листового проката и повышения технологического воздействия на профиль при прокатке**

#### **1.3.1 Анализ особенностей моделирования формообразования поперечного профиля листового проката**

Поперечный профиль широких стальных полос формируется в вертикальной осевой плоскости в пространстве между образующими бочек верхнего и нижнего рабочих валков. Первоначальное положение образующих рабочих валков, контактирующих с металлом, изменяется при прокатке под воздействием следующих факторов:

- упругих деформаций, вызванных силой прокатки;



– теплового профиля бочки, возникающего из-за того, что средняя часть бочки нагревается от контакта с металлом больше, чем торцевые участки бочки, свободные от полосы;

– износа бочки, увеличивающегося в функции пробега.

Упругие деформации валковых систем оказывают существенное влияние на нормируемые показатели точности поперечного профиля прокатываемых полос: поперечную разнотолщинность, клиновидность, местные утолщения и неплоскостность. Известные методы расчета упругих деформаций валков листовых станов [85–101] описывают напряженно-деформированное состояние валковой системы и прокатываемой полосы и отличаются учетом различных факторов, а также принятыми допущениями. При рассмотрении упругих деформаций валковой системы кварто, являющейся самой распространенной в клетях полосовых и листовых станов, их составляющими являются прогиб осей рабочих и опорных валков, взаимное упругое сжатие опорных и рабочих валков в межвалковом контакте и упругое сжатие рабочих валков в контакте с прокатываемой полосой. Известные аналитические методики расчета этих параметров выполнены такими известными учеными, как А.И. Целиков [85, 86], П.И. Грудев [87], С.С. Чепуркин [88], О. Эмике, К. Лукас [89], П.И. Полухин [90], Л.И. Боровик [91], В.П. Полухин [90, 92], Г.Г. Григорян [93, 94], Ю.Д. Железнов [90, 93, 94], А.В. Третьяков и Э.А. Гарбер [95], А.А. Будаква и Ю.В. Коновалов [96]. В работах В.В. Мельцера, В.М. Салганика [97, 98] разработан матричный метод расчета упругих прогибов валковой системы кварто при симметричном нагружении, который в дальнейшем развивался и использовался в широко известных исследованиях П.П. Полецкова [99], М.И. Румянцева [100], С.М. Бельского [101].

Развитие теории расчета валковых систем на основе аналитических моделей направлено на увеличение числа учитываемых факторов, при этом характер действия нагрузок приближается к реальным условиям прокатки и контактного взаимодействия валков между собой и рабочих валков с полосой. Все это

приводит к существенному усложнению математического аппарата, что обуславливает трудность оценки его адекватности и применимости на практике.

В последнее время при исследовании особенностей деформаций и напряженного состояния валковых систем применяются вычислительные среды конечно-элементного анализа [102–106]. При этом рассматриваются различные расчетные схемы валковых систем.

В работах [102, 103] рассмотрена трехмерная конечно-элементная модель валкового узла (рисунок 1.5), включающая не только подшипниковые опоры, но и подушки и контактирующие с ними планки, закрепляемые в вертикальных плоскостях окон станин прокатной клетки, при этом условия контактного взаимодействия подушек со станинами максимально приближены к реальным.

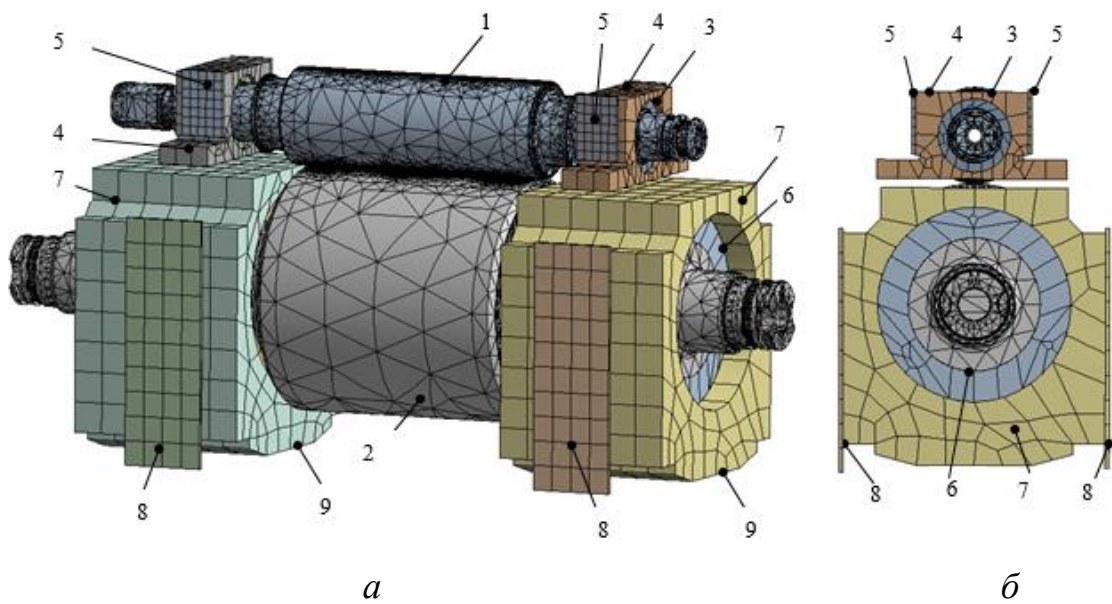


Рисунок 1.5 – Конечно-элементная модель нижней пары валков клетки кварто:

*а* – общий вид; *б* – вид с неприводной стороны:

- 1 – рабочий валок; 2 – опорный валок; 3 – подшипники рабочего валка;  
 4 – подушки рабочего валка; 5 – планки, закрепляемые на опорных  
 плоскостях корпусов, установленных в окнах станин; 6 – подшипники  
 опорного валка; 7 – подушки опорного валка; 8 – планки, закрепляемые в  
 вертикальных плоскостях окон станин; 9 – грани подушек опорных валков,  
 находящиеся в контакте с нажимными устройствами

В модели нижней пары валков нижние грани подушек опорного валка 9 жестко закреплены, так как в реальной клетке они опираются на плоские поверхности клиновых нажимных устройств, установленных на нижних поперечинах станин. Также жестко закреплены грани планок 5 и 8, неподвижно соединенные с вертикальными плоскостями окон станин. Такая схема закреплений, как и в реальной клетке кварто, дает возможность шейкам рабочих валков с подшипниками и подушками перемещаться по вертикали и поворачиваться относительно неподвижных вертикальных опорных поверхностей узла станин, преодолевая только силы трения скольжения, а подушки опорных валков ограничены в вертикальных перемещениях контактом с нажимными устройствами.

На поверхности контакта модели рабочего валка с прокатываемым металлом настраивается размер конечных элементов и создается упорядоченная сетка. К модели рабочего валка со стороны полосы прикладывается сила, распределенная по площади очага деформации, ширина которого определяется шириной прокатываемой полосы. Длина очага деформации рассчитывается заранее по одной из известных методик [107–110].

Кроме того, в работе [102] была выполнена оценка точности получаемых результатов. Несмотря на достаточно высокую точность этого метода, он обладает рядом недостатков – высокой трудоемкостью расчетов, отсутствием возможности учета выпукло-вогнутых профилировок валков и осевой сдвижки рабочих валков, используемых на современных широкополосных станах.

Авторы [104, 105] рассматривали упрощенные схемы фиксации шеек валков и не учитывали профилировки валков. В работе [104] схема фиксации шеек валков (рисунок 1.6) является упрощенной: подшипники опорного и рабочих валков заменены неподвижными кольцевыми сегментами 1 и 2 с углом охвата  $90^\circ$ . В контакте бочек рабочего и опорного валков учитывается возможность взаимного относительного смещения в осевом направлении путем задания

коэффициента трения скольжения, равного 0,1. В контакте рабочего валка с полосой сила прокатки распределена по всей площади очага деформации.

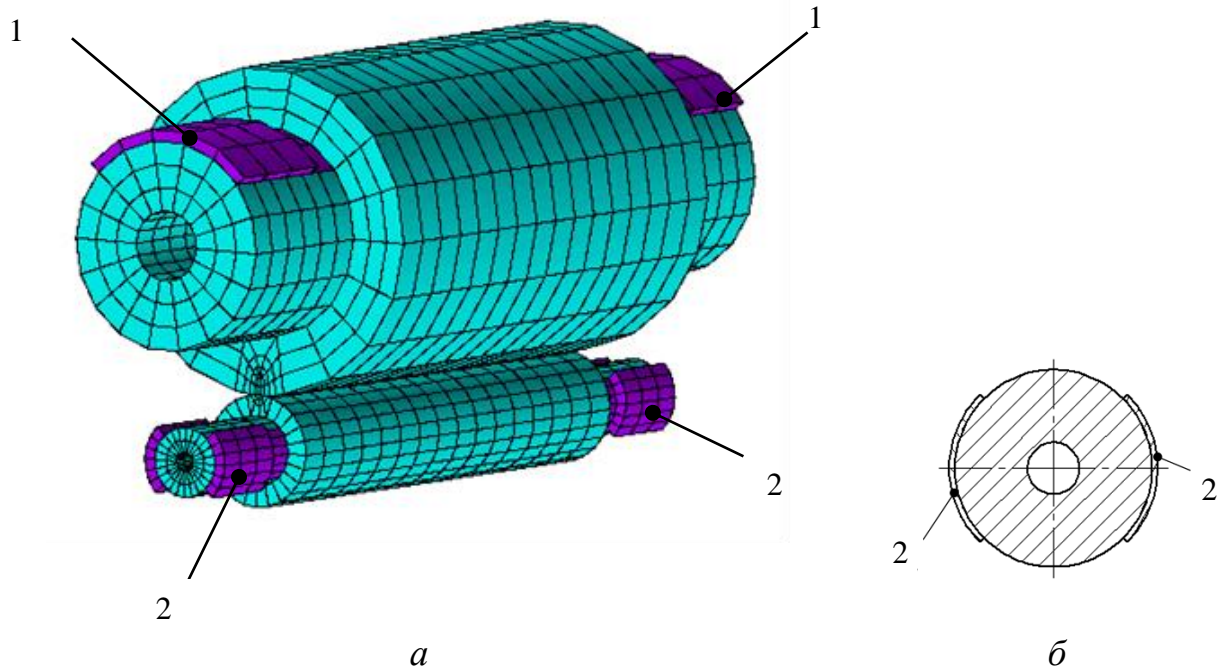


Рисунок 1.6 – Конечно-элементная модель валкового узла клетки кварто, предложенная в работе [104]: *a* – общий вид; *б* – сечение шейки рабочего валка

В работе [105] была разработана конечно-элементная модель валков клетки кварто (рисунок 1.7) для исследования влияния усилий противоизгиба рабочих валков на поперечную разнотолщинность прокатываемой полосы. При этом было принято допущение о постоянстве прогиба рабочего валка от действия усилия прокатки и учтены плоскости симметрии относительно прокатываемой полосы, продольного сечения и срединной плоскости валковой системы.

Кроме перечисленных недостатков, авторами работ [104, 105] не была выполнена оценка влияния принятых схем валковых узлов на точность результатов расчета.

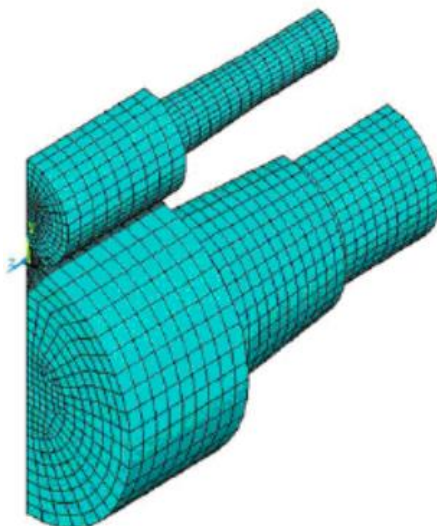


Рисунок 1.7 – Конечно-элементная модель валков  
клетки кварто, предложенная в работе [105]

Созданная в работе [106] модель валкового узла (рисунок 1.8) характеризуется плоскостью симметрии по вертикали с отсутствием перемещения точек, принадлежащих этой плоскости, в отрицательном направлении оси  $Z$ . Из модели были исключены подшипниковые опоры валков и размещена полоса между рабочими валками. Для нижнего опорного валка было ограничено перемещение по осям  $X$  и  $Y$ , верхний опорный валок перемещался вниз на величину обжатия при прокатке. При этом исследовалось влияние распределения напряжений в межвалковом контакте при различном осевом смещении рабочих валков с выпукло-вогнутыми профилировками.

В работе [106] обосновывается, что разработанная конечно-элементная модель позволяет учитывать несимметричность профилировок и их влияние на профиль прокатываемой полосы. Недостаток модели связывается с невозможностью учета корректного прогиба валков, в том числе из-за исключения подшипниковых опор.

В ряде работ зарубежных авторов [111–113] приводится описание результатов исследований деформаций и напряжений валковых систем кварто с

различными профилировками, но без раскрытия описания расчетных схем разрабатываемых моделей.

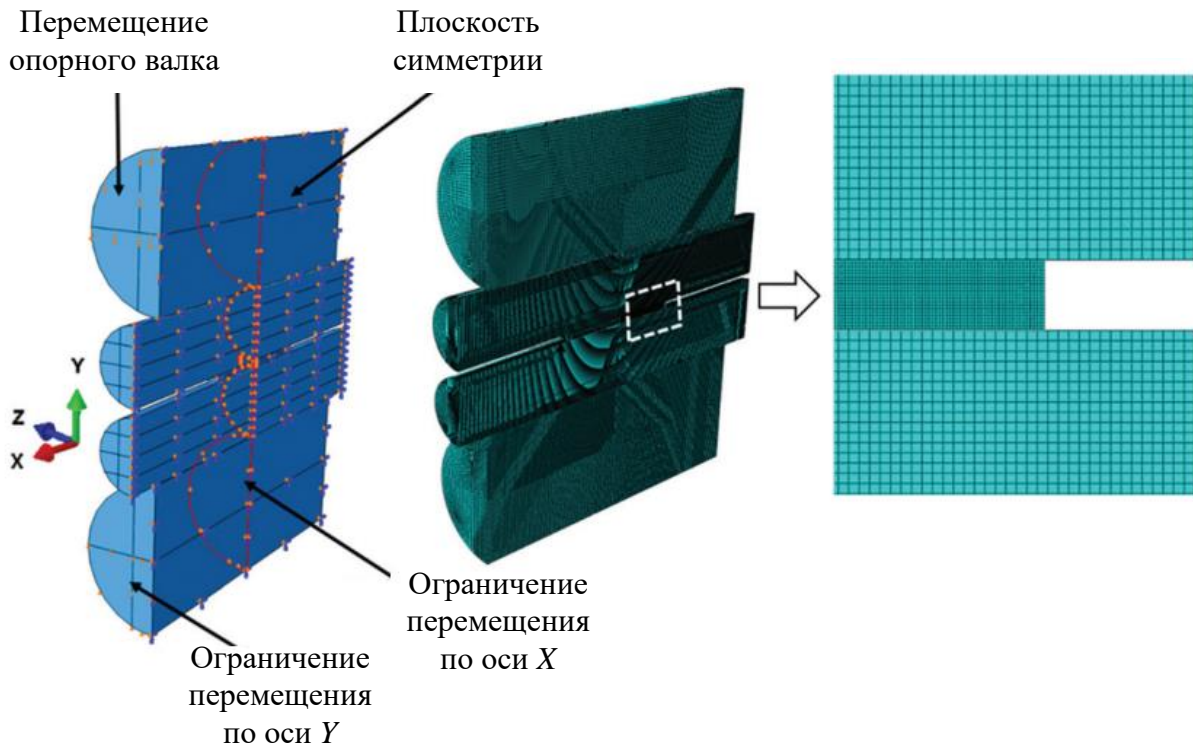


Рисунок 1.8 – Конечно-элементная модель валковой системы кварто, описанная в работе [106]

Что касается учета двух других факторов при определении поперечного профиля полосы, то тепловые профили бочек валков получают экспериментальным путем, например с помощью измерения температуры бочек валков тепловизионной камерой, или определяют на основе теоретического описания тепловых процессов прокатки, достаточно подробно освещенных в работах д.т.н. Э.А. Гарбера с соавторами [14, 95, 114–118]. Износ поверхностного слоя бочек валков зависит от большого числа факторов, различных для каждого действующего стана. К основным факторам следует отнести: износостойкость материала и технологию изготовления валков, режимы их перешлифовок,

температурно-деформационные и скоростные режимы прокатки, нормативы межперевалочных периодов, интенсивность охлаждения валков. Поэтому создание универсальной методики прогнозирования износа, пригодной для всех станов, нецелесообразно. Более корректный подход – получение на каждом стане статистически достоверных профилограмм износа по длине бочки валков. Анализ исследований по моделированию износа валковых систем [17, 95, 96, 119–133] подтверждает, что прогнозирование износа наиболее адекватно отражается с использованием стохастических моделей.

Приведенный анализ публикаций показал, что для решения вопроса повышения точности формирования поперечного профиля широких полос и листов требуется дальнейшее развитие расчета упругих деформаций валковых систем с возможностью учета различных конструктивных параметров валков и технологических воздействий современных станов.

### 1.3.2 Анализ профилировок валков в листопрокатном производстве как фактора технологического воздействия на профиль листового проката и методов их моделирования

Профилировка является одним из факторов технологического воздействия на геометрические показатели листового проката и, по сути, должна обеспечивать компенсацию влияния упругих деформаций, износа, теплового расширения валков на поперечный профиль листового проката. Поперечный профиль при прокатке также формируется под влиянием исполнительных механизмов систем регулирования, таких как осевая сдвижка, гидравлический изгиб, многозонное охлаждение бочек валков, и системы автоматического регулирования толщины и натяжения полосы, развитие которых осуществляется на основе расширения диапазонов регулирования, повышения их быстродействия [12, 16, 25, 44, 134].

Значимость профилировок валковых систем кварто связана не только с возможностью расширения диапазона регулирования геометрических показателей

листового проката, реализуемого исполнительными механизмами управления процессом прокатки, но и с их существенным влиянием на распределение напряжений в межвалковом контакте, равномерность износа поверхностей бочек валков и, как следствие, на стойкость валков.

На практике применяют различные профилировки валковых систем в зависимости от типа стана и условий его работы. На непрерывных листовых станах могут использоваться как универсальные профилировки, пригодные для прокатки всех типоразмеров и марок сталей, так и профилировки, отличающиеся по клетям. Примером универсальных профилировок являются выпукло-вогнутые профилировки или CVC-профилировки валковых систем кварто с осевой сдвижкой рабочих валков. Систему профилирования CVC (Continuously Variable Crown – непрерывно изменяемая кривизна), разработала фирма SMS group (SMS Demag AG, SMS Schloemann Siemag AG) [135, 136]. Принцип действия этой системы показан на рисунке 1.9.

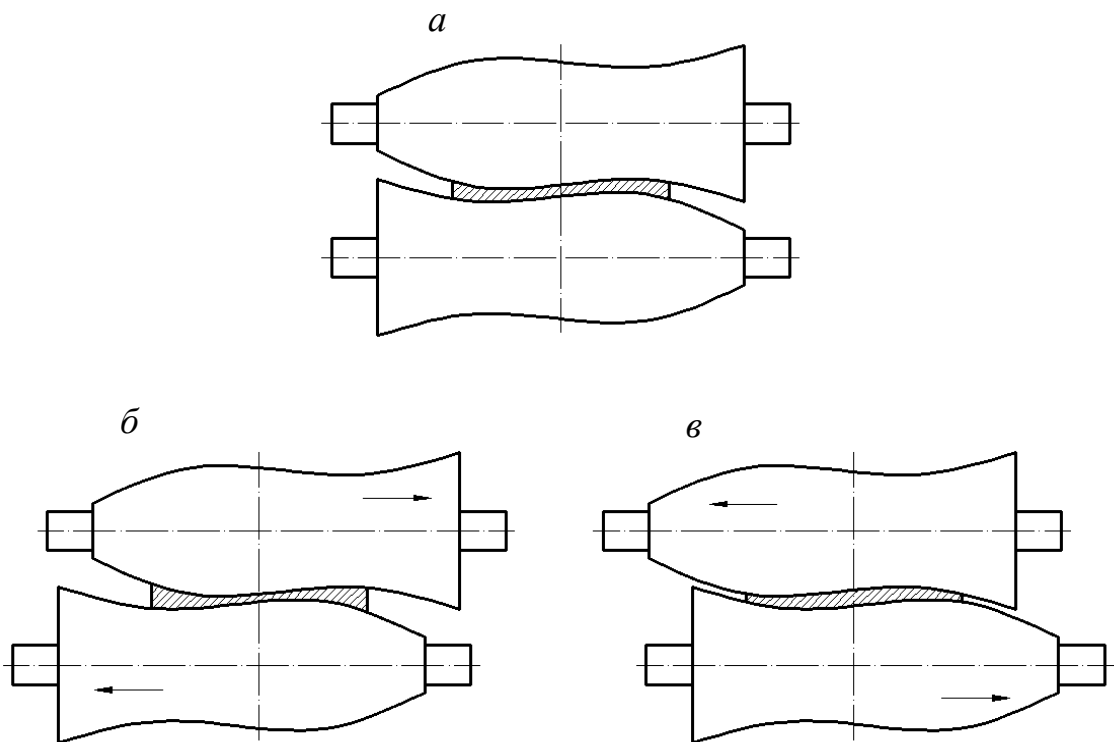


Рисунок 1.9 – Принцип действия системы CVC



При встречном осевом перемещении по схеме *б* (верхний валок – вправо, нижний – влево относительно исходного положения рисунка 1.9, *а*) поперечный профиль полосы в очаге деформации без учета действия силовых, тепловых факторов, а также износа бочек становится вогнутым ( $\delta h_{\text{поп}} < 0$ ), т.е. коэффициент вытяжки ее в середине становится больше, чем у боковых кромок. При встречном осевом перемещении по схеме рисунка 1.9, *в* (верхний валок – влево, нижний – вправо) поперечный профиль полосы становится выпуклым ( $\delta h_{\text{поп}} > 0$ ), т.е. коэффициент вытяжки ее в середине становится меньше, чем у боковых кромок.

Системы CVC представлены в двух вариантах исполнения, отличающихся профилем бочки опорных валков [39, 112, 135–143]. В первом варианте профиль бочки опорных валков цилиндрический, во втором варианте, называемом «CVC плюс», бочки опорных валков выполняют выпукло-вогнутыми. Изменение диаметра валка в системе CVC по длине бочки может составлять 0,3 – 1,5 мм.

Для расчета и выполнения профиля CVC чаще всего его выражают в виде полинома третьей степени:

$$R(x) = R_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3, \quad (1.3)$$

где  $x$  – текущая координата в осевом направлении валка. Начало оси  $x$  для верхних валков находится на кромке бочки валка со стороны обслуживания, а для нижних – на кромке бочки валка со стороны привода;  $R(x)$  – радиус в точке  $x$ ;  $R_0$  – радиус в положении  $x = 0$ ;  $a_1, a_2, a_3$  – полиномиальные коэффициенты. Полином третьей степени позволяет точно описать радиус в точках  $x_i$  с шагом 10 мм. Дальнейшее увеличение степени полинома, описывающего профилировку, нецелесообразно, поскольку полином третьей степени и так проходит через все точки.

В ряде работ [39, 137, 138, 140] предлагаются решения по использованию полиномов 4-ой или 5-ой степени. В работах [39, 137, 138] представлены результаты исследований по разработке выпукло-вогнутого профиля опорного валка с использованием полинома 5-ой степени для снижения неравномерности

межвалковых давлений при работе с выпукло-вогнутым профилем рабочего валка, описываемого функцией (1.3). В работе [140] описан алгоритм шлифования рабочих валков в горячем состоянии при разности температур в середине и по краям бочки, превышающей 25 °С. Для предотвращения возникновения локальных отклонений при шлифовании валков из-за того, что кривая, описывающая тепловой профиль валка, имеет четную степень, а профиль валка описан нечетной функцией (1.3) третьей степени, предложено повысить степень выпукло-вогнутой профилировки до четвертой. Это объясняется тем, что при суперпозиции кривых имеющих разную степень, результирующая кривая имеет степень высшую из них.

В ряде работ зарубежных авторов [141, 142] на основе выполненных исследований установлена связь между полиномиальными коэффициентами  $a_2$  и  $a_3$  и их влиянием на коэффициент  $a_1$  для минимизации силы прокатки и усилия осевого перемещения:

$$\frac{a_2^2}{3a_3} < a_1 < \frac{a_2^2}{3a_3} - \frac{3a_3(2L)^2}{4}, a_3 < 0; \quad (1.4)$$

$$\frac{a_2^2}{3a_3} - \frac{3a_3(2L)^2}{4} < a_1 < \frac{a_2^2}{3a_3}, a_3 > 0.$$

Эти зависимости получены для случая, когда опорный валок не имеет выпукло-вогнутой профилировки.

Помимо SVC-профилировок, на действующих полосовых и листовых станах применяется множество различных комбинаций выпуклых, вогнутых и цилиндрических профилировок [39, 44, 89–96, 144–148].

На широкополосных станах горячей прокатки для рабочих валков непрерывной группы клеток применяют несколько основных типов профилировок (опорный валок может иметь скосы разной величины):

- оба валка цилиндрические;
- оба валка вогнутые (парабола);

- оба валка выпуклые (парабола);
- один валок цилиндрический, второй – вогнутый;
- один валок цилиндрический, второй – выпуклый.

На толстолистовых станах применяют самые разнообразные профилировки, как рабочих, так и опорных валков – от вогнутых до выпуклых. Опорные валки могут иметь одинарные или двойные скосы.

На широкополосных станах холодной прокатки профилировки опорных валков выпуклые или цилиндрические и отличаются фактически только длиной и величиной скосов на краях бочки, рабочие валки профилируют выпуклыми, вогнутыми (по параболической кривой) или цилиндрическими.

Еще одним из направлений улучшения качества полос является прокатка в скрещивающихся рабочих валках, методика профилирования скрещивающихся рабочих валков разработана в [149]. Однако механизмы скрещивания валков усложняют конструкцию и эксплуатацию рабочей клетки, поэтому этот метод не нашел широкого применения на действующих станах.

В [95, 150–152] с целью уменьшения неравномерности износа и улучшения поперечного профиля широких полос предложено профилировку выполнять с вогнутостями (дополнительными выемками) образующей в местах максимальных контактных напряжений.

В [153] предложена концепция профилирования валков чистовой группы стана горячей прокатки, сущность которой заключается в том, что образующим рабочих валков придают вогнутость, уменьшающуюся по ходу прокатки от 0,34–0,36 мм в первой до 0,1–0,2 мм в последней клетки чистовой группы.

В большинстве публикаций [14, 93, 95, 96, 144, 154], посвященных вопросам моделирования и разработки профилировок валков, рассматривается не распределение шлифовочного профиля по длине бочки, а выпуклость (вогнутость) в середине бочки (разность диаметров в середине и у торца).

Расчет выпуклости или вогнутости рабочего валка в середине бочки, учитывающий режим прокатки, был предложен в работе [95]. В дальнейшем на

его основе в работах [14, 144] предложена уточненная формула определения профилировки валков:

$$\begin{aligned} \Delta D_{\text{шл.р.сум.}} = & (L_p / L_{\text{оп}})^2 (2y_{\text{оп}} - \Delta D_{\text{шл.оп.}} + \Delta D_{\text{изн.оп.}} - \Delta D_{\text{т.оп}} + 2\Delta_{\text{спл.оп.}}) + \\ & + (L_p / b)^2 (2\Delta_{\text{спл.р.}} - \delta h_{i-1} (h_i / h_{i-1})) - 2\Delta D_{\text{т.р.}} \end{aligned} \quad (1.5)$$

где  $\Delta D_{\text{шл.р.сум.}}$  – суммарная шлифовочная выпуклость пары рабочих валков в середине бочки;  $L_p$  и  $L_{\text{оп}}$  – длины бочек рабочего опорного валков;  $y_{\text{оп}}$  – прогиб оси опорного валка на длине  $L_{\text{оп}}$ ;  $\Delta D_{\text{шл.оп.}}$  – шлифовочная выпуклость опорного валка (разность диаметров в середине и у края бочки);  $\Delta D_{\text{изн.оп.}}$  – уменьшение выпуклости за счет износа бочки опорного валка на момент установки в клеть вновь отшлифованных рабочих валков (разность износов в середине и у краев бочки опорного валка);  $\Delta D_{\text{т.оп}}$  – тепловая выпуклость опорного валка на длине бочки без учета скосов;  $\Delta D_{\text{т.р.}}$  – тепловая выпуклость рабочего валка на длине бочки;  $\Delta_{\text{спл.р.}}$  – неравномерность сплющивания рабочего валка в контакте с полосой на ее ширине  $b$ ;  $\Delta_{\text{спл.оп.}}$  – неравномерность межвалкового сплющивания на длине  $L_{\text{оп}}$ ;  $\delta h_{i-1} = h_{(i-1)\text{с}} - h_{(i-1)\text{к}}$  – поперечная разнотолщинность полосы на входе в  $i$ -ю клеть;  $h_{(i-1)\text{с}}$ ,  $h_{(i-1)\text{к}}$  – толщины полосы в середине и у боковой кромки на входе в  $i$ -ю клеть;  $h_{i-1}$ ,  $h_i$  – номинальные (согласно заданному режиму прокатки) толщины полосы на входе и выходе из  $i$ -й клетки.

Уравнение (1.5) применяется для каждой рабочей клетки непрерывного стана. Особенности его использования состоят в следующем:

1. На практике при применении разработанной профилировки необходимо поддерживать режимы прокатки, для которых эта профилировка была рассчитана. Отклонения от расчетных режимов можно в ограниченных пределах компенсировать перераспределением охлаждения валков.

2. Расчетная профилировка валков линейно зависит от заданной поперечной разнотолщинности полосы на входе в клеть  $\delta h_{i-1}$ , поэтому, если фактическая величина  $\delta h_{i-1}$  будет отличаться от той, которая была задана в уравнении (1.5), то

принятая профилировка не обеспечит прокатки планшетной полосы. Следовательно, при внедрении расчетной профилировки валков необходим контроль поперечного профиля подката.

Недостатки выражения (1.5) связаны с невозможностью расчета несимметричных профилировок.

Методика, изложенная в работе [93], предлагает определять индивидуальные выпуклости или вогнутости рабочих валков каждой клетки для всего сортамента, а потом выполнять их усреднение. Помимо недостатков, как и в расчете профилировок [14, 144], в методике [93] не учитывается выпуклость опорного валка.

В широко известной работе [96] предложено определять величину суммарной выпуклости или вогнутости в середине бочки верхнего и нижнего рабочих валков по формуле:

$$\Delta D_{\text{шл.р}} = k_{\text{в}} \delta_{\text{н}} (L_{\text{р}} / b)^2 + R_{\text{т}}^{\text{в}} + R_{\text{т}}^{\text{н}} - y_{\text{Л}}^{\text{в}} - y_{\text{Л}}^{\text{н}}, \quad (1.6)$$

$R_{\text{т}}^{\text{в}}$ ,  $R_{\text{т}}^{\text{н}}$  – тепловая выпуклость (на радиус) верхнего и нижнего рабочих валков;  $y_{\text{Л}}^{\text{в}}$ ,  $y_{\text{Л}}^{\text{н}}$  – прогиб верхнего и нижнего рабочих валков. Методика определения  $y_{\text{Л}}$  должна учитывать значения фактического профиля валка. Коэффициент  $k_{\text{в}}$ , характеризующий удерживающую способность клетки, определяют экспериментальным путем,  $k_{\text{в}} = 0-0,2$  для непрерывных станов горячей и холодной прокатки;  $b$  – ширина полосы;  $L_{\text{р}}$  – длина бочки валка; значение технологически необходимой вогнутости валков  $\delta_{\text{н}}$  принимается равным 0,1–0,15 мм или определяется как  $\Delta D_{\text{шл.н}}(b/L_{\text{р}})^2$ . Для нахождения величины вогнутости профиля рабочих валков  $\Delta D_{\text{шл.н}}$ , необходимой для центрирования раската на оси прокатки, предложено использовать выражение

$$\Delta D_{\text{шл.н}} = \frac{2Px^2}{A_{\text{н}}^2 M_{\text{ст}}}, \quad (1.7)$$

где  $P$  – сила прокатки в клетке;  $x$  – текущая координата вдоль бочки валков;  $A_n$  – расстояние между осями нажимных винтов;  $M_{ст}$  – модуль жесткости станины клетки без валков.

Проверку условия получения листов и полос без нарушения плоскостности производят при  $b/h_i > 80$ . Для этой цели определяют величину разности вытяжек

$$\Delta\mu = \frac{(h_{i-1} + \delta h_{i-1})/(h_i + \delta h_i) - h_{i-1}/h_i}{(h_{i-1} + \delta h_{i-1})/(h_i + \delta h_i)} \quad (1.8)$$

и сравнивают с критерием нарушения  $\Delta\mu_{кр}$ , значения которого вычисляются для случая прокатки тонких полос по уравнению

$$\Delta\mu_{кр} = 2,95(h_i/b)^{1,13}. \quad (1.9)$$

Здесь  $h_{i-1}$  и  $h_i$  – толщина полосы на входе в валки и на выходе из валков;  $\delta h_{i-1}$  и  $\delta h_i$  – поперечная разнотолщинность до и после прокатки в клетке.

Если  $|\Delta\mu| > \Delta\mu_{кр}$ , то корректировку осуществляют тремя путями: изменением выпуклости или вогнутости в середине бочки рабочих валков, изменением режима обжатий, противоизгибом рабочих валков.

Точность модели (1.6)–(1.9) существенно зависит от правильного определения величины упругих деформаций и данная модель не дает возможности учета несимметричных профилировок валков.

В работе [154] приводится уравнение взаимосвязи поперечной разнотолщинности полосы с размером профиля бочки на ширине полосы, с прогибом оси рабочего валка на ширине полосы и изменением радиуса рабочего валка от изгибающего момента на ширине полосы. Применение для определения двух последних составляющих сложного математического аппарата в сочетании с рядом допущений привело к громоздким конечным выражениям, которые затруднительно использовать на практике.

Для поиска профилировок валков в [39, 137, 138, 147, 155, 156] описаны алгоритмы по разработке универсальной профилировки валков для обеспечения

требований по плоскостности и профилю поперечного сечения, создания групп профилировок с учетом размерного сортамента, а также моделирования профилировок с учетом состояния опорных валков. В основу поиска профилировок валков положены разработанные математические модели, учитывающие, как симметричную, так и кососимметричную схемы нагружения валкового узла. Сложность применяемого математического аппарата, особенно при необходимости учета новых технических и технологических особенностей валковых узлов, например в части числа валков, конструктивных особенностей подшипниковых опор, приводит к трудностям оценки адекватности получаемого математического описания и применимости в практических расчетах.

Кроме того, стоит отметить, что в большинстве моделей расчета и поиска профилировок валков отсутствует возможность анализа распределения напряжений по длине бочек валков в межвалковом контакте, что оказывает определяющее влияние на стойкость валков.

Важность профилировок валков в листопрокатном производстве, как основного фактора воздействия на профиль листового проката, определяет необходимость дальнейшего развития методов их разработки для решения оперативных технологических задач повышения качества продукции и стойкости валков. Развитие методов разработки профилировок валков, как существенного элемента теории формообразования листового проката, должно обеспечивать получение новых способов профилирования валков, направленных на расширение технологических воздействий при прокатке на листовой прокат для достижения требуемой формы и размеров с одновременным повышением стойкости валков.

#### **1.4 Перспективы повышения стойкости и снижения расхода валков прокатных станов**

При совершенствовании технологии прокатки на широкополосных станах важной задачей является обеспечение высокой стойкости рабочих и опорных

валков, что особенно актуально при усложнении производимого сортамента, жестких требованиях к прокату и предельных нагрузках станов. В этих условиях для получения широких стальных полос высокого качества и снижения числа перевалок потребовался поиск новых валков с более длительным циклом наработки на износ. Так, на НШСГП 2000 ПАО «Северсталь» с 1998 г. активно используются высокопроизводительные рабочие валки, в частности, из высокохромистого чугуна (ASII80X/ASII80XX, CCr-N-72, ЛПХ17НМдц-71 и др.) и индефинитного чугуна (ASIII, ЛПХНд-71, ЛПХНд-76 и др.) [158–160]. Первоначально такие валки эксплуатировались в паре с коваными опорными валками с твердостью бочки до 50 HSC [161]. При этом с одной стороны, отмечался высокий уровень наклепа бочек опорных валков, который при критических значениях приводил к явлению сдвига в поверхностном слое металла и образованию чешуек, вызывая рост абразивного износа рабочего валка. С другой стороны, фиксировался повышенный износ опорного валка, поскольку значительное число твердых карбидов в микроструктуре рабочего валка способствовали истиранию рабочей поверхности опорного валка. Все это требовало более износостойких опорных валков со стабильной твердостью всего рабочего слоя. Основываясь на зарубежном опыте эксплуатации НШСГП, с 2002 г. на ПАО «Северсталь» стали применяться опорные валки с рабочим слоем из стали, содержащей 5 % хрома (AST70X, производитель Gontermann-Peipers) – таблица 1.2.

Таблица 1.2 – Химический состав марки стали валков AST70X [162]

Часть валка	Содержание элементов, % по массе							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Бочка	0,4–0,6	0,4–0,8	0,4–0,8	max 0,035	max 0,035	4,0–6,0	0,8–1,2	до 0,8
Шейка	0,25– 0,6	0,4–0,8	0,5–1,0	max 0,035	max 0,035	-	-	-



Предел прочности бочки такого валка достигает 1600 МПа, осевой части и шейки – до 950 МПа. Твердость по Шору *HSD*: бочки – 62–70; шеек – 37–62. Микроструктура рабочего слоя представляет собой мартенситно-бейнитную матрицу с мелко распределенными в ней вторичными карбидами хрома.

Термическая обработка стальных опорных валков без учета потерь на технологические переходы по данным производителей [162] составляет не менее 900 часов и направлена на решение следующих задач:

- получение необходимой структуры материала, как рабочего слоя, так и оси валка, включая его шейки;
- задание твердости рабочего слоя валка и шеек на основании анализа эксплуатационных данных со стана, для которого изготавливается валок;
- улучшение надежности эксплуатации валка путем повышения прочности и вязкости материала, формирование распределения внутренних напряжений в области бочки валка и в галтельных переходах путем создания напряжений сжатия для повышения запаса прочности и, особенно, циклической прочности при изгибе.

Глубина рабочего слоя с постоянной твердостью таких валков может достигать 12–15 % номинального диаметра валка, т.е. при начальном диаметре опорного валка 1600 мм до 200 мм на диаметр.

Эксплуатация опорных валков включает чередование их работы по клетям стана в контакте со смежным рабочим валком с перешлифовками для снятия поврежденного слоя до полной выработки рабочего слоя их бочек. Многолетняя практика эксплуатации высококачественных валков на прокатном стане 2000 ПАО «Северсталь» с контролем в системе производства истории их работы, включая прокатанный объем металла за кампанию, величину износа, величину съема за перешлифовку, результаты вихретокового и ультразвукового методов контроля, комментарии к инцидентам и авариям и др., позволяет достигать наработку опорного валка от 10 млн т и выше. Продолжительность работы такого валка на стане доходит до пяти лет и более. При этом стоит отметить что, чем

выше качественные показатели валка, тем важнее становится требования к его контролю после каждой прокатной кампании с одновременным решением вопроса по снижению расхода рабочего слоя. В связи с этим, актуальной проблемой современного листопрокатного производства является сохранение эксплуатационных характеристик опорных валков в процессе их износа с полной реализацией их высокого потенциала при работе в условиях высоких усталостных нагрузок.

Существующая практика работы прокатных станов и имеющиеся публикации по эксплуатации опорных валков [17, 18, 157–174] показывают недостаточность исследований по вопросам повышения стойкости и снижения расхода валков, особенно валков нового поколения с рабочим слоем из стали, содержащей уже до 8 % хрома. Это особенно важно в условиях высокой конкуренции при производстве металлопродукции. В частности, Китай за последнее десятилетие резко увеличил производство стали и требуется поиск путей дальнейшего снижения расходов по металлургическим переделам для сохранения конкурентоспособности. Все это приводит к дальнейшим изменениям и на прокатных станах. В частности, ищутся резервы повышения эффективности работы прокатных валков за счет снижения их расхода, увеличения диаметра их бочек. Последнее выполняется на основе исследования конструктивных особенностей клеток и шпиндельных узлов, изменений энергосиловых параметров, исследования износа валков увеличенного диаметра. Результаты такого исследования для непрерывного широкополосного стана горячей прокатки 2000 представлены в работе [17].

Решающее значение в снижении расхода валков отводится технологии перешлифовки, направленной на восстановление их работоспособности и регламентирующей глубину сошлифованного слоя после каждой установки валка в рабочую клетку.

В публикациях, посвященных эксплуатации валков станов горячей прокатки [164–169], рассматриваются вопросы регламентации величины съема рабочего

слоя при шлифовке, направленные на снижение их расходного коэффициента. В работе [164] описан способ, включающий работу валка в клетке, определение величины износа и перешлифовку бочки после каждой вывалки из клетки со съемом при перешлифовке, равным 1,7–2,2 максимальной величины износа, в [165] для снижения расходного коэффициента опорных валков величину съема при перешлифовке предложено устанавливать равной 0,2–0,3 длины дуги контакта опорного валка со смежным рабочим валком, в [166] предлагается поддерживать отношение твердостей рабочего и опорного валков равным 1,02–2,35 при погонном усилии их взаимного прижатия 0,4–1,7 т/мм, а величина съема по диаметру с рабочего и опорного валков при перешлифовке устанавливается в пределах 0,3–0,6 мм и 2,5–7,5 мм соответственно. В [167, 168] для исключения выкрошек при максимальном использовании ресурса рабочего слоя бочки, а также прижогов и снижения твердости бочки валков вследствие перегрева при шлифовке обоснованы регламентированная величина съема поверхностного слоя за каждый проход не более 0,05 мм и подача на валок при перешлифовках смазывающе-охлаждающей жидкости с удельным расходом не менее  $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ . Также в работе [167] проанализирован ряд мероприятий по повышению стойкости опорных валков в части принудительного «отдыха» после глубоких перешлифовок, оптимизации маршрутов перемещения валков по клеткам непрерывных станков. Дополнительно в [168] предложено съем за перешлифовку поддерживать равным 0,6–1,8 мм, а после 2–4 завалок в клетку валок подвергают профилактической перешлифовке с величиной съема 2–4 мм. В [169] предложена эксплуатация опорного валка, включающая чередование операций циклического нагружения опорного валка при работе в клетке с термической обработкой и определением числа циклов нагружения до проведения термической обработки, исходя из максимального значения увеличение твердости опорного валка, измеренного после  $(0,1–0,3) \cdot 10^6$  циклов нагружения или контактов опорного валка с рабочим. При этом термическую обработку ведут путем нагрева до

температуры 110–130 °С и выдержки при этой температуре в течение 22–26 ч или путем вылеживания опорного валка при температуре 5–35 °С в течение 5–6 суток.

Для повышения износостойкости опорных валков в процессе эксплуатации на станах холодной прокатки применялась технология их поверхностного деформационного упрочнения [14, 170–174]. Деформационное упрочнение позволяло снизить склонность опорных валков непрерывных станов к выкрашиванию за счет создания в поверхностном слое упрочняемого валка остаточных сжимающих напряжений. При этом возрастает величина коэффициента запаса прочности материала валка, снижается неравномерность твердости бочки валка. Для реализации технологии поверхностного упрочнения не требуется изготовления специального оборудования: упрочнение осуществляется непосредственно в клети стана во время перевалок опорных валков. Теория и технология поверхностного упрочнения подробно рассмотрена в работе [14].

Анализ существующих решений по подготовке опорных валков к новой рабочей кампании показал, что ни одно из них не учитывает показателей его работы в прокатной кампании, различающихся по клетям непрерывного стана, что повышает расходный коэффициент валков. Большинство способов не учитывают число циклов нагружения валка за прокатную кампанию, что приводит к нерациональному расходованию рабочего слоя бочки опорных валков. Кроме того, способы эксплуатации опорных валков, требующие выполнения периодических операций термообработки или дополнительного упрочнения, приводят к росту издержек производства и себестоимости проката. При этом выполненный обзор публикаций показал, что для решения вопроса снижения расхода рабочего слоя бочки за шлифовку и сохранение высокой стойкости опорных валков требуется оценка и прогнозирование таких важнейших показателей, как износ и увеличение твердости бочки после прокатной кампании.

В соответствии с терминологией ГОСТ 27674-88 износ представляет собой результат изнашивания, рассматриваемого как процесс отделения материала с

поверхности твердого тела при трении, проявляющегося в постепенном изменении размеров и (или) формы тела и выраженного в установленных единицах. Характерными видами износа опорного вала являются:

- механическое изнашивание за счет трения с рабочим валком в межвалковом контакте;
- абразивное изнашивание за счет вовлечения частиц окалины и продуктов разрушения валков в межвалковый контакт;
- усталостное изнашивание за счет нагружения при циклически повторяемом воздействии при контакте с рабочим валком.

Износ валков связан не только с условиями процесса прокатки, как отмечалось в п. 1.3.1 и представлено в работах [17, 95, 96, 119–133], но и с неоднородностью распределения твердости материала рабочего слоя вала, вызванной с ее понижением в процессе работы, вследствие структурных изменений.

Стоит отметить, что опорные валки последнего поколения характеризуются незначительным износом. В качестве примера на рисунок 1.10 представлены результаты измерения радиального износа нижних опорных валков первой и последней клеток чистовой группы НШСГП стана 2000 после прокатной кампании объемом 270 тыс. т. Основным критерием при определении величины съема с таких валков во время перешлифовки становится требование по удалению наклепа бочки. В этом случае твердость бочки после шлифовки не должна превышать 2–3 единиц по шкале Шора в сравнении с исходной твердостью бочки опорного вала, измеренного перед его началом эксплуатации на стане [162, 163]. Важный вопрос упрочнения бочки опорных валков за кампанию при прокатке различного объема металла с разной скоростью и другими показателями процесса прокатки до сих пор не решен. Отсутствуют закономерности изменения твердости поверхности бочки опорного вала, определяющие параметры перешлифовки, возможность достижения высокой наработки вала и увеличения объема прокатной кампании.

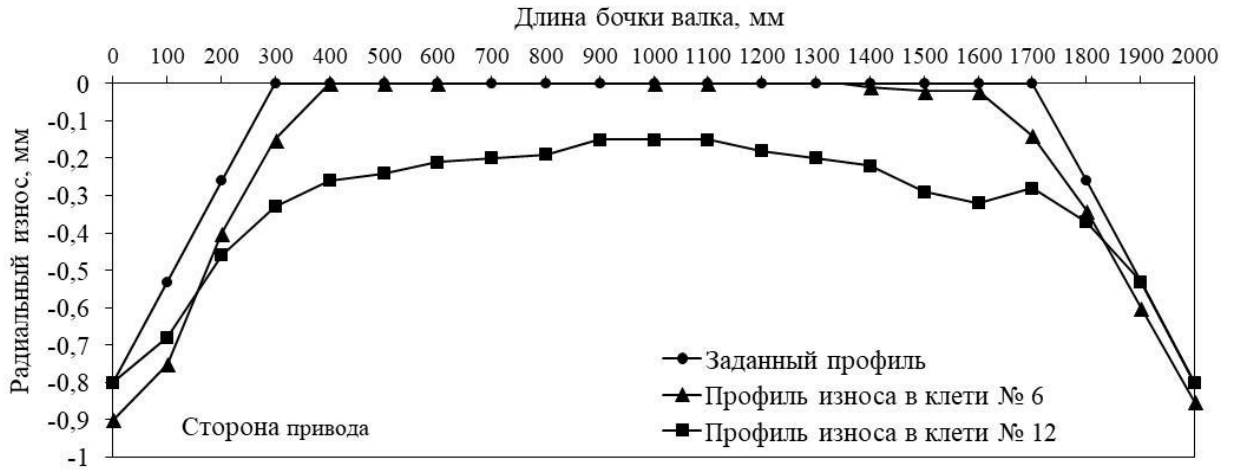


Рисунок 1.10 – Профилеграммы износа опорных валков чистовой группы стана 2000

Для повышения эффективности технологических процессов непрерывной прокатки и разработки ресурсосберегающих режимов производства широкого стального проката в первую очередь требует решения задача по рациональной эксплуатации листопрокатных валков. Важное значение приобретает возможность оценки параметров состояния рабочего слоя опорных валков при разной интенсивности их работы по клетям стана и усталостной нагрузке за прокатную кампанию. Такой подход к анализу и оценке к состоянию рабочего слоя бочки опорных валков ранее не применялся.

## 1.5 Обзор исследований циклического знакопеременного деформационного воздействия на широкий стальной листовой прокат

### 1.5.1 Особенности циклического знакопеременного деформационного воздействия на полосу

Улучшенная плоскостность конструкционного горячекатаного листового проката определяет его более высокий уровень технологических и

потребительских свойств. Ужесточение требований может возрастать в 2–3 раза в сравнении с отклонениями от плоскостности, изложенными в стандартах (таблица 1.1). В тоже время, горячекатаные листы, изготовленные без отклонений от плоскостности, при резке по сложному контуру на установках лазерной или плазменной резки теряют плоскостность и искривляются из-за наличия в металле остаточных напряжений, неравномерно распределенных по объему (рисунок 1.11). Риск возникновения таких деформаций во время и после раскроя может приводить к появлению трещин в деталях и повреждению оборудования. Это требует установления взаимосвязи воздействий на листовую прокат при его производстве и плоскостностью деталей, получаемых при раскрое широких горячекатаных стальных листов лазером или плазмой.

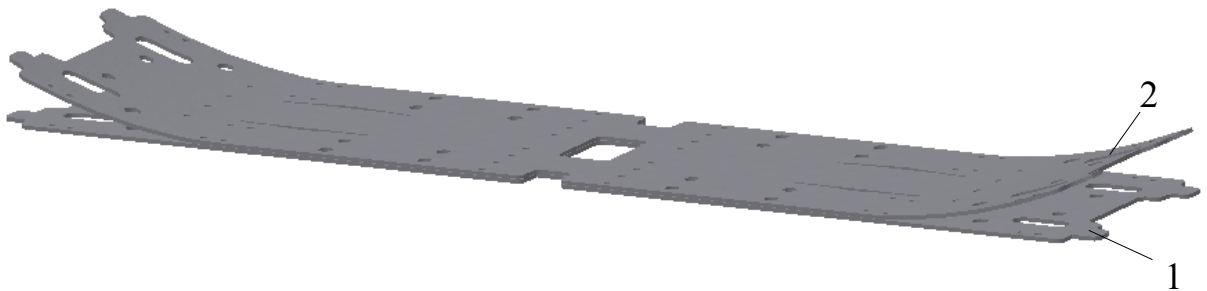


Рисунок 1.11 – Детали, получаемые выкройкой листов по сложному контуру: 1 – без отклонения от плоскостности; 2 – с отклонением от плоскостности вследствие релаксации остаточных напряжений

Завершающей стадией производства стального горячекатаного проката является его правка. Самым распространенным и широко применяемым способом является способ деформирования полосы при прохождении ее через два ряда верхних и нижних роликов, расположенных в шахматном порядке (рисунок 1.12). Верхний ряд роликов имеет наклон за счет разных перемещений первого  $y_2$  и последнего  $y_8$  роликов. Формоизменение полосы происходит на основе ее многократного изгиба с цикловым воздействием растягивающих и сжимающих

усилий на поверхностные волокна с напряжениями, превосходящими предел текучести материала, при этом внутренняя часть полосы или нейтральное волокно не подвергается деформации.

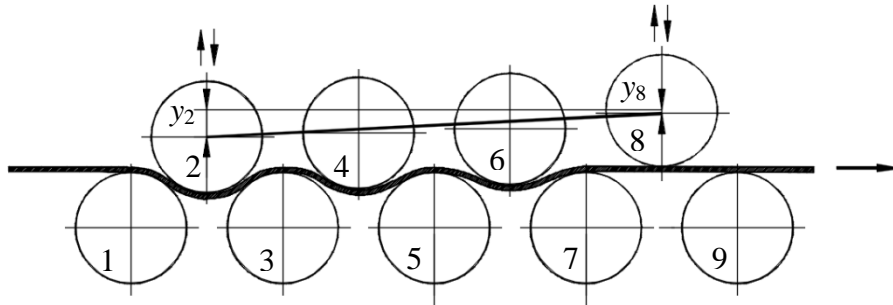


Рисунок 1.12 – Схема 9-роlikовой правильной машины

Процесс упругопластического изгиба позволяет устранять различные отклонения от плоскостности. Для увеличения воздействия на исправление неплоскостности роlikовая правильная машина (РПМ) оснащается опорными роliками. Каждый рабочий ролик 1 (рисунок 1.13) по длине контактирует с блоками опорных роликов 2. Неподвижные опорные ролики установлены в верхней части машины, а подвижные – в нижней. При наличии в исходной полосе вытянутых волокон в середине (короб) необходимо растягивать полосу на участках, где присутствуют волокна меньшей длины (то есть там, где дефект не наблюдается) – это схема «а» воздействий опорных роликов на рабочий. И, наоборот, при наличии вытянутых волокон по кромкам (волна) необходимо воздействовать опорными роliками по схеме «б», вытягивая волокна средней части для достижения ими длины волокон дефектных участков. Такие технологические воздействия на полосу приводят к эффективному исправлению дефектов формы за счет выравнивания вытяжек металла по ширине, но неравномерность деформации по толщине проката при прохождении его через роliки машины приводит к появлению остаточных напряжений.



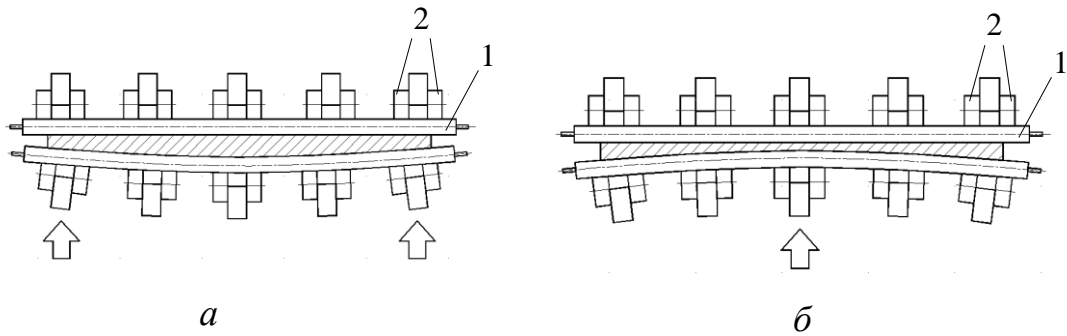


Рисунок 1.13 – Схемы воздействия опорных роликов для устранения локальных дефектов: *а* – коробка; *б* – волны

Исследования неоднородности напряженно-деформированного состояния материала являются одним из важных направлений развития теории обработки металлов давлением. Возникновение остаточных напряжений связано с неоднородными деформациями в смежных объемах материала тела и оказывает существенное влияние на свойства готовой металлопродукции [175–184]. Имеется многочисленное число работ российских и зарубежных исследователей, посвященных формированию остаточных напряжений при обработке металлов различными методами [185–192]. В [185, 186] уделяется внимание вопросам влияния остаточных напряжений, возникающих в поверхностно упрочненных образцах и деталях, на сопротивление усталости. Часть работ посвящена исследованию формирования остаточных напряжений при обработке резанием, шлифованием, сварке, например [187–189]. В работах [190–192], относящихся к исследованию лазерной резки стальных листов, рассматривается вопрос о внесении напряжений лазером, но не оценивается изгиб материала под воздействием внутренних напряжений. И вопрос прогнозирования остаточных напряжений в процессе циклического знакопеременного нагружения во взаимосвязи с высокотехнологичной обработкой листового металла остается открытым.

Практика работы листопрокатных цехов показала, что, несмотря на неуравновешенность по толщине и ширине продольных остаточных напряжений, листы, прошедшие правку через РПМ, не теряют плоскостности после их поперечной резки механическим способом – ножницами или пилами. Это объясняется тем, что препятствием к потере плоскостности является упругое сопротивление листа, создаваемое поперечными нормальными напряжениями. На рисунке 1.14 показан в качестве примера правый прикромочный участок поперечного сечения листа, имеющего тенденцию к образованию волнистости из-за неуравновешенности по толщине продольных напряжений, и схема распределения по толщине на этом участке поперечных напряжений. Из схемы видно, что при отклонении боковой кромки листа от контрольной плиты в нем появляются поперечные нормальные напряжения (снизу растягивающие, сверху сжимающие). Эти напряжения тем больше, чем больше кромка отклонилась от контрольной плиты, поэтому они и способствуют сохранению плоскостности листа.

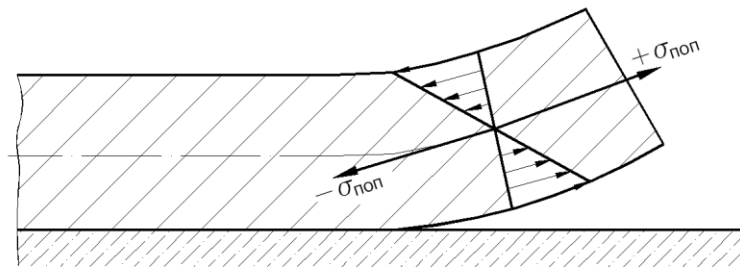


Рисунок 1.14 – Схема распределения поперечных нормальных напряжений в прикромочном участке полосы, имеющем волнистость, вызванную неравномерным распределением по толщине продольных остаточных напряжений

Когда же лист подвергается выкройке лазером или плазмой на заданные размеры, из-за значительного нагрева зоны реза, сопротивление поперечных напряжений уменьшается и вырезанное изделие теряет плоскостность.

Для обеспечения плоскостности получаемых деталей после обработки листов высокотехнологичными методами, возникает необходимость оценивать качество правки не только через показатели плоскостности полосы, но и учитывать степень распространения пластической деформации по толщине и распределения остаточных напряжений.

Коэффициент проникновения пластической деформации (рисунок 1.15), введенный А.А. Королевым в работе [193], показывает отношение зоны пластической деформации  $z$  ко всей толщине  $h$  полосы:

$$k_{pl} = \left(1 - \frac{2z}{h}\right) \cdot 100\% . \quad (1.10)$$

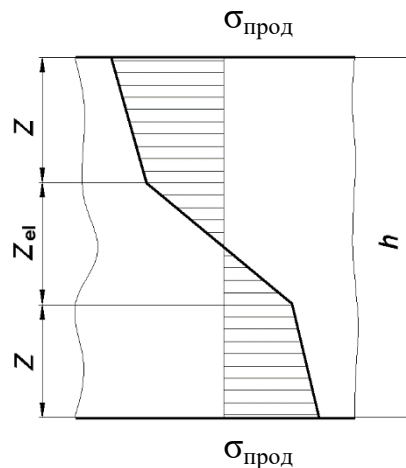


Рисунок 1.15 – К определению коэффициента проникновения пластической деформации по толщине полосы:

$z$  – зона пластической деформации;

$z_{el}$  – зона упругой деформации;

$\sigma_{\text{прод}}$  – продольные напряжения;

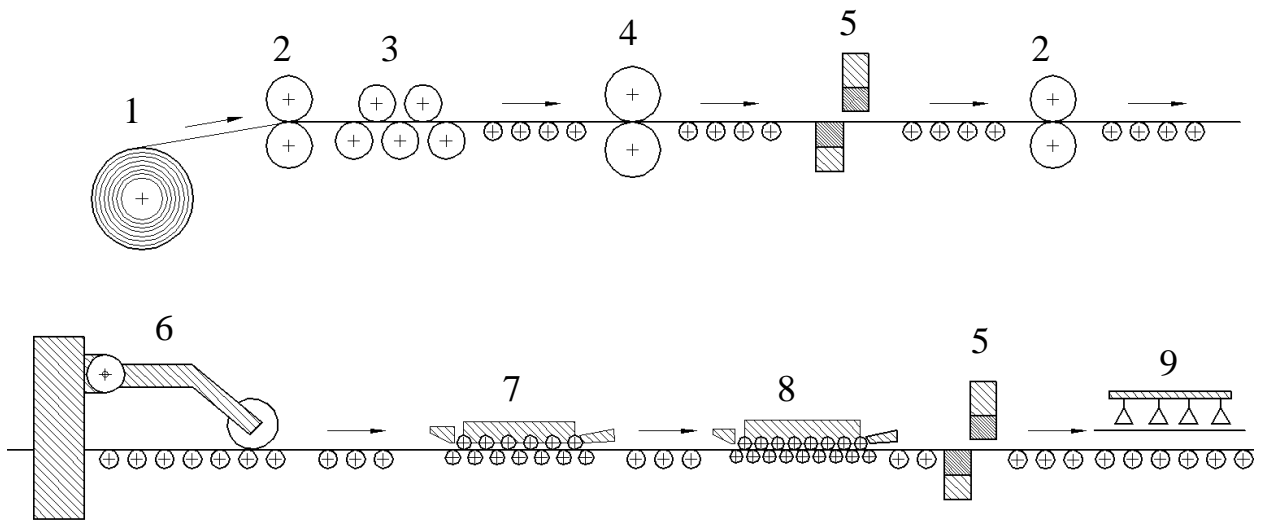
$h$  – толщина полосы

Часто коэффициент проникновения пластической деформации называют коэффициентом пластификации, а процент толщины, достигший предела текучести, просто пластификацией.

Различные машины для правки могут обеспечивать различный уровень пластификации материала. Растяжные машины, прорабатывающие всю толщину стального листа, дают пластификацию близкую к 100 %. При использовании изгибо-растяжных машин пластическая деформация проникает практически на всю толщину полосы и пластификация составляет более 90 %. Роликовые правильные машины обеспечивают в среднем пластификацию в 60–70 % [85, 194], но при определенных соотношениях конструктивных параметров оборудования и тонкой настройки машин можно достигать пластификации больше 80–90 %.

Правка проката на роликовых правильных машинах является наиболее распространенным способом благодаря высокой производительности и эффективности исправления дефектов, а также возможности вариативного расположения РПМ, как в линии отделки проката, так и в виде отдельного агрегата по правке. РПМ для правки полос, как правило, устанавливаются в линии агрегатов поперечной резки. Пример схемы агрегата поперечной резки (АПР) горячекатаных полос шириной от 900 мм до 1850 мм и толщиной от 1,5 мм до 12 мм представлен на рисунке 1.16.

Машина предварительной правки 3 используется для устранения дефекта рулонной кривизны и грубых дефектов плоскостности, она включает обычно до пяти роликов большего (в 2–3 раза) диаметра по сравнению с РПМ 7 и 8, установленными далее в линии для окончательной правки разного сортамента или последовательного применения по схеме: РПМ 7 – уменьшает дефект, а РПМ 8 – его исправляет.

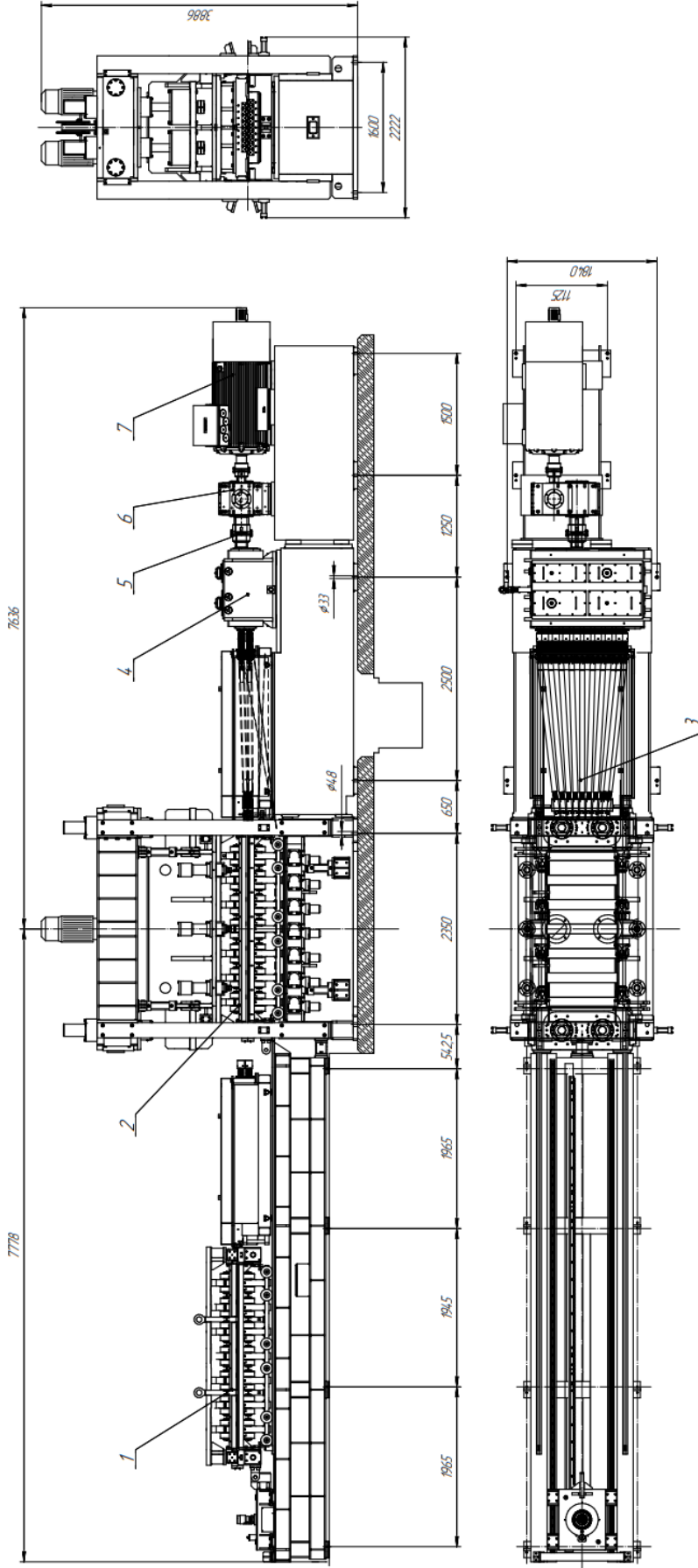


- 1 – разматыватель рулонов; 2 – тянущие ролики; 3 – машина для предварительной правки; 4 – машина для сухой очистки полосы;
- 5 – гильотинные ножницы; 6 – кромкообрезные ножницы;
- 7 – тринадцатирولیковая машина; 8 – семнадцатирولیковая машина;
- 9 – листокладчик

Рисунок 1.16 – Схема агрегата поперечной резки

На рисунке 1.17 представлен общий вид 17-роликовой правильной машины, предназначенной для правки полос толщиной 1,5–6 мм. Скорость правки составляет 0,5–1 м/с. Диаметр роликов  $D = 70$  мм, шаг роликов  $t = 1,1D = 77$  мм.

В движение ролики приводятся от привода, состоящего из электродвигателя, редуктора, шестеренной клетки и 17-ти карданных валов. Наклон верхнего ряда роликов осуществляется путем вертикальных перемещений верхней подвижной траверсы узла станины РПМ от четырех позиционно управляемых гидроцилиндров.



1 – сменная кассета; 2 – 17-роликовая правильная машина; 3 – карданные валы;  
4 – шестеренная клеть; 5 – муфта; 6 – редуктор; 7 – электродвигатель

Рисунок 1.17 – Общий вид линии РПМ

Рабочие и опорные ролики изготавливают из марок стали 9Х, ШХ15, 12ХН2А и имеют повышенную прочность, высокую твердость и сопротивляемость изнашиванию. Бочки роликов подвергают поверхностной закалке с нагрева токами промышленной или высокой частоты до твердости *HRC* 55–65.

Эффективность знакопеременного деформационного воздействия на полосу определяется различным соотношением основных конструктивных параметров роликовых правильных машин ( $D$  – диаметра роликов,  $t$  – шага между роликами одного ряда и  $n$  – числа роликов), а также настройками роликов машины.

Вопросы выбора оптимальных соотношений конструктивных параметров РПМ до сих пор недостаточно исследованы, несмотря на большое число научных работ по расчету и исследованию процесса правки, например, [85, 86, 193–225]. Так, в [85, 194, 195] отмечается, что значения оптимальных параметров РПМ выбирают на основании практических данных в зависимости от толщины листов, подвергаемых правке на данной машине. Шаг роликов предложено принимать равным  $t = 1,1D$ . Это соотношение было проверено в промышленных условиях на ПАО «Северсталь». Ролики одной из РПМ были перешлифованы с диаметра 80 мм до диаметра 74 мм, шаг между роликами в машине остался неизменным  $t = 88$  мм. Было зафиксировано, что исходная полоса, имеющая дефекты неплоскостности 30 мм на 1 м длины, после правки на РПМ с роликами  $D = 80$  мм до их перешлифовки имела неплоскостность 3–4 мм, а после перешлифовки роликов до  $D = 74$  мм неплоскостность полосы после правки составила 10–15 мм на 1 метр длины. Что еще раз подтверждает вывод, полученный в работе [195] на основе опыта эксплуатации РПМ, – чем меньше шаг роликов, тем выше качество правки. Также в [195] отмечается, что диаметры роликов нужно выбирать максимально возможными в пределах шага роликов и предложены формулы по определению минимального и максимального диаметров роликов:

$$D_{\min} \approx h \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_T}} \approx 20h; \quad (1.11)$$

$$D_{\max} \approx 40h, \quad (1.12)$$

где  $E$  и  $\sigma_T$  – модуль упругости и предел текучести материала полосы.

От количества используемых роликов зависит качество правки, на основе опыта эксплуатации РПМ в работе [85] для правки листов толщиной  $h$  от 4 мм предлагается применять машины с числом роликов 9–11, для правки полос  $h$  менее 4 мм – машины с 13–17 роликами, а в некоторых случаях для особо качественной правки – машины с 19–29 роликами.

Скорость правки выбирают в зависимости от производительности машины и толщины листов. Опять же в работе [85], на основании практических данных рекомендовано принимать следующие значения скорости правки: для тонких листов (0,5–4 мм) 6–0,5 м/с; для толстых листов (4–30 мм) при холодной правке 0,5–0,1 м/с. При этом в [195] отмечается, что эффективность правки снижается при росте скорости и при неизменных настройках роликов, а для сохранения эффективности правки с увеличением скорости процесса необходимо увеличивать перекрытия роликов.

Все перечисленные выше рекомендации носят общий характер и основываются на практических данных без учета детального моделирования процесса правки на РПМ с различными конструктивными параметрами. Поэтому, безусловно, важным является продолжение исследований закономерностей упругопластического изгиба на многороликовой машине.

### 1.5.2 Анализ существующих моделей расчета параметров процесса правки полос на роликовых правильных машинах

Моделированию процессов циклического знакопеременного нагружения



полос и листов посвящены известные работы А.А. Королева, А.И. Целикова, И.В. Недорезова, А.З. Слонима, В.Н. Шинкина, Р.Л. Шаталова, А.Е. Шелеста, В.М. Салганика, M.Grüber, R. Kaiser и других авторов [85, 86, 193–225].

Отличительная особенность теоретических исследований процесса многократного знакопеременного изгиба в роликовых правильных машинах, выполненных отечественными авторами, состоит в том, что разработки [85, 86, 193–214] основаны на гипотезе плоских сечений и предположении одноосного напряженно-деформированного состояния.

В работе А.И. Целикова, В.В. Смирнова [86] приводятся уравнения по определению деформаций волокон при упругопластическом изгибе участка полосы между двумя опорами и зависимость изгибающего момента от суммарной кривизны полосы. А.А. Королевым в [193, 194] предложена методика расчета процесса правки и определения усилий на ролики при правке полосы на основе уравнений моментов. А.З. Слоним, Л.А. Сонин в [195] обобщили и систематизировали материал по технологии правки листового проката, привели различные эмпирические формулы по определению диаметра, шага и числа роликов РПМ. На основе опыта крупнейшего российского машиностроительного завода «Уралмашзавода» И.В. Недорезовым в [199, 200] рассмотрена методика расчета установившегося процесса правки, основанная на схеме правки проката для случая, когда между двумя роликами лист изгибается третьим роликом. А.Е. Шелестом и другими авторами в [201, 202] выполнено моделирование изгиба листов при правке по аналогии изгиба балки на двух опорах, нагруженной посередине сосредоточенной нагрузкой. Рассмотрены схемы изгиба листа на ролике при точечном контакте, частичном контакте, при полном касании листом роликов листопрямительной машины и определены радиусы кривизны нейтральной линии листа и относительная деформация листа при правке. В работах В.Н. Шинкина [203–208] предлагается математический метод определения таких параметров холодной правки стальных полос, как кривизна нейтральной линии

полосы при правке, остаточная кривизна листа после правки в зависимости от радиуса рабочих роликов, шага между роликами правильной машины, величины обжатия листа верхними роликами и толщины листа, а также модуля Юнга, предела текучести и модуля упрочнения металла. Модель холодной правки толстых листов, изложенная в работах В.М. Салганика, Д.А. Зайцева [209, 210], базируется на элементах моделей, разработанных «ВНИИМЕТМАШ им. А.И. Целикова» и «Уралмашзавод» и описанных в [85, 195, 199]. В работах Е.А. Максимова, Р.Л. Шаталова [211–214] представлена модель кинематических параметров очага деформации при изгибе листа во время правки, основанная на описании фрагмента изгиба листа с поворотом его торцов на определенный угол.

Во всех перечисленных выше исследованиях не раскрывается определение протяженности зон упругой и пластической деформаций в поперечном сечении полосы. В ряде работ не учитываются такие факторы, как трение при правке, скорость правки, особенности поведения материала при знакопеременном деформировании, отсутствуют сравнения расчетных значений параметров процесса правки с измеренными экспериментально, что влияет на достоверность разработанных математических моделей.

Один из подходов к исследованию процесса правки, предложенный зарубежными авторами в [215–217], состоит в разделении исходного листа на полоски по ширине. Если лист с дефектом «короб», то краевые полоски имеют меньшую длину по сравнению с центральными (рисунок 1.18, *а*), и наоборот, если лист имеет «волну» по краям, то краевые полоски имеют большую длину по сравнению с центральными (рисунок 1.18, *б*). Для каждой полоски определяются точки контакта с роликами и вычисляется отклонение полоски под каждым роликом, а также длина полоски с использованием аппроксимации сплайнами, на основании чего рассчитывается пластическая деформация каждой полоски после правки.

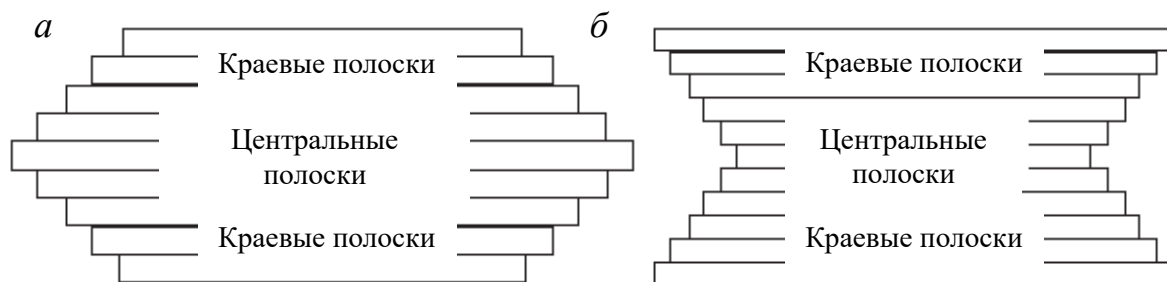


Рисунок 1.18 – Разделение листа на полосы по ширине с дефектами: *a* – короб; *б* – волна

Результаты работ авторов [215, 216] основываются на измеренной топографии листа до и после правки, при этом не рассматриваются вопросы распределения напряжений при правке и после правки, влияющие на дальнейшее отклонение листов при последующей их обработке.

В остальных исследованиях зарубежных авторов преобладает подход к моделированию процесса знакопеременного деформирования, основанный на методе конечных элементов. В публикациях [218–223] рассматривается процесс правки на основе экспериментальных и численных исследований циклических испытаний пластины на изгиб, сравнение различных моделей упрочнения материала, позволяющих учитывать влияние эффекта Баушингера при низкой циклической деформации, а также вопросы управления кривизной листа после правки путем перемещения последнего верхнего ролика.

В работах [224, 225] приводятся результаты моделирования, лабораторных исследований и разработки программного продукта для автоматизированного проектирования технологических режимов настройки многороликовых правильных машин для правки листового проката в холодном состоянии с возможностью расчета перекрытий рабочих роликов, а также определения энергосиловых параметров процесса правки и кривизны проката. Однако в работах не исследуются зависимости распределения внутренних напряжений по

толщине и ширине полос от параметров оборудования и технологических параметров процесса и не затрагиваются проблемы, связанные с оценкой внутренних напряжений.

Обзор исследований циклического знакопеременного деформационного воздействия на широкий стальной листовой прокат показал, что вопрос обеспечения их высокой плоскостности при дальнейшей высокотехнологичной обработке лазером или плазмой за счет разработки технологических режимов обработки стальной полосы при ее производстве на металлургических предприятиях ранее не решался. В связи с этим, реализация задачи комплексного исследования и развития теории упругопластического изгиба при правке горячекатаных полос на многороликовой машине для достижения существенно новых возможностей воздействия на листовой прокат с обеспечением минимальных отклонений при раскросе лазером или плазмой имеет большое научное и практическое значение.

### **Выводы по главе 1**

Выполненный анализ современного состояния и перспективных направлений исследований формообразования листового проката на всех этапах производства от прокатки сляба до правки проката на роликовых правильных машинах позволил сформулировать ряд ключевых выводов:

1. Комплексное исследование процесса формообразования при прокатке сляба в вертикальных и горизонтальных валках черновой группы непрерывного широкополосного стана горячей прокатки, необходимое для разработки новых режимов прокатки и использования имеющихся резервов стана по уменьшению боковой обрезки широких стальных полос, отсутствует.

2. Для синтеза эффективных решений по профилированию валков и достижения заданной формы и размеров стального проката, стойкости валков и учета перспективных технологических возможностей листопркатных станов

необходимо развитие теории формообразования поперечного профиля листового проката при толстолистовой прокатке, горячей и холодной прокатке на непрерывных широкополосных станах.

3. Разработка новых подходов к оценке параметров состояния рабочего слоя прокатных валков и способов их эксплуатации, направленных на увеличение стойкости и снижение расхода валков, является перспективным направлением дальнейшего повышения эффективности технологических процессов прокатки.

4. Современное состояние теории упругопластического знакопеременного изгиба стальных листовых материалов, предназначенных для машиностроения, не позволяет установить взаимосвязь технологических параметров формообразования широкого горячекатаного листового проката на завершающей стадии производства при правке с плоскостностью деталей, получаемых при раскрое широких горячекатаных стальных листов лазером или плазмой.

Сделанные выводы об уровне развития теории в области формообразования широкого стального листового проката и перспективах совершенствования технологии его производства позволяют сформулировать следующие задачи исследования:

1. На основании экспериментальных промышленных исследований и численного моделирования изучить закономерности формоизменения металла при горячей прокатке сляба в вертикальных и горизонтальных валках непрерывного стана для минимизации перемещения металла от кромок раската в направлении середины ширины и уменьшения величины обрезки кромок полос.

2. На основании исследований развить теоретические положения по формообразованию поперечного профиля листового проката при толстолистовой прокатке, горячей и холодной прокатке на непрерывных широкополосных станах с интеграцией в методику выбора профилировок валков для повышения точности формирования профиля прокатываемых полос и листов и стойкости валковых систем.

3. Разработать новый научный подход к анализу и оценке параметров

состояния рабочего слоя валков непрерывных прокатных станов и на его основе создать новый способ эксплуатации валков, направленный на увеличение их стойкости, снижение их расхода и повышение эффективности технологического процесса непрерывной прокатки широких полос.

4. Выполнить комплексное исследование процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации для развития теории упругопластического изгиба на многороликовой машине и достижения существенно новых возможностей воздействия на плоскостность стальных полос.

5. Апробировать и внедрить разработанные теоретические положения в действующее металлургическое производство.

## **Глава 2. Моделирование и исследование формообразования при прокатке слябов в вертикальных и горизонтальных валках**

### **2.1 Моделирование процесса формообразования раската при черновой прокатке на непрерывном широкополосном стане**

Сложность процесса формообразования при горячей прокатке в черновой группе непрерывного широкополосного стана и многообразие факторов, влияющих на течение металла, определяют методы изучения формоизменения сляба.

Прокатка в черновой группе непрерывного широкополосного стана включает несколько проходов в вертикальных и горизонтальных валках и в лабораторных условиях весьма проблематично с высокой точностью выполнить моделирование таких изменений состояния тела, даже используя методы теории подобия.

Установление аналитических зависимостей между параметрами изменения формы раската и деформационными параметрами вызывает трудности из-за невозможности учета большого числа влияющих факторов и их изменения. В этом случае достоверные результаты получают при проведении промышленных исследований с натурными образцами. Решить эту проблему, как предложено в работах [6, 9, 75], можно выполнением многофакторного статистического анализа и результаты такого исследования продемонстрированы для толстолистовой прокатки на реверсивном стане. Так, в работах [6, 75] величину перехода металла с боковой грани сляба на контактные поверхности листа определяли по предварительно запрессованным в боковые грани и ребра 173-х слябов стержням из нержавеющей стали. В условиях действующего производства на непрерывном широкополосном стане горячей прокатки 2000, выпускающем более 60 % всей

продукции Череповецкого металлургического комбината, реализация таких масштабных экспериментов весьма затруднительна.

Учитывая эффективность применения конечно-элементного моделирования для исследования процессов обработки металлов давлением, этот метод использовался и при исследовании формоизменения раската при черновой прокатке с оценкой соответствия натурным образцам.

Моделирование выполнено с использованием программы DEFORM-3D [226]. Постановка задачи осуществлена с двумя плоскостями симметрии – по толщине и ширине сляба с учетом теплообмена заготовки с окружающей средой. В соответствии с настройками черновой группы, численное описание включало пять пар вертикальных и горизонтальных валков (рисунок 2.1, а) с профилировками, используемыми на стане. Для сокращения вычислительных затрат конечно-элементная модель сляба имела длину 300 мм и состояла из 135 тыс. тетраэдральных конечных элементов, материал соответствовал свойству стали 08пс, температура – 1200 °С. Угловые скорости валков задавались равными соответствующим значениям на стане. В контакте вертикальных валков с заготовкой фактор трения принимался равным 0,8, в контакте горизонтальных валков с заготовкой – 0,7. Эти значения дают минимальную погрешность по энергосиловым параметрам, а также расчетным и измеренным величинам формоизменения раската в черновой группе.

Для оценки формоизменения раската и определения смещения металла к оси раската были заданы 43 точки в середине модели (рисунок 2.1, б). Отслеживание координат точек на каждом шаге моделирования позволило определить течение металла при прокатке. Разность координат  $x$  угловых точек P30 и P43 определяла величину затекания металла от кромки на широкую грань в направлении середины раската.



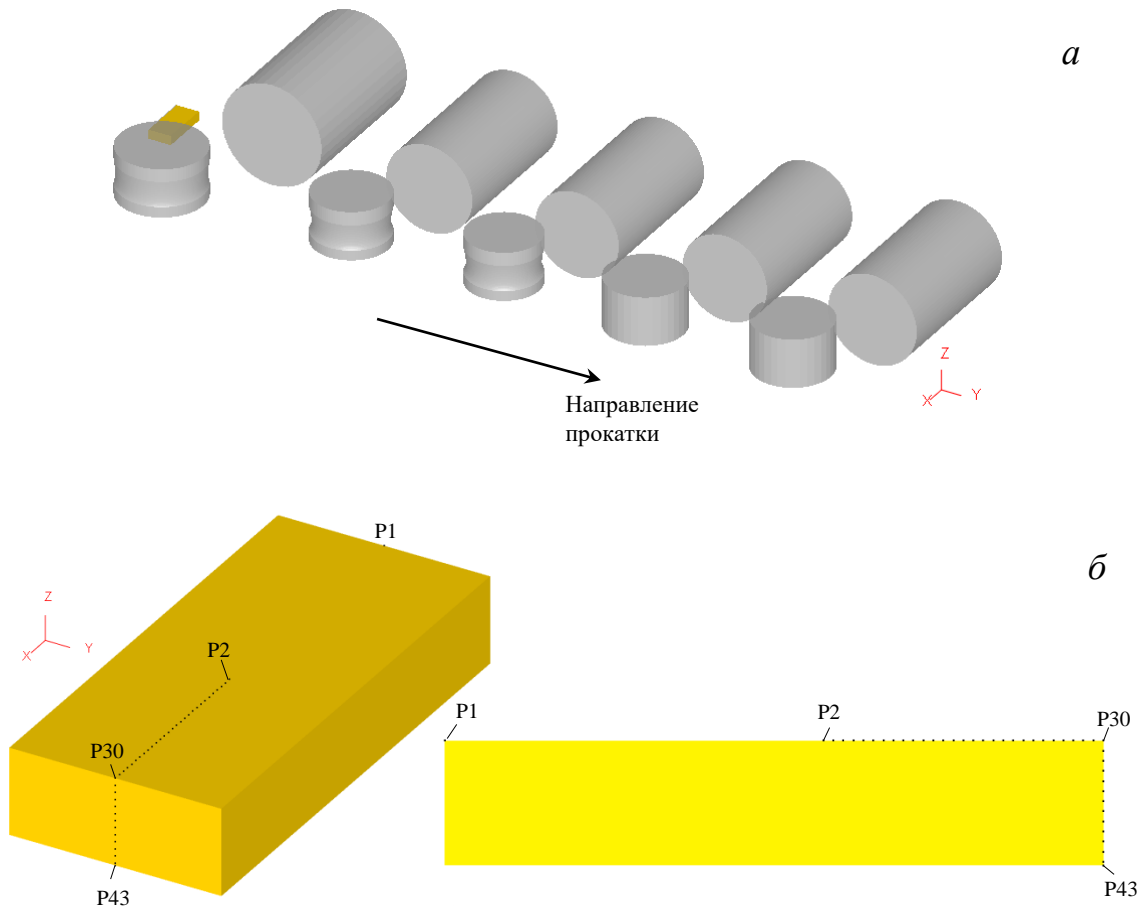


Рисунок 2.1 – Настройка 3D-модели процесса черновой прокатки (а),  
 местоположение точек на модели сляба и сечение сляба  
 с номерами точек отслеживания (б)

Адекватность моделирования оценивалась путем сравнения измеренных и рассчитанных параметров формоизменения. Для этого был выполнен промышленный эксперимент в черновой группе – прокатка сляба толщиной  $H_{сл} = 247$  мм и шириной  $B_{сл} = 1317$  мм с фиксацией технологических параметров процесса и измерением полученного недоката. С помощью недоката можно было оценить формоизменение металла в трех последних универсальных клетях черновой группы (рисунок 2.2).

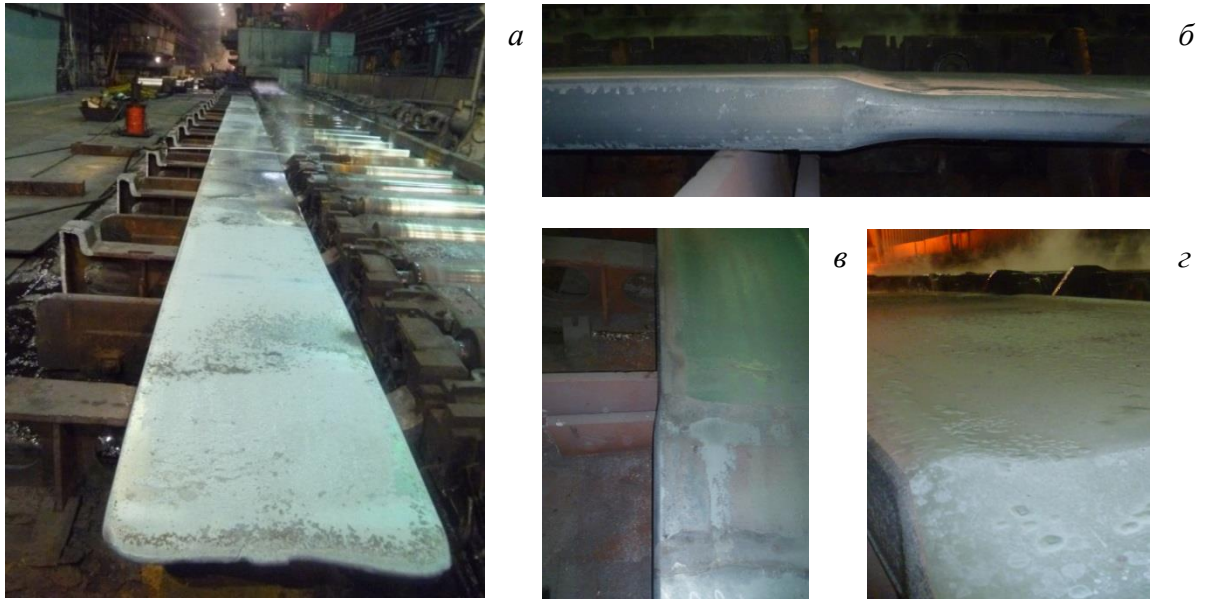


Рисунок 2.2 – Общий вид недоката в трех последних универсальных клетях черновой группы (а), вид сбоку (б) и фрагмент вида сверху (в) раската перед и после прокатки в горизонтальных валках клетки № 3, прикромочный наплыв после деформации раската в вертикальных валках клетки № 3 (г)

В таблице 2.1 приведены расчетные и измеренные значения ширины, толщины, обжатий и уширений, а также значения смещения металла от кромок сляба в направлении середины ширины на основе конечно-элементного моделирования (разность координат  $x$  угловых точек Р30 и Р43 рисунок 2.1, б). Толщина раската перед входом в клеть № 3 составила 132 мм. Как видно из таблицы 2.1, расхождения между расчетными и измеренными величинами толщины и ширины раската не превышают 4 %. Смещение металла удалось измерить только на выходе из черновой группы, расхождение с расчетными затеканиями составило 1,9 мм (5 %). При этом средние значения погрешности расчета усилия прокатки в клетях не превысили 11 %.

Таблица 2.1 – Рассчитанные по модели (числитель) и измеренные (знаменатель) величины формоизменения раската после деформации в клетях черновой группы стана 2000, мм

Параметр	Клеть № 3		Клеть № 4		Клеть № 5	
	ВВ	ГВ	ВВ	ГВ	ВВ	ГВ
Ширина	<u>1245,4</u>	<u>1293,3</u>	<u>1225,2</u>	<u>1275,4</u>	<u>1250,9</u>	<u>1266,1</u>
	1245	1293	1225	1278	1251	1268
Толщина у кромки	<u>150,6</u>	<u>87,1</u>	<u>109</u>	<u>51,5</u>	<u>57,5</u>	<u>36,3</u>
	148	88	113	52,5	58,9	36,6
Уширение	<u>18,4</u>	<u>47,9</u>	<u>21,9</u>	<u>50,2</u>	<u>6</u>	<u>15,2</u>
	16	48	25	53	6,4	17
Смещение металла	<u>14,1</u>	<u>34,4</u>	<u>16,8</u>	<u>36,1</u>	<u>28,8</u>	<u>35,1</u>
	–	–	–	–	–	–

ВВ – вертикальные валки; ГВ – горизонтальные валки

Исходя из полученных результатов, был сделан вывод, что реализация конечно-элементного моделирования в DEFORM-3D с достаточной точностью определяет формоизменение раската в клетях черновой группы стана 2000 и может быть использована для оценки величины смещения металла с узких граней раската на широкие.

## **2.2 Исследование влияния технологических параметров процесса черновой горячей прокатки на непрерывном широкополосном стане на величину смещения металла с узкой грани на широкую**

### **2.2.1 Влияние деформационных режимов прокатки в черновой группе**

На НШСП 2000 ПАО «Северсталь» наибольшую долю в сортаменте составляют низкоуглеродистые и качественные конструкционные марки стали,

прокатываемые из сляба толщиной 250 мм и шириной 1320 мм. При прокатке такого сортамента при существующих профилировках валков и при разнице между начальной шириной сляба и полосой в среднем 50 мм и важно было оценить возможность получения затекания менее 15 мм, тем самым обеспечив минимальную величину боковой обрезки.

Для оценки влияния суммарного обжатия в вертикальных валках на затекание металла с ребра на широкую грань были выбраны три варианта распределения обжатий (рисунок 2.3) [227]. Знак «←» у значений абсолютных обжатий показывает, что раствор в этой клетке больше в сравнении с раствором предыдущей клетки.

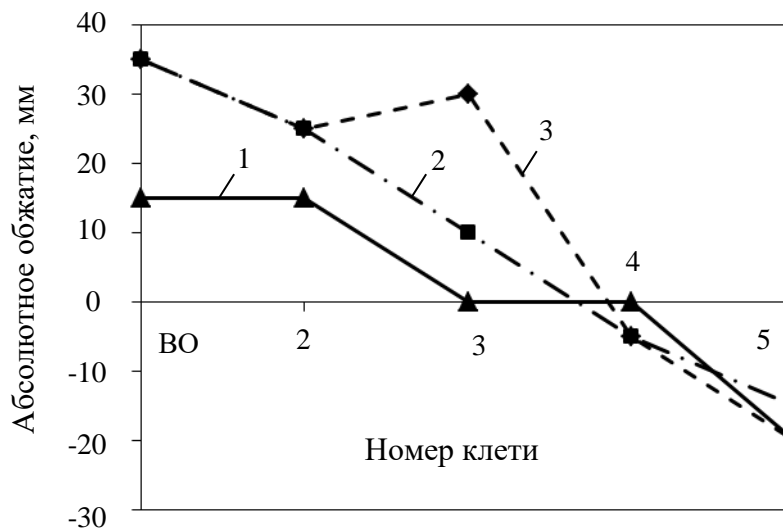


Рисунок 2.3 – Распределение абсолютных обжатий по клетям стана в вертикальных валках:  
1 – режим № 1; 2 – режим № 2; 3 – режим № 3

Абсолютное обжатие в вертикальных валках рассчитано по значениям раствора валков (таблица 2.2), без учета уширения при прокатке. Деформация в горизонтальных валках всех трех режимов одинаковая и после прокатки толщина промежуточного раската равна 35 мм. Из рисунка 2.3 и таблицы 2.2 видно, что у

режима 1 суммарное обжатие в вертикальных валках черновой группы составляет 30 мм, режима 2 – 70 мм и режима 3 – 90 мм.

Таблица 2.2 – Растворы валков по клетям стана и скорость прокатки сляба толщиной  $H_{сл} = 250$  мм и шириной  $B_{сл} = 1320$  мм

№ режима	ВО	Клеть № 1		Клеть № 2		Клеть № 3		Клеть № 4		Клеть № 5	
		ГВ	ВВ	ГВ	ВВ	ГВ	ВВ	ГВ	ВВ	ГВ	
Растворы валков, мм											
1	1305	185	1290	125	1290	80	1290	45	1310	35	
2	1285		1260		1250		1255		1270		
3	1285		1260		1230		1235		1255		
Скорость прокатки, м/с											
1, 2, 3	1,0	1,25	1,25	1,5	0,9	1,1	1,2	1,5	2,0	2,3	

ВО – вертикальный окалиноломатель; ВВ – вертикальные валки;

ГВ – горизонтальные валки.

Полученные на основе моделирования значения смещения металла от кромки на широкую грань в направлении середины раската и представленные в таблице 2.3 позволили сделать следующий вывод – величина суммарного обжатия в вертикальных валках черновой группы НШСГП не оказывает существенного влияния на затекание. Во всех случаях величина перехода металла с узкой грани на широкую превысила 40 мм и минимальное значение соответствует наименьшему суммарному вертикальному обжатию.

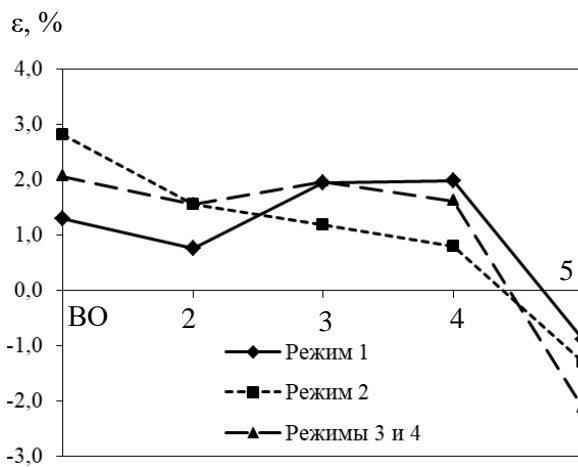
Для оценки взаимосвязи деформационных режимов в горизонтальных и вертикальных клетях с величиной смещения металла от ребра сляба на широкую грань выполнено исследование 4-х различных вариантов распределений обжатий в черновой группе (рисунок 2.4). Растворы валков и скорости прокатки представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.3 – Значения смещения металла от кромки на широкую грань в направлении середины раската, мм

№ режима	ВО	Клеть № 1	Клеть № 2		Клеть № 3		Клеть № 4		Клеть № 5	
		ГВ	ВВ	ГВ	ВВ	ГВ	ВВ	ГВ	ВВ	ГВ
1	12,57	37,5	20,42	46,57	29,78	45,12	37,63	50,71	43,34	42,36
2	12,93	39,67	20,95	56,13	32,77	47,82	42,73	50,96	43,52	43,7
3	12,93	39,67	20,95	56,13	34,56	48,3	45,12	52,85	39,87	45,8

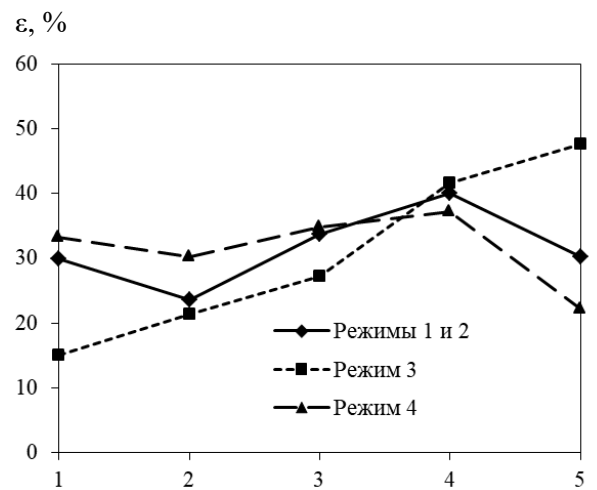
ВО – вертикальный окалиноломатель; ВВ – вертикальные валки;

ГВ – горизонтальные валки.



Номер клетки

*а*



Номер клетки

*б*

Рисунок 2.4 – Распределения относительных обжатий по клетям стана в вертикальных валках (*а*) и в горизонтальных валках (*б*)

Таблица 2.4 – Растворы валков по клетям стана и скорость прокатки сляба толщиной  $H_{сл} = 247$  мм и шириной  $B_{сл} = 1317$  мм

№ режима	ВО	Клеть № 1		Клеть № 2		Клеть № 3		Клеть № 4		Клеть № 5	
		ГВ	ВВ	ГВ	ВВ	ГВ	ВВ	ГВ	ВВ	ГВ	
Растворы валков, мм											
1	1300	173	1290	132,3	1265	87,7	1240	52,5	1251	36,6	
2	1280	173	1260	132,3	1245	87,7	1235	52,5			
3	1290	210	1270	165	1245	120	1225	70			
4	1290	165	1270	115	1245	75	1225	47			
Скорость прокатки, м/с											
1, 2, 3, 4	1,1	1,45	1,02	1,45	0,53	0,88	1,15	1,51	2,04	2,33	

ВО – вертикальный окалиноломатель; ВВ – вертикальные валки;

ГВ – горизонтальные валки.

Из рисунка 2.4 видно, что у режима 1 характер распределения обжатий в вертикальных и горизонтальных валках по клетям стана одинаковый – рост от первого прохода к четвертому. Снижение обжатий в вертикальных валках клетки № 2 объясняется отсутствием учета уширения после деформации в клетки № 1 и техническими ограничениями клетки. У режима 2 при таком же распределении обжатий в горизонтальных валках, как в первом режиме, обжатия в вертикальных валках снижаются. У режимов 3 и 4 примерно равномерное распределение обжатий в вертикальных валках в клетях № 1 – № 4. Такой же характер распределения и у режима 4 в горизонтальных проходах, у режима 3 – рост относительных обжатий по горизонтальным проходам при прокатке в черновой группе.

На рисунках 2.5 и 2.6 проиллюстрировано, как изменялась форма сечения раската в зоне кромок после прокатки в каждой клетке черновой группы по режиму 2 таблицы 2.4. Формы сечений получены перемещением точек отслеживания, заданных перед прокаткой и показанных на рисунке 2.1. Также на

рисунках 2.5 и 2.6 есть пояснения к определению величины смещения металла от кромок в направлении ширины. Валки первых трех вертикальных валков имели вогнутость на радиус, равную  $-0,21$  мм,  $-0,29$  мм и  $-0,29$  мм в вертикальном окалиноломателе, клетях № 2 и № 3 соответственно, что приводит к формированию выпуклой боковой грани раската.

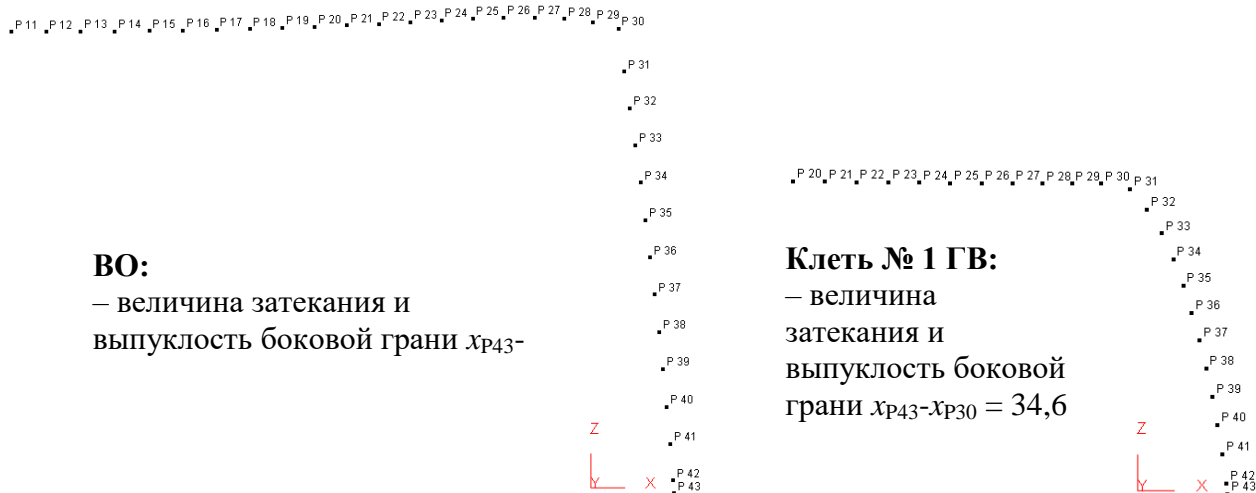


Рисунок 2.5 – Изменение формы раската в зоне кромки после прокатки в вертикальном окалиноломателе и клетки дуо по режиму 2 таблицы 2.4

Полученные на основе моделирования всех режимов значения смещения металла от кромки на широкую грань в направлении середины раската представлены в таблице 2.5.

Результаты исследования позволили сделать следующий вывод – распределение обжатию между вертикальными валками существенного влияния на затекание не оказывает. Величина смещения металла от ребра на широкую грань определяется степенью деформации в горизонтальных валках. Для уменьшения затекания необходимо снижать деформацию в первых трех горизонтальных проходах.



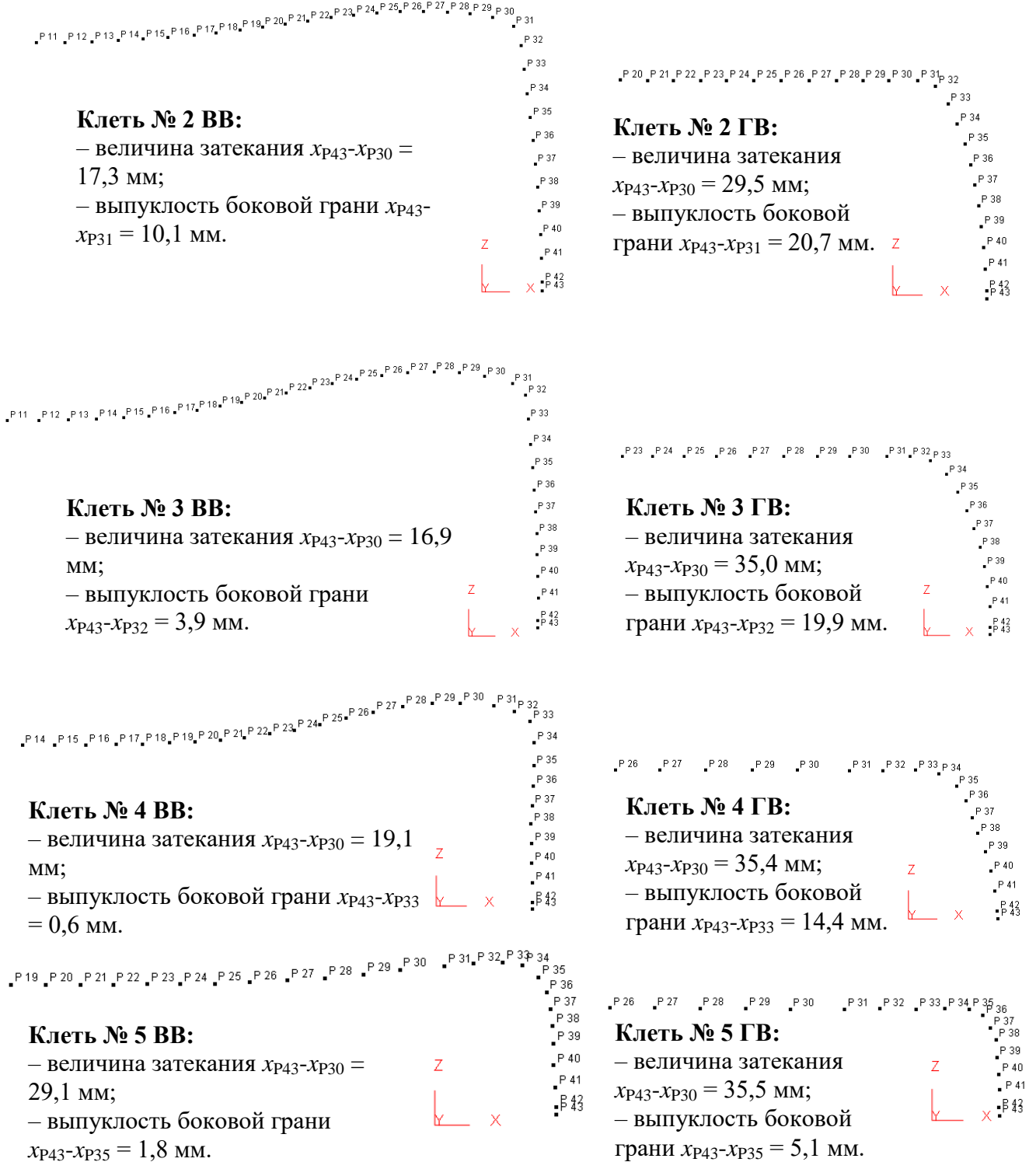


Рисунок 2.6 – Изменение формы раската в зоне кромки после прокатки в четырех универсальных клетях черновой группы по по режиму 2 таблицы 2.4

Таблица 2.5 – Значения смещения металла от кромки на широкую грань в направлении середины раската, мм

№ режима	ВО	Клеть № 1		Клеть № 2		Клеть № 3		Клеть № 4		Клеть № 5	
		ГВ	ВВ	ГВ	ВВ	ГВ	ВВ	ГВ	ВВ	ГВ	
1	14,9	33,6	18,9	30,3	16,7	34,9	18,2	36,7	26,2	36,7	
2	15,6	34,6	17,3	29,5	16,9	35,0	19,1	35,4	29,1	35,5	
3	15,1	20,3	14,6	29,5	16,9	21,4	8,0	26,7	19,7	29,4	
4	15,1	36,7	19,4	35,9	18,5	40,0	25,5	47,4	40,2	43,4	

ВО – вертикальный окалиноломатель; ВВ – вертикальные валки;

ГВ – горизонтальные валки.

Сравнение значений смещений металла при режимах 3 и 4 (таблица 2.5) показывает, что уменьшение суммарного обжатия на 20 % в первых трех горизонтальных проходах приводит к уменьшению затекания металла с ребра на широкую грань в два раза. Дальнейшая деформация приводит к снижению разницы между величиной затекания при прокатке по режимам 3 и 4. При анализе значений смещений металла при режимах 2 и 3 (таблица 2.5) установлено, что уменьшение суммарного обжатия до 10 % в первых трех горизонтальных проходах приводит к уменьшению затекания металла с ребра на широкую грань после прокатки в черновой группе стана до 20 %.

На рисунке 2.7 показана схема характерных точек наплыва и их переходов на примере сравнения двух профилей раската 1 и 2 в зоне кромок после прокатки в вертикальных и горизонтальных валках универсальной клетки № 3 соответственно. Прикромочный наплыв характеризуется точкой P28, имеющей максимальное значение толщины  $h_{\text{напл max}}$  и точкой на боковом ребре раската P33, находящейся на уровне, соответствующем толщине после прокатки в горизонтальной клетки № 2 –  $h_2$ .

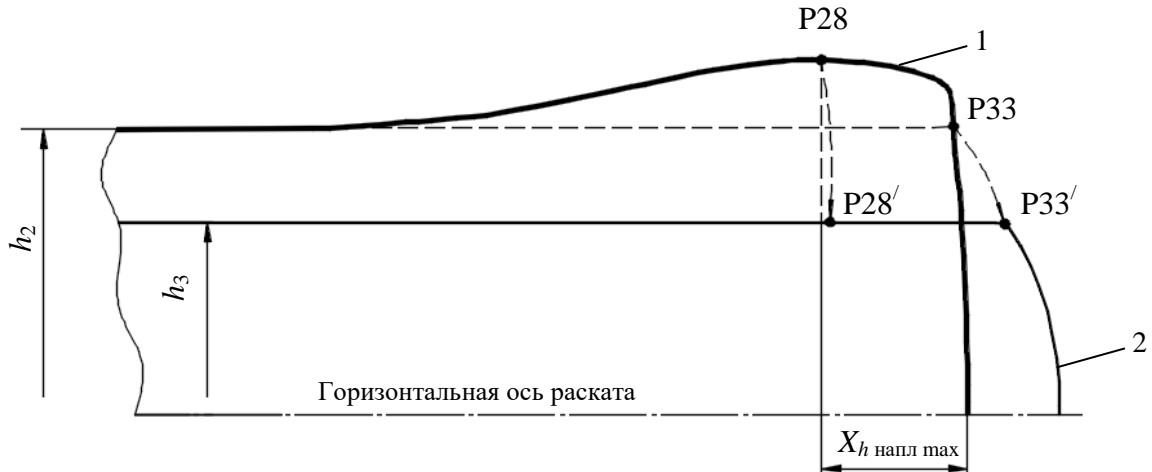


Рисунок 2.7 – Схема характерных точек наплыва и их переходов:  
 1 – профиль раската в зоне кромок после прокатки в вертикальных валках клетки № 3; 2 – профиль раската после прокатки в горизонтальных валках клетки № 3

В таблице 2.6 представлены значения максимальной толщины раската  $h_{\text{напл max}}$  в зоне наплыва и ее смещение  $X_{h_{\text{напл max}}}$  от кромки раската при деформациях в вертикальных валках по режиму прокатки 2 таблицы 2.4.

Таблица 2.6 – Максимальная толщина прикромочного наплыва и ее смещение от кромки раската при деформациях в вертикальных валках по режиму прокатки 2 таблицы 2.4

№ клетки	Толщина раската в середине, мм	№ точки, соответствующей $h_{\text{напл max}}$ (рис. 3.6 и 3.7)	$h_{\text{напл max}}$ , мм	$X_{h_{\text{напл max}}}$ , мм	Абсолютное обжатие $\Delta b$ , мм	$\Delta b/2$ , мм	Уширение $\Delta h$ , мм
ВО	247	P27	257,2	38,4	47,8	23,9	10,2
2	173	P27	197,2	41,2	55,4	27,7	24,2
3	132,2	P28	161,3	33,0	42,6	21,3	29,1
4	87,7	P30	109,2	19,1	51,5	25,75	21,5
5	52,5	P33	61,1	8,8	23,3	11,65	8,6

В таблице 2.6 величина абсолютного обжатия указана с учетом уширения после горизонтальных проходов. Видно, что с уменьшением толщины раската (от 90 мм и меньше) точка, характеризующая максимальное значение толщины напльва, смещается от кромки раската на меньшую величину ( $\sim$  в 0,7 раза), чем  $\Delta b/2$ , а при большей толщине раската – на величину в 1,5 раза большую  $\Delta b/2$  от кромки раската.

Также многовариантное численное моделирование различных деформационных режимов прокатки показало следующее:

– точка с максимальной толщиной напльва смещается на 2–4 мм в сторону кромки раската при последующем обжатии в горизонтально клетки, при этом, большие значения смещения соответствуют обжатию раската в последних горизонтальных клетях черновой группы;

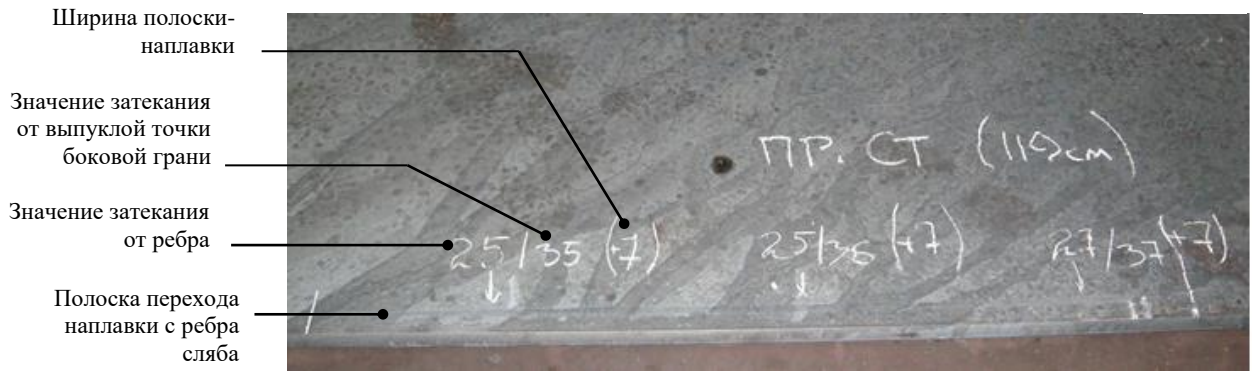
– нижняя точка напльва на боковом ребре раската при последующей горизонтальной прокатке переходит в точку, находящуюся на кромке раската. На рисунке 2.7 – это точка P33'.

Такие перемещения подтверждаются для всех пяти проходов, показанных на рисунках 2.5 и 2.6.

Также была проведена опытно-промышленная проверка режимов прокатки 2 и 3 (таблица 2.4) на стане 2000. На верхнее и нижнее ребро каждой из боковых граней двух слябов были наплавлены полоски длиной 125 мм и шириной 5–6 мм из нержавеющей стали на расстоянии 500 мм от торцов головной и хвостовой части. Измеренное затекание на широкую грань раската при прокатке по варианту 2 составило 32–37 мм (рисунок 2.8), а по варианту 3 – 27–32 мм.

Полученные результаты показали, что при разнице между начальной шириной сляба и шириной полосы от 50 мм и больше перераспределением обжатий между клетями черновой группы стана 2000 невозможно получить затекание менее 30 мм.

а



б

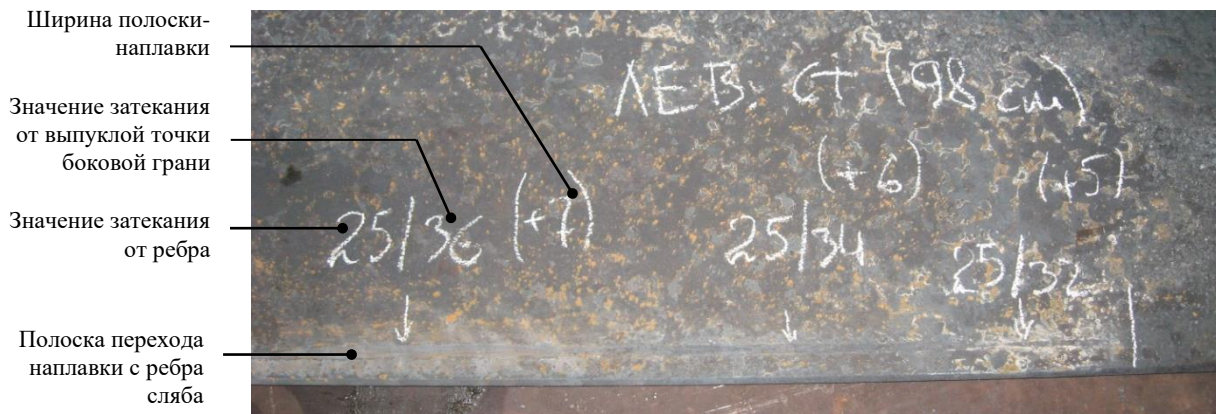


Рисунок 2.8 – Измерения перехода металла с ребра сляба на широкую грань раската после черновой прокатки по режиму 2 таблицы 2.4 по правой (а) и левой (б) граням сляба

### 2.2.2 Влияние профилировок валков

Анализ течения металла в прикормочной области при последовательной прокатке в вертикальных и горизонтальных валках показал, что одним из направлений повышения эффективности формообразования в части уменьшения перехода металла с узкой грани на широкие является снижение выпуклости боковых граней раската после каждого прохода. Полноценно воздействовать на

форму боковой грани раската можно в вертикальных проходах на основе профилирования валков.

Используемые вогнутые профилировки вертикальных валков в первых трех проходах черновой группы стана 2000 решали задачу стабильного удержания раската при прокатке, исключая смещение по высоте, но приводили к увеличению выпуклости боковых граней раската. В связи с этим было выполнено исследование взаимосвязи формы профиля вертикальных валков вертикального окалиноломателя с получаемой формой боковой грани и величиной перехода металла на широкую грань при последующей горизонтальной прокатке.

При постановке вычислительных экспериментов в программе DEFORM-3D рассматривалось более 20-ти различных вариантов профилировок – вогнутые, цилиндрическая, калибры с гладким дном, калибры с выступом, одноконусные, трехконусные и др. На рисунке 2.9 представлены наиболее характерные формы профилей, в исследовании варьировались их различные геометрические параметры.

При моделировании использовалась одна плоскость симметрии модели сляба по ширине. Обжатие в вертикальной клетки составляло  $\Delta b = 30$  мм, в клетки дуо –  $\Delta h = 60$  мм. Остальные параметры задавались аналогично моделированию прокатки всей черновой группы стана 2000. Для оценки формоизменения в прикормочной области было задано 46 точек с расстоянием 10 мм между точками. Угловые точки краевой зоны модели сляба имели обозначения P11 и P36. Результаты формоизменения после вертикального и горизонтального проходов представлены на рисунках 2.10–2.13 для вариантов профилировок вертикальных валков рисунка 2.9.

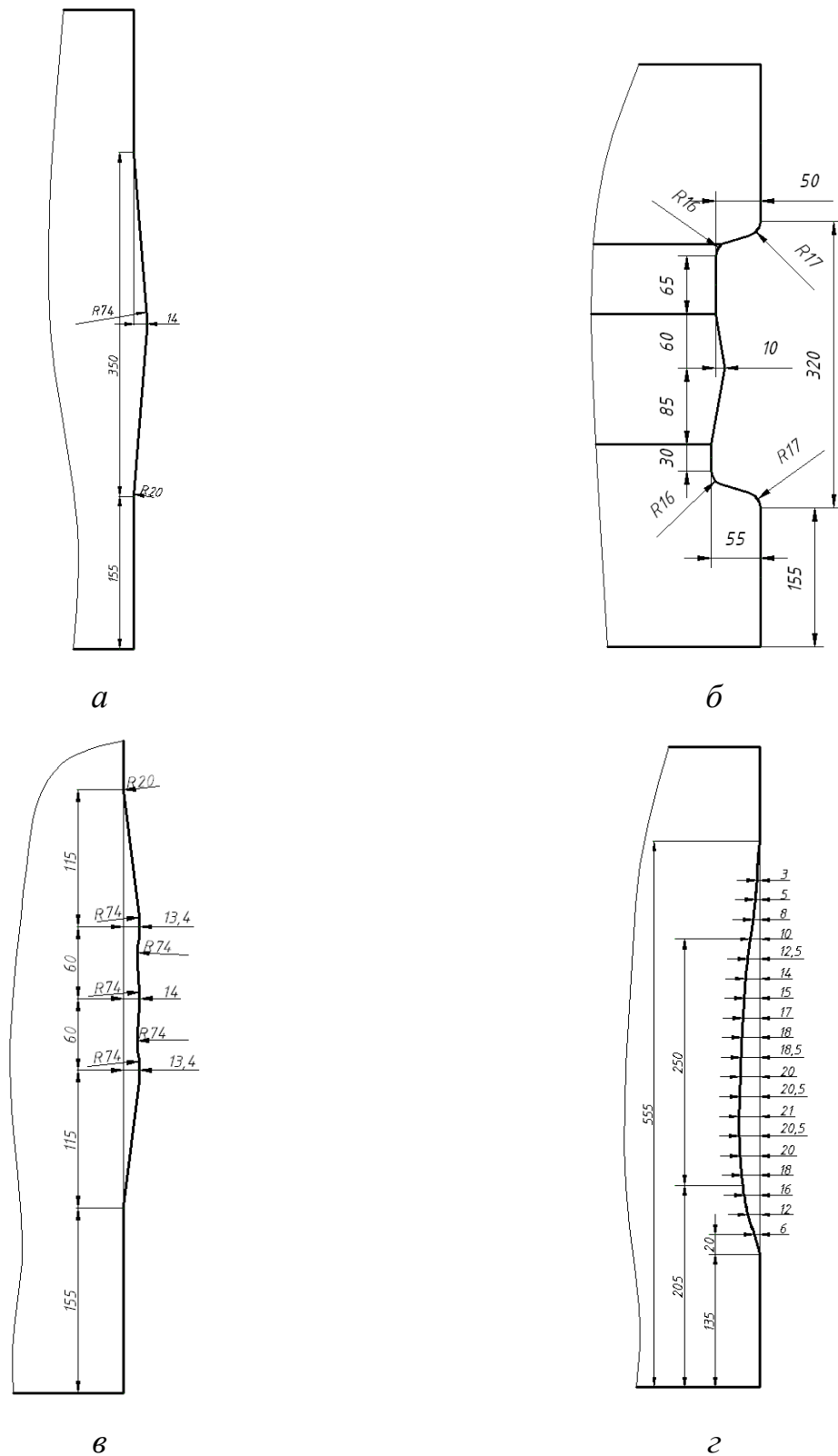


Рисунок 2.9 – Формы профилей вертикальных валков:

*a* – одноконусный профиль; *б* – калибр с выступом;

*в* – трехконусный профиль; *г* – вогнутый профиль

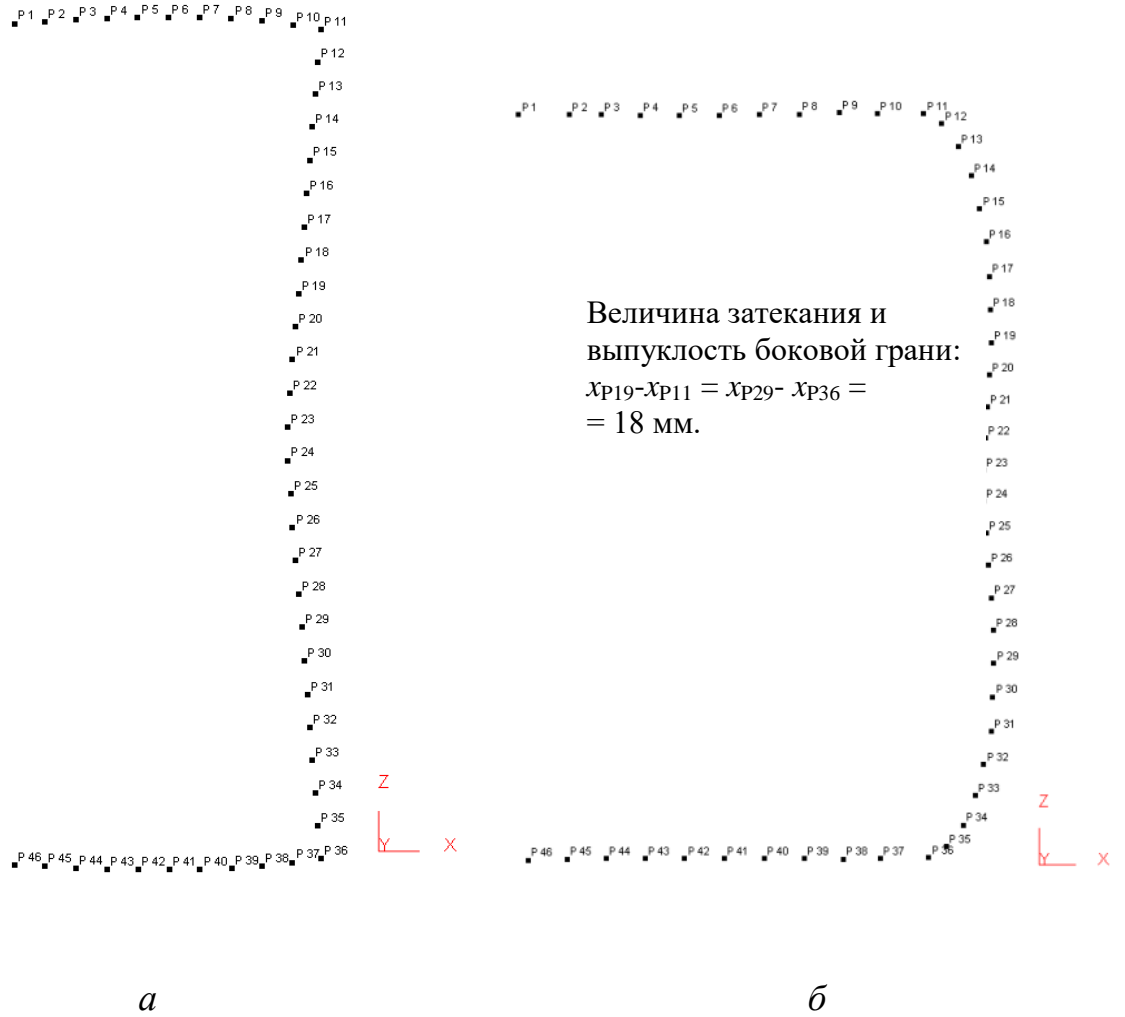


Рисунок 2.10 – Формоизменение металла после вертикального (*а*) и горизонтального (*б*) проходов при одноконусном профиле вертикального валка (рисунок 2.9, *а*)

Наименьшие значения перехода металла с узкой боковой грани на широкую обеспечивают профили вертикальных валков, имеющих выступы типа «конус». Переход в этом случае составляет от 18 мм до 26 мм, при существующем вогнутом профиле величина перехода составляет 36 мм.



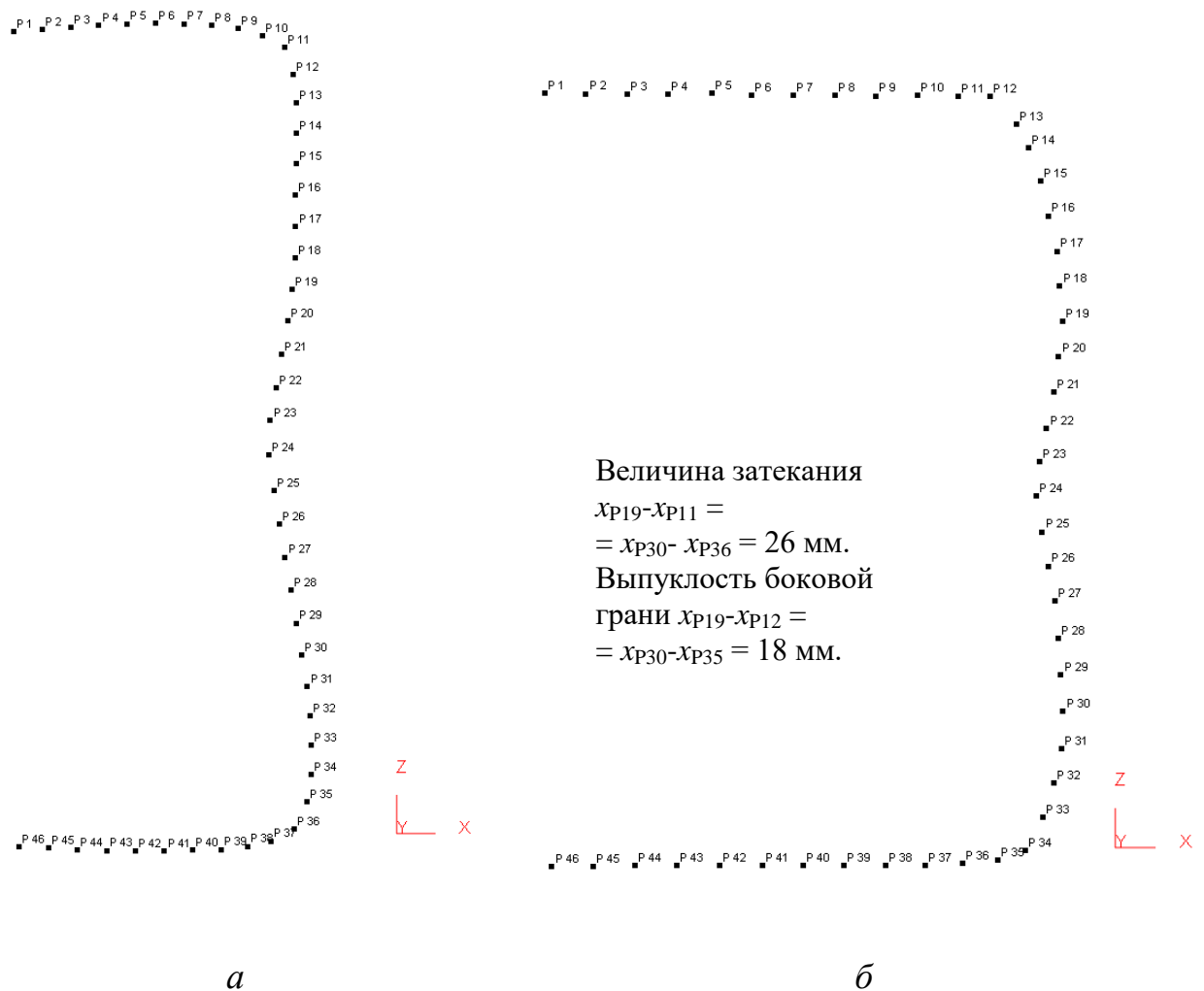


Рисунок 2.11 – Формоизменение металла после вертикального (*a*) и горизонтального (*б*) проходов при форме профиля вертикального вала – калибр с выступом (рисунок 2.9, *б*)

Дальнейшее моделирование всей черновой группы с такими профилировками при прокатке по режиму 3 таблицы 2.4, обеспечивающему наименьшее затекание, показало следующее:

- Профилирование валков только вертикального окалиноломателя существенного уменьшения затекания на выходе из черновой группы не дает.
- Профилирование всех пяти пар вертикальных валков, а также трех первых пар вертикальных валков дает некоторое уменьшение затекания до 20-25 мм.

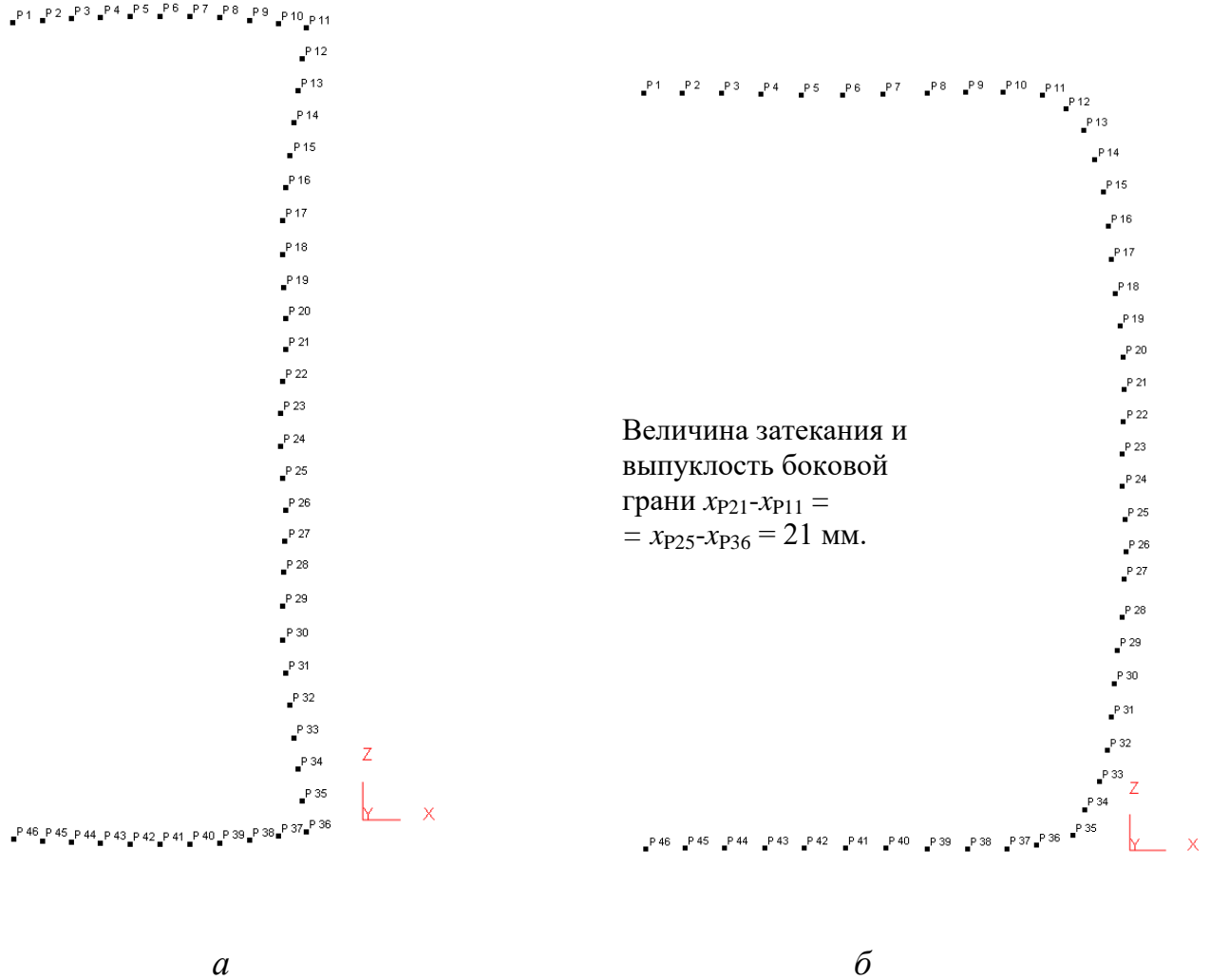


Рисунок 2.12 – Формоизменение металла после вертикального (*a*) и горизонтального (*б*) проходов при трехконусном профиле вертикального валка (рисунок 2.9, *в*)

Профили *a* и *в* (рисунок 2.9) трудно реализовать в условиях цеха из-за значительного увеличения затрат времени и расходов на подготовку валков, а также нестабильного положения раската по высоте вертикальных валков, поэтому было рекомендовано изменить вогнутые профилировки вертикальных валков первых трех проходов на профили, имеющие выступ, а для исключения смещения раската по вертикали и стабилизации процесса прокатки бочку валка выполнять с калибром. Окончательная форма профиля, принятая на производстве, представлена на рисунке 2.14.

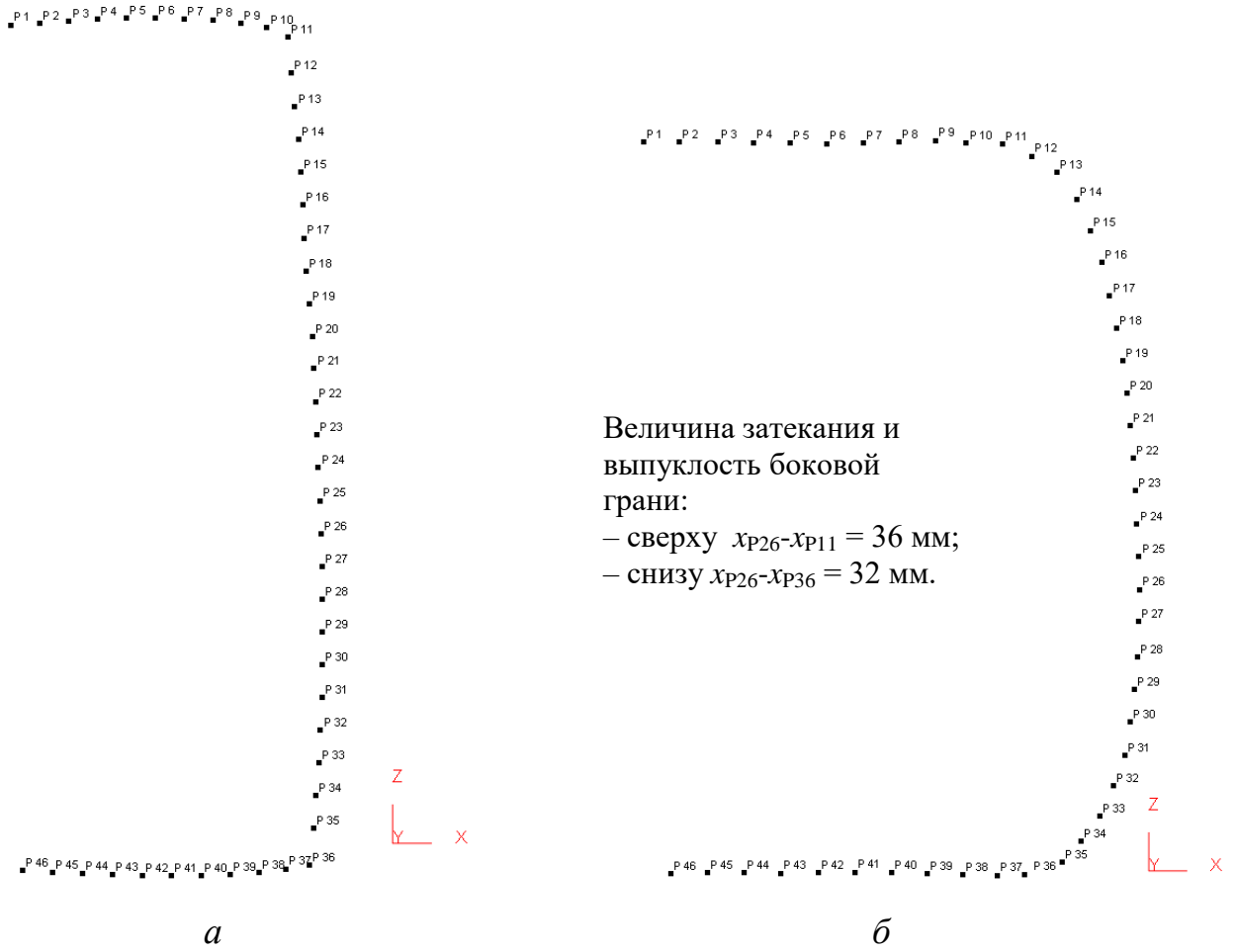


Рисунок 2.13 – Формоизменение металла после вертикального (*a*) и горизонтального (*б*) проходов при вогнутой профилировке вертикального вала (рисунок 2.9, *з*)

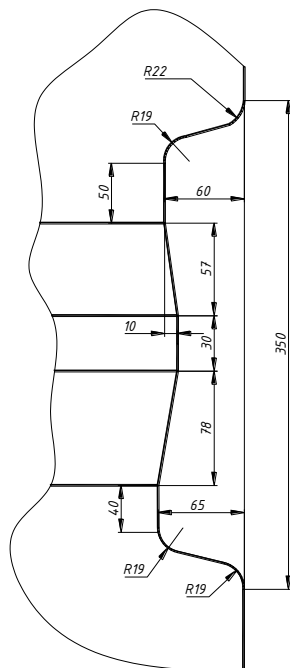


Рисунок 2.14 – Калибр вертикальных валков, принятый к использованию на стане 2000

### 2.2.3 Влияние скоростных параметров и геометрии заготовки

Для исследования влияния роста скорости горизонтальных валков в универсальной клети на величину уширения и переход металла с узкой грани на широкую был выполнен вычислительный эксперимент по оценке формоизменения раската на выходе из горизонтальных валков клети № 5 при увеличении скорости прокатки в ней с 2,3 м/с до 3,5 м/с шагом 0,2 м/с, режим прокатки 3 таблицы 2.4. Получено, что увеличение скорости до 3,1 м/с не оказывает существенного влияния на уширение и величину затекания. При дальнейшем увеличении скорости, начиная с  $v = 3,3$  м/с, уширение и величина перехода металла с узкой грани на широкую после клети № 5 начинают уменьшаться: при скорости  $v = 3,3$  м/с уширение уменьшилось на 6 мм, затекание уменьшилось на 2,7 мм, при скорости  $v = 3,5$  м/с уширение уменьшилось на 11,7 мм, затекание уменьшилось на 3,6 мм в сравнении со скоростью  $v = 2,3$  м/с. Дальнейшее увеличение скорости не оказывает существенного воздействия на уширение и величину затекания.

Таким образом, при росте скорости горизонтальных валков на 30 % в сравнении со скоростью вертикальных валков в универсальной клети за счет увеличения натяжения между вертикальными и горизонтальными валками можно уменьшить переход металла с узкой грани на широкую до 10 %.

Анализ результатов моделирования процесса деформации в черновой группе позволил рассмотреть прокатку сляба, на котором предварительно выполнены фаски 50x50 мм в переходах с узких граней на широкие (рисунок 2.15, а).

Для моделирования также был выбран режим прокатки 3 таблицы 2.4. Расположение точек P1–P38 в сечении модели сляба перед прокаткой показано на рисунок 2.15, б, изменение положение точек в зоне кромок – рисунки 2.16 и 2.17.

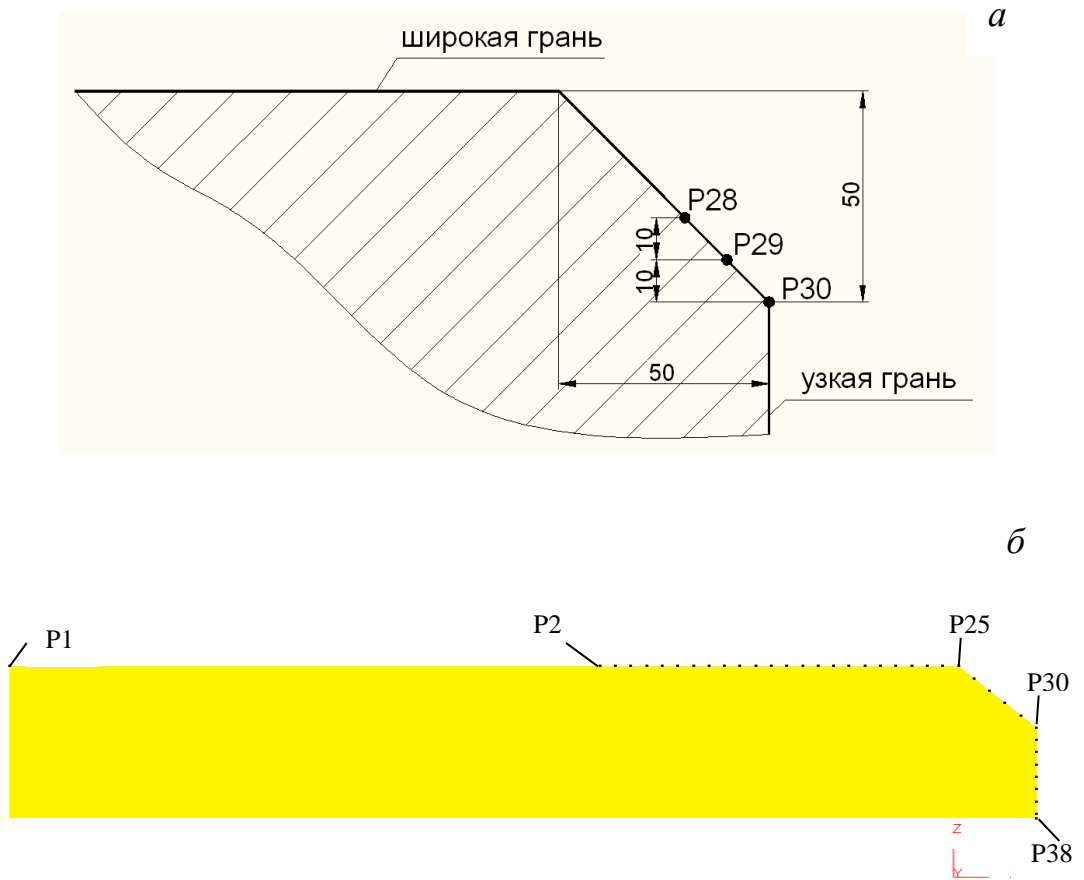


Рисунок 2.15 – Схема фаски на слябе (а) и расположение контрольных точек (б)

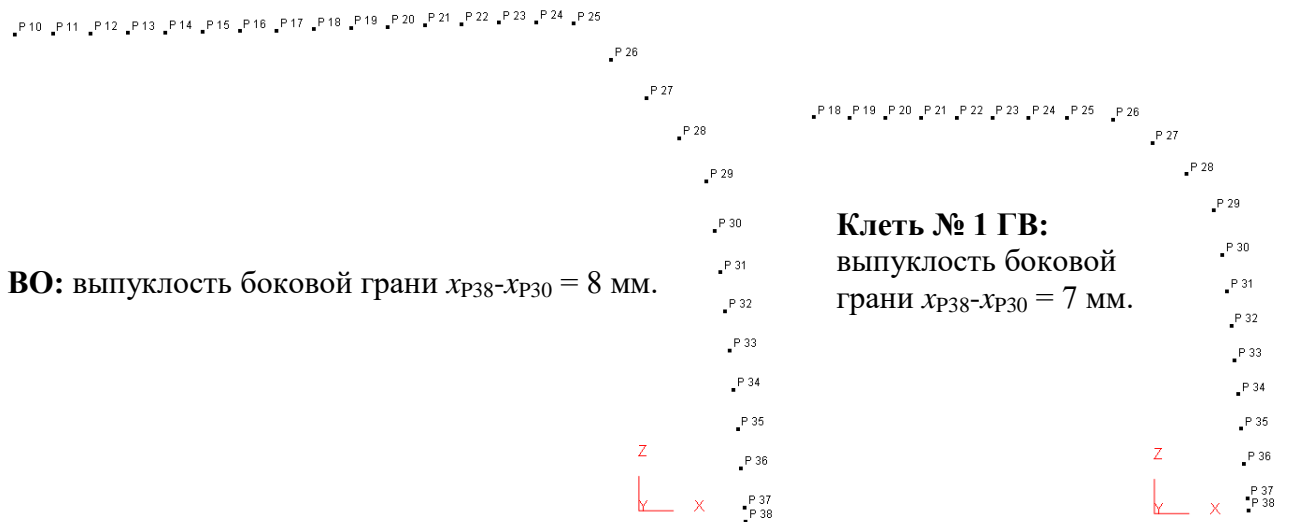


Рисунок 2.16 – Изменение формы раската в зоне кромки после прокатки в вертикальном окатиноломателе и клетки дуо при прокатке по режиму 3 таблицы 2.4 (сляб с фаской 50x50 мм)

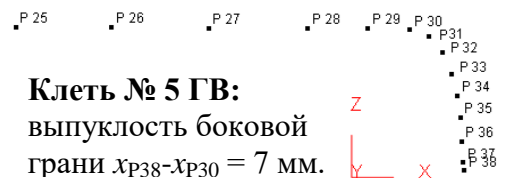
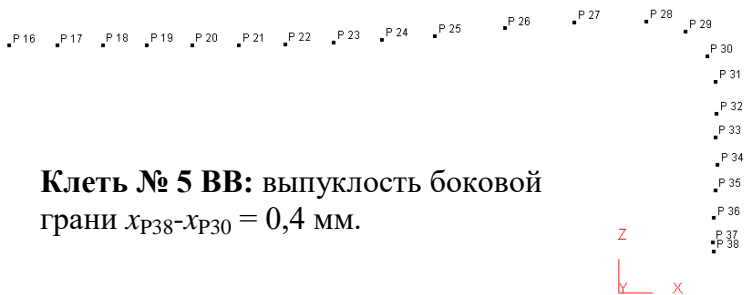
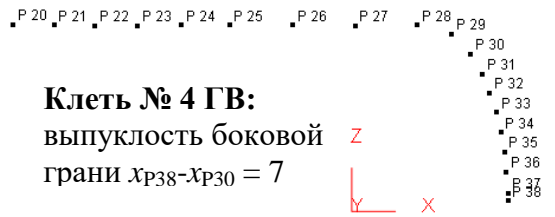
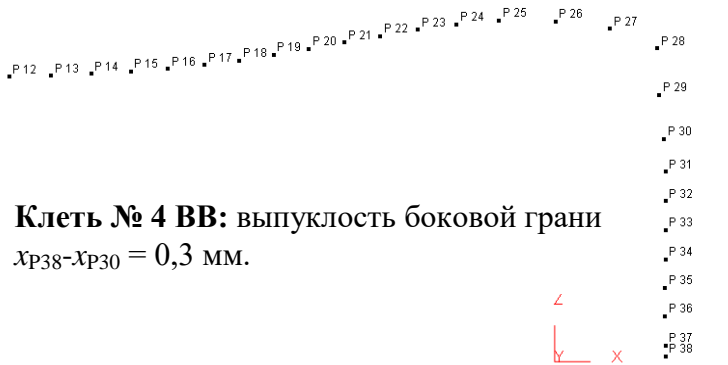
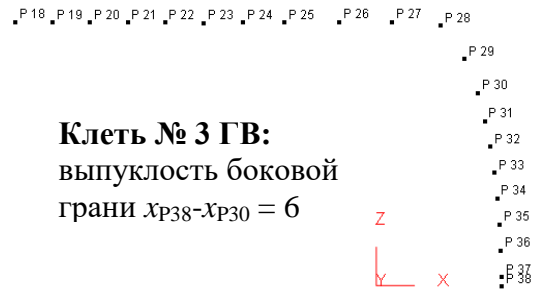
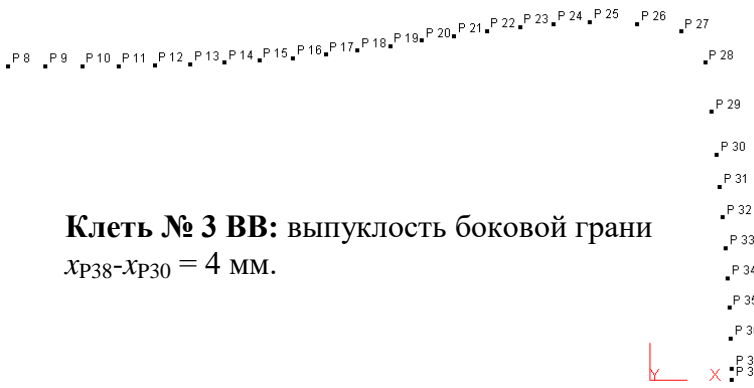
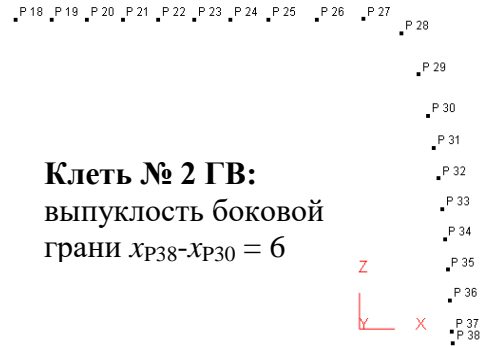
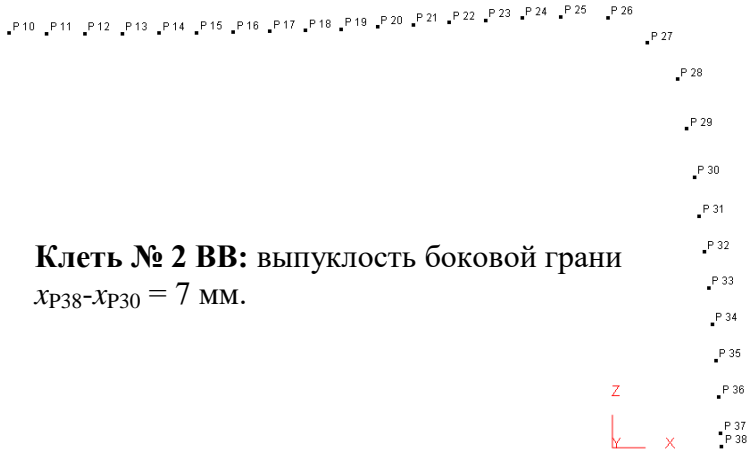


Рисунок 2.17 – Изменение формы раската в зоне кромки после прокатки в четырех универсальных клетях черновой группы при прокатке по режиму 3 таблицы 2.4 (сляб с фаской 50x50 мм)

Как видно рисунков 2.16 и 2.17, выполнение фаски 50x50 мм существенно уменьшает затекание с ребра на широкую грань на раскате, выходящем из черновой группы клетей:

– нижняя точка фаски P30 выходит на край широкой грани, т.е. отсутствует затекание;

– промежуточные точки фаски P28, P29 перемещаются по широкой грани на расстояние 5–13 мм, тем самым обеспечивается затекание менее 15 мм.

Этот вариант был предложен к опробованию. Для его реализации необходимо предусмотреть фаски в конструкции кристаллизатора.

Таким образом, выполненные исследования показали, что при разнице между начальной шириной сляба и шириной полосы от 50 мм и более только перераспределением обжатий между клетями черновой группы стана 2000 невозможно получить затекание менее 30 мм и эффективным решением в этом случае является выполнение фасок на ребрах сляба.

## **Выводы по главе 2**

1. Описана реализация модели процесса прокатки на основе применения программного комплекса DEFORM-3D для прогнозирования смещения металла от кромок сляба в направлении середины ширины. Экспериментально подтверждена сходимость результатов моделирования с данными измерений формоизменения раската при черновой прокатке на стане 2000 ПАО «Северсталь».

2. На основе экспериментальных исследований и численного моделирования получены новые закономерности формообразования проката в черновой группе непрерывного стана:

2.1. Величина смещения металла от ребра на широкую грань определяется степенью деформации в горизонтальных валках и распределение обжатий между вертикальными валками существенного влияния на затекание не оказывает. Для

уменьшения затекания необходимо снижать деформацию в первых трех горизонтальных проходах. Уменьшение суммарного обжатия до 10 % в первых трех горизонтальных проходах приводит к уменьшению затекания металла с ребра на широкую грань после прокатки в черновой группе стана до 20 %.

2.2. Прикромочный наплыв после прокатки в вертикальных валках характеризуется точкой, имеющей максимальное значение толщины, и точкой на боковом ребре раската, находящейся на уровне, соответствующем толщине после прокатки в горизонтальной клетке. Установлено, что при последующем обжатии в горизонтально клетке

– точка с максимальной толщиной наплыва смещается на 2–4 мм в сторону кромки раската, при этом, большие значения смещения соответствуют обжатию раската в последних горизонтальных клетках черновой группы;

– нижняя точка наплыва на боковом ребре раската при последующей горизонтальной прокатке переходит в точку, находящуюся на кромке раската.

2.3. Определено, что при росте скорости горизонтальных валков на 30 % в сравнении со скоростью вертикальных валков в универсальной клетке за счет увеличения натяжения между вертикальными и горизонтальными валками можно уменьшить переход металла с узкой грани на широкую до 10 %.

3. Моделированием и опытно-промышленной прокаткой показано, что при разнице между начальной шириной сляба и требуемой шириной промежуточного раската от 50 мм и более только перераспределением обжатий между клетками черновой группы стана 2000 невозможно получить затекание менее 30 мм.

4. Разработаны технологические решения, направленные на уменьшение перехода металла с узкой грани на широкую:

4.1. Предложено использовать профили вертикальных валков, имеющие выступы типа «конус» и обеспечивающие получение вогнутой боковой грани раската при прокатке. Для стабильного положения раската по высоте вертикальных валков без увеличения затрат времени и расходов на подготовку валков рекомендовано изменить вогнутые профилировки вертикальных валков



первых трех проходов черновой группы стана 2000 на профили, имеющие выступ, а бочку валка выполнять с калибром.

4.2. Установлено, что при разнице между начальной шириной сляба и требуемой шириной промежуточного раската от 50 мм и больше эффективным решением по снижению обрезки кромок полос является выполнение фасок на ребрах сляба.

## **Глава 3. Развитие методов формообразования поперечного профиля листового проката и профилирования валков листопрокатного производства**

### **3.1 Расчет упругих деформаций и напряжений валковых систем кварто**

Значительное влияние на нормируемые показатели точности поперечного профиля прокатываемых полос и листов (поперечную разнотолщинность, клиновидность, местные утолщения) и неплоскостность оказывает неравномерность распределения упругих деформаций валков по длине бочки в контакте с полосой под действием нестабильных факторов технологии. Повышение точности расчета упругих деформаций валков способствует совершенствованию методов контроля указанных показателей и управления ими. При этом весьма важным является возможность оценки напряженного состояния валковых систем для повышения их стойкости, определяющей эффективность технологического процесса прокатки, как в части повышения качества продукции и производительности, так и снижения расходного коэффициента прокатных валков.

Одним из перспективных методов расчета упругих деформаций и напряжений валковых систем является метод конечных элементов, позволяющий для полноразмерной трехмерной модели валкового узла определять, как напряжения в различных зонах, так и перемещения любых точек для нахождения образующих рабочих валков, формирующих поперечный профиль полосы. На основе анализа различных схем расчета валковых систем методом конечных элементов [102–106, 228–237] разработан вариант моделирования валковой системы кварто, отличающийся возможностью учета различных профилировок, конструктивных особенностей, а также условий контактного взаимодействия валков и рабочего валка с полосой.

Первоначально создается трехмерная модель валков в системе конструкторского проектирования (САД-системе), включающая верхнюю или

нижнюю пару валков. Поскольку в конструкции рабочей клетки предусмотрены специальные устройства для уравнивания валков, из рассмотрения исключено действие гравитационных сил. Это позволяет в силу симметрии задачи выполнить анализ лишь для одного валкового полукомплекта, например, для верхних рабочего и опорного валков. Модели валков включают бочки валков и участки цапф, где устанавливаются подшипниковые опоры. При создании моделей валков используются их реальные чертежи, бочки моделей валков выполняются с исходными, принятыми по технологии профилировками и скосами. На рисунке 3.1 представлены возможные варианты симметричных профилировок валков.

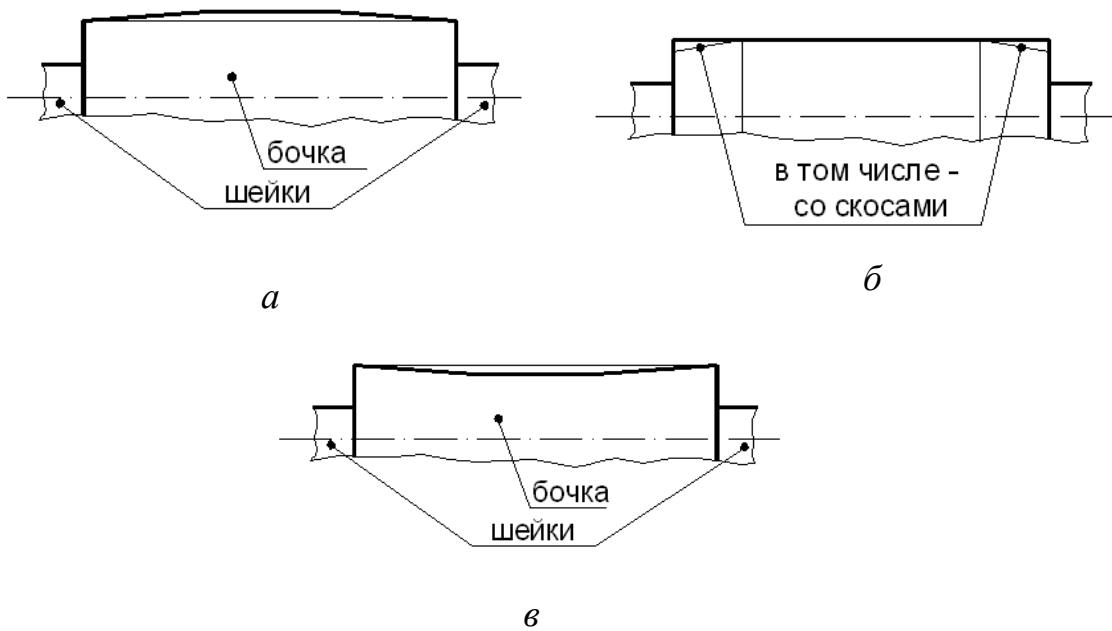


Рисунок 3.1 – Варианты симметричных профилировок:

*а* – выпуклая; *б* – цилиндрическая; *в* – вогнутая

Максимальные значения выпуклостей или вогнутостей в середине бочки  $\Delta D_{\text{шл.оп}}$  и  $\Delta D_{\text{шл.р}}$  при симметричных профилировках равны:

$$\begin{aligned} \Delta D_{\text{шл.оп}} &= D_{\text{оп.с}} - D_{\text{оп.к}}; \\ \Delta D_{\text{шл.р}} &= D_{\text{р.с}} - D_{\text{р.к}}, \end{aligned} \quad (3.1)$$

где  $D_{оп.с}$  и  $D_{р.с}$  – диаметры в середине бочек;  $D_{оп.к}$  и  $D_{р.к}$  – диаметры у краев бочек (для опорного валка – у края активной части бочки, без учета скосов).

Исходное межосевое расстояние между рабочим и опорным валками у задается из условия, чтобы до приложения рабочей нагрузки (силы прокатки) валки соприкасались точками профилей бочек, принадлежащими сечениям с максимальными диаметрами (рисунок 3.2):

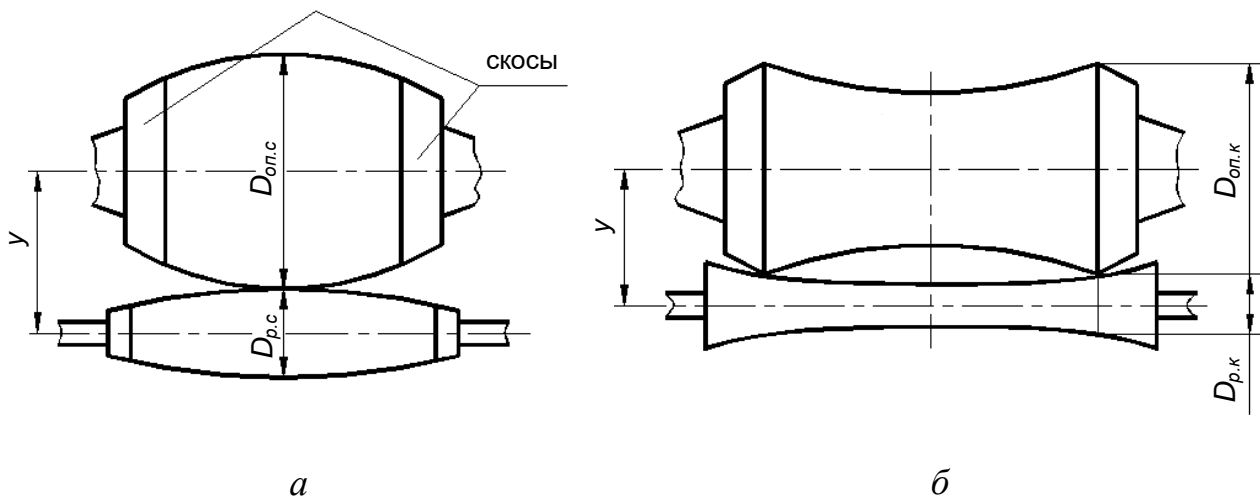


Рисунок 3.2 – Межосевое расстояние в ненагруженном состоянии:

*а* – при выпуклых профилировках;

*б* – при вогнутых профилировках

– при выпуклых профилировках:

$$y = 0,5(D_{оп.с} + D_{р.с}), \quad (3.2)$$

– при вогнутых профилировках:

$$y = 0,5(D_{оп.к} + D_{р.к}). \quad (3.3)$$

На рисунке 3.3 представлены асимметричные выпукло-вогнутые профилировки бочек рабочих и опорных валков, описываемые выражением (1.3). В системе выпукло-вогнутых профилировок образующая верхнего опорного валка зеркально отображает образующую верхнего рабочего валка и при отсутствии

осевого смещения рабочего валка ( $C = 0$ ) максимальный радиус рабочего валка совпадает с минимальным радиусом опорного.



Рисунок 3.3 – Асимметричные выпукло-вогнутые профилировки бочек рабочих валков (а) и опорных валков (б):

$x$  – текущая координата в осевом направлении валка;

$R(x)$  – радиус в точке  $x$ ;  $R_0$  – радиус в положении  $x = 0$ ;

$L_p$  и  $L_{оп}$  – длина бочек рабочего и опорного валков

Трехмерная модель из САД-системы далее импортируется в вычислительную среду конечно-элементного анализа, где создается конечно-элементная модель валкового узла. На рисунке 3.4 показаны созданные в SIMULIA Abaqus конечно-элементные модели валковых узлов: а – клетки чистовой группы НШСГП стана 2000; б – клетки стана холодной прокатки 2100 с осевой сдвижкой рабочих валков.

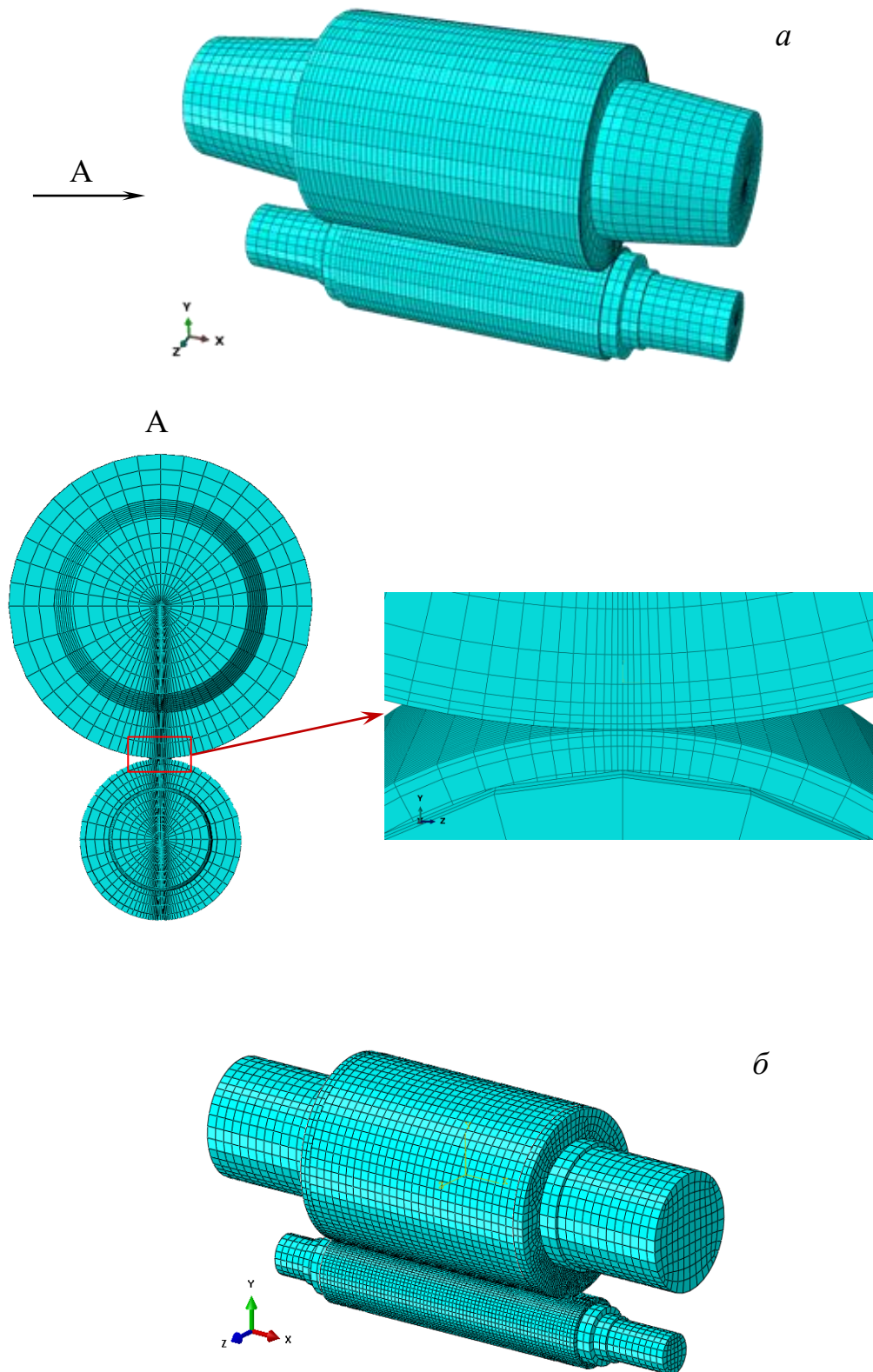


Рисунок 3.4 – Конечно-элементные модель валковых систем различных станов:  
*a* – стана горячей прокатки 2000; *б* – стана холодной прокатки

В контакте рабочего и опорного валков и на бочке рабочего валка в контакте с полосой выполняется измельчение сетки, при этом плотность сетки выбирается так, чтобы дальнейшее ее увеличение не приводило к росту значений анализируемых параметров.

Моделирование напряженно-деформированного состояния валковой системы реализуется, исходя из следующих граничных условий:

- запрещены перемещения наружных поверхностей цапф под подшипниками опорного валка в направлении осей  $Y$  и  $Z$ ;
- запрещены перемещения наружных поверхностей цапф под подшипниками рабочего валка в направлении оси  $Z$ ;
- на рабочий валок со стороны металла действует сила прокатки, распределенная по площади очага деформации;
- коэффициент трения в паре «рабочий валок – опорный валок» равен 0,2.

Значение силы прокатки получают экспериментальным путем или с использованием модели расчета силы прокатки д.т.н. Э.А. Гарбера и д.т.н. И.А. Кожевниковой [14, 15, 107, 108], позволяющей также определять параметры очага деформации при холодной и горячей прокатке, его длину  $l_c$  (рисунок 3.5), включая размер зоны упругого и пластического обжатия полосы –  $x_1$  и длину зоны упругого восстановления части толщины полосы  $x_2$ . Ширина очага деформации определяется шириной прокатываемой полосы.

Согласно публикациям по вопросам трения, изнашивания и моделирования фрикционного контакта пары трения «рабочий валок – опорный валок» [238–243] коэффициент трения в межвалковом контакте изменяется в диапазоне 0,1–0,335 и зависит от многих физико-механических свойств контактирующих поверхностей. При моделировании принята величина, близкая к среднему значению из приведенного диапазона. Также в расчете принято, что модуль упругости материала валков равен  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа; коэффициент Пуассона материала валков –  $\mu = 0,3$ .

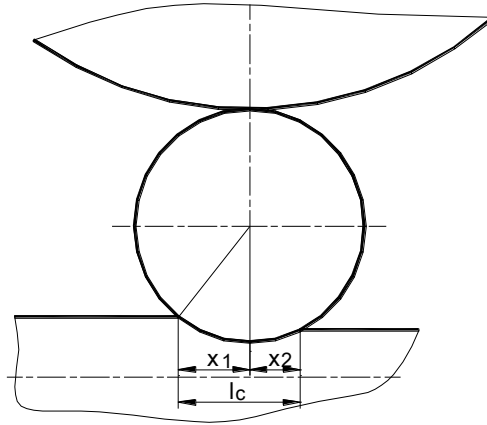


Рисунок 3.5 – Схема к заданию длины очага деформации:

$x_1$  – длина зоны упругого и пластического обжатия полосы,

$x_2$  – длина зоны упругого восстановления части толщины полосы

На рисунке 3.6 в качестве примера представлены результаты расчета напряжений валковой системы клетки № 12 чистовой группы стана 2000 при прокатке полосы из марки стали 08пс шириной  $b = 1320$  мм с силой  $P = 10$  МН на основе конечно-элементной модели рисунок 3.4, а. Диаметры бочек рабочего и опорного валков были взяты равными соответственно  $D_p = 800$  мм и  $D_{оп} = 1500$  мм. Длина дуги контакта составила 16 мм. Максимальное напряжение на глубине 3 мм от поверхности составляет 499 МПа, а на поверхности – 425 МПа (рисунок 3.6, а и в). Из распределения напряжений сдвига (рисунок 3.6, б) видно, что на площадке контакта валков происходит смена их знака и в середине площадки контакта значение напряжений равно нулю. Распределение напряжений по длине бочки опорного (рисунок 3.6, г) показывает, что в зоне начала скосов напряжения на поверхности увеличиваются и составляют 460 МПа.

Сравнение результатов численного моделирования напряжений в середине бочки и расчета на основе теоретических формул, базирующихся на теории контакта двух цилиндров [14, 91, 95, 144, 148, 244], показало их соответствие. Расхождение значений максимальных напряжений не превышает 2 %.



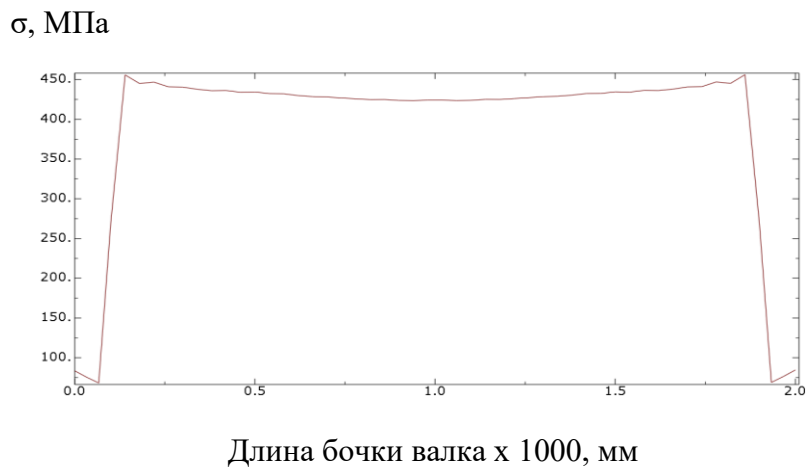
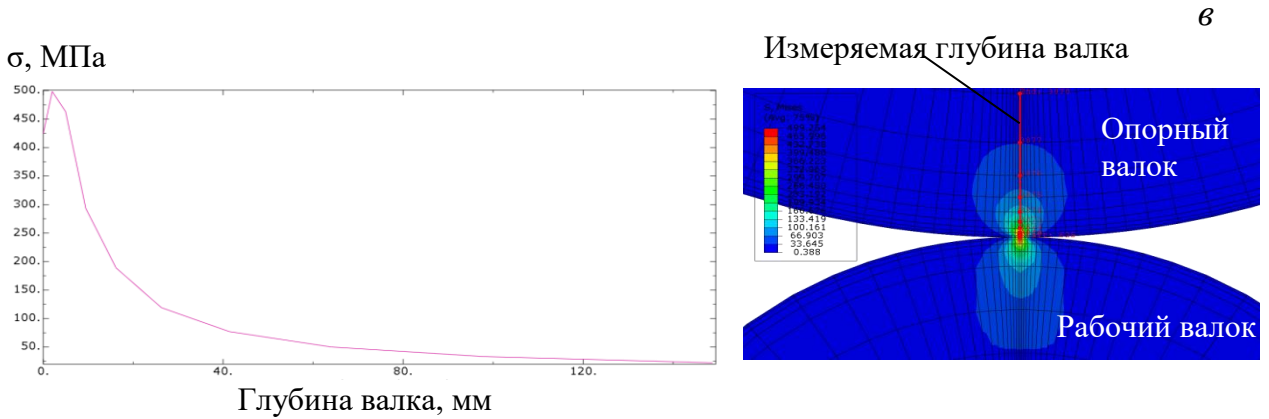
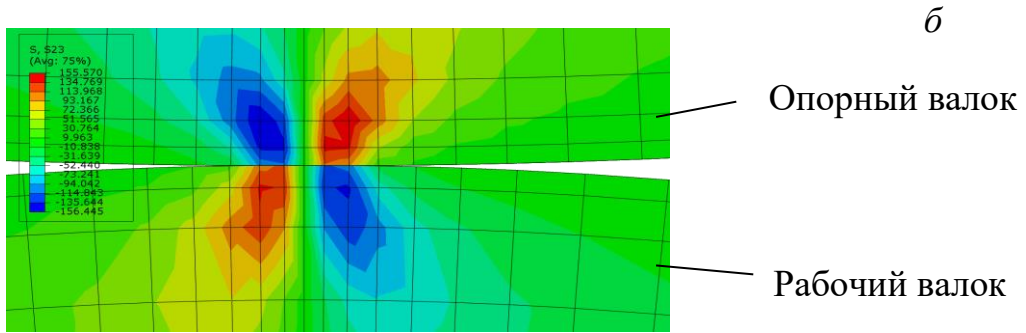
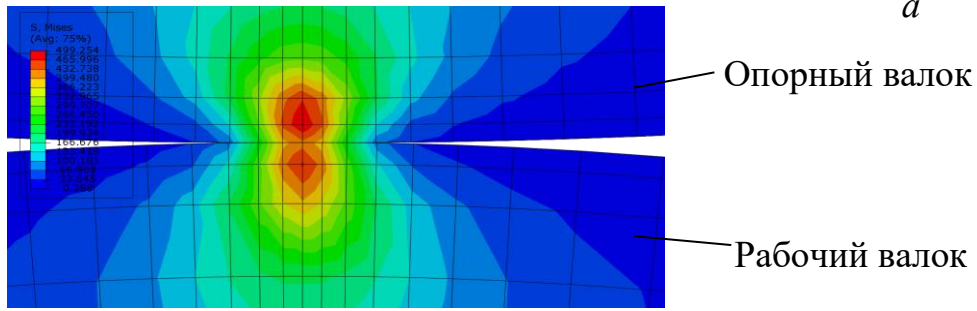


Рисунок 3.6 – Распределение напряжений, МПа в зоне контакта валков (*a*), распределение напряжений сдвига (*б*), изменение напряжений по глубине опорного валка (*в*) и по длине бочки опорного валка в середине площадки контакта с рабочим (*г*)

Результаты расчета напряжений валковой системы на основе конечно-элементной модели, показанной на рисунке 3.4, б, с выпукло-вогнутыми профилировками и цилиндрическими шейками опорных валков при прокатке полосы из марки стали 08пс шириной  $b = 1250$  мм с силой прокатки  $P = 10$  МН в клетки № 2 при отсутствии осевого перемещения рабочих валков представлены на рисунке 3.7. Диаметры бочек рабочего и опорного валков были взяты равными соответственно  $D_p = 455$  мм и  $D_{оп} = 1220$  мм.

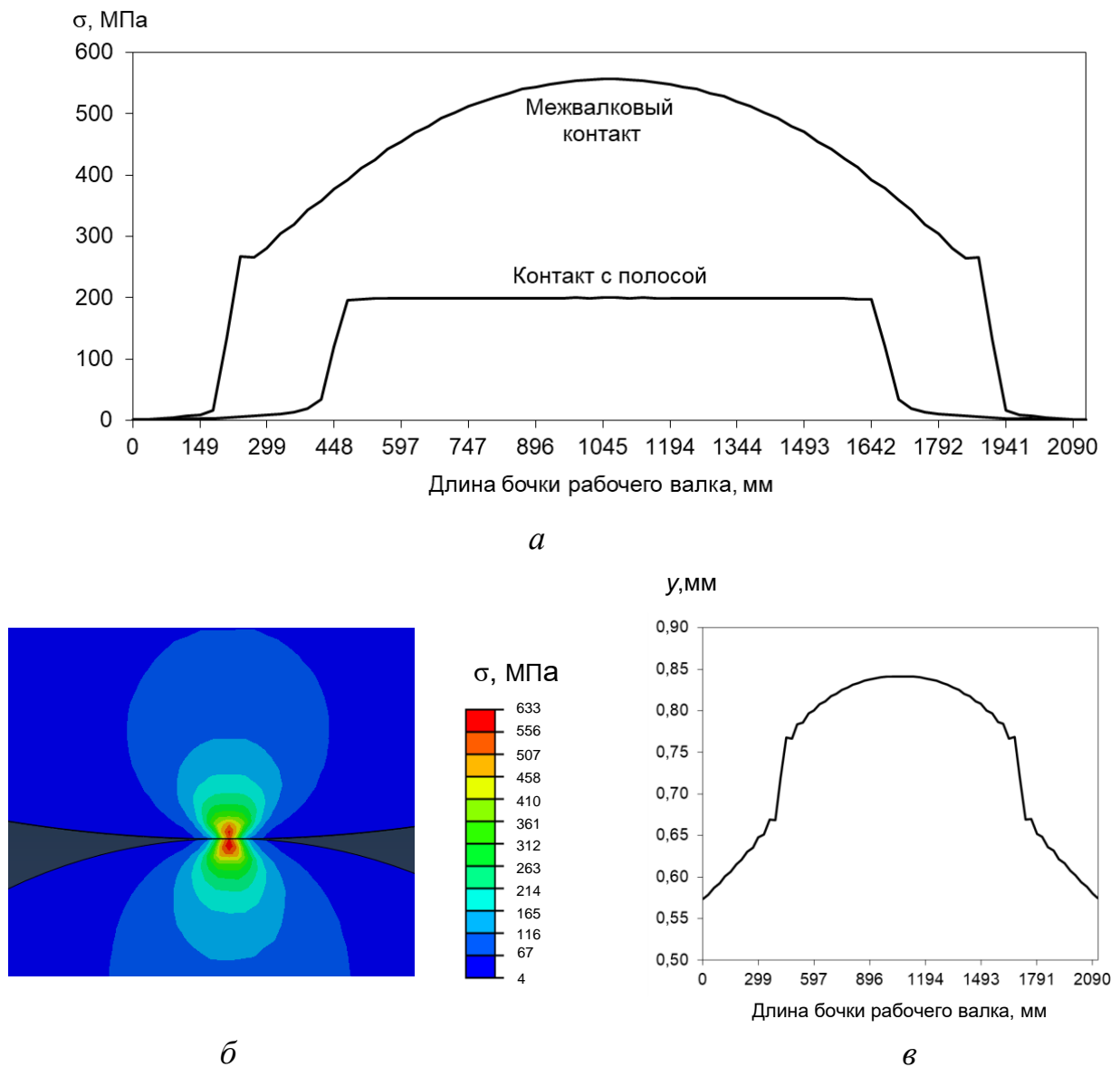


Рисунок 3.7 – Распределение напряжений по длине бочки рабочего валка в вертикальной осевой плоскости (а) и в контакте валков (б), распределение упругих деформаций по длине бочки рабочего валка в вертикальной осевой плоскости (в)

Анализ полученных распределений показывает, что напряжения, возникающие в зоне контакта рабочего и опорного валков, более чем в 2 раза больше, чем в очаге деформации, что объясняется меньшей шириной площадки упругого контакта между валками по сравнению с длиной очага пластической деформации. Сила прокатки  $P$  распределяется в межвалковом контакте на существенно меньшей площади, чем в очаге деформации и вызывает в межвалковом контакте более высокие напряжения. Также отличается характер распределения напряжения по длине межвалкового контакта по сравнению с контактом по ширине полосы, в межвалковом контакте наблюдается максимальное значение в середине бочек валков. Наиболее нагруженный участок по радиусу рабочего валка (рисунок 3.7, б) находится внутри на глубине примерно 3 мм от поверхности и составляет 633 МПа, тогда как на поверхности напряжение равно 556 МПа. При дальнейшем удалении от поверхности напряжения быстро уменьшаются и на глубине 20 мм составляют 224 МПа, на глубине 40 мм – 128 МПа, далее становятся незначительными. Сравнение результатов численного моделирования и расчета на основе теоретических формул показало их полное соответствие.

Представленное описание и результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния валковых систем отражает их физические особенности и позволяет определять кривые упругих деформаций по длине бочки рабочего валка в контакте с полосой и выполнять анализ неравномерности напряжений в межвалковом контакте.

### **3.2 Моделирование формообразования поперечного профиля листового проката**

Процесс формообразования поперечного профиля листового проката при прокатке определяется совместным влиянием упругих деформаций валковой системы, ее износом и тепловым профилем бочек. В связи с этим суперпозиция

или геометрическое суммирование соответствующих кривых упругих деформаций, износа бочки и теплового профиля позволяет описать образующую валков при контакте с металлом.

Развитие теории формообразования поперечного профиля листового проката связывается с возможностями конечно-элементного анализа валковых систем по определению упругих деформаций в виде непрерывных кривых по длине бочки валка. Для этого было выполнено моделирование и исследование формообразования поперечного профиля листового проката при прокатке на различных станах. Здесь приводятся результаты, полученные для непрерывного широкополосного стана холодной прокатки 2100 и толстолиствого стана 5000 ПАО «Северсталь».

Определение поперечного профиля полосы осуществлялось методом суперпозиции кривых упругих деформаций валков, теплового профиля и износа, имеющегося при значительной наработке валковой системы. За оценку адекватности модели формообразования были взяты результаты измерений толщины листов в середине и по кромкам, фиксируемые системой контроля производства на толстолиством стане 5000, и результаты промышленного эксперимента по определению поперечного профиля холоднокатаной полосы на десяти образцах после прокатки на 4-клетевом стане 2100. Образцы после холодной прокатки были отобраны на входе агрегата непрерывного горячего оцинкования, измерение толщины производилось в середине и по кромкам образцов ручным микрометром «Mitutoyo», имеющим точность  $\pm 0,002$  мм. Для каждого образца на основании зафиксированных автоматической системой измерения и контроля данных холодной прокатки на стане 2100 был рассчитан поперечный профиль полос  $\delta h_{\text{поп}}$  при прокатке в клетки № 4. Формообразование поперечного профиля осуществлялось суперпозицией кривой упругих деформаций рабочего валка в контакте с прокатываемой полосой, полученной по трехмерной модели валкового узла с учетом работы средств регулирования, и кривой теплового профиля, построенной по методике, изложенной в [14]. На

рисунке 3.8 приведены результаты суперпозиции кривых упругих деформаций 1 и теплового профиля 2 верхнего рабочего валка для двух образцов № 3 и № 2, а также получаемые поперечные профили полос.

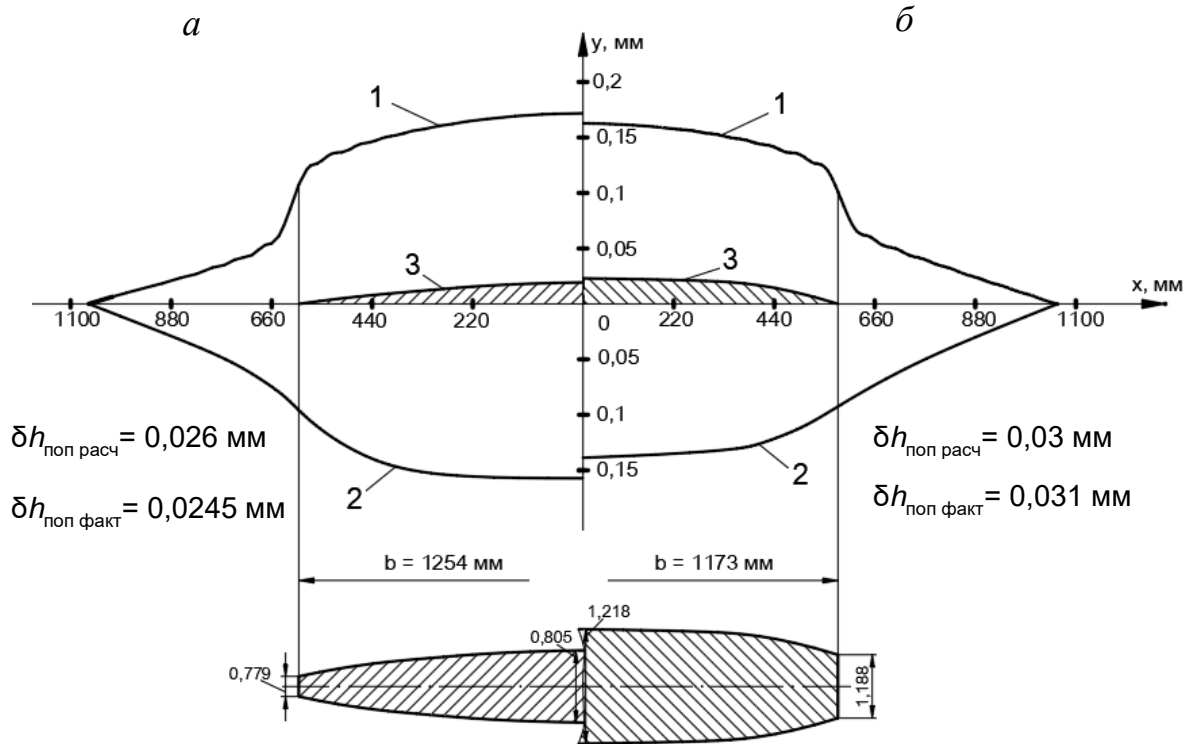


Рисунок 3.8 – Определение поперечного профиля полос из марки стали DX51D при холодной прокатке в последней клетке стана 2100 на основе построения образующей рабочего валка 3 методом суперпозиции кривых упругих деформаций 1 и теплового профиля 2: *a* – размер полосы 0,8x1254 мм ( $D_p = 480$  мм;  $P = 7,5$  МН;  $C = -20$  мм; значение противоизгиба  $F = +95$  кН; тепловая выпуклость на ширине полосы  $\Delta D_{\text{тепл.}b} = 0,12$  мм); *б* – размер полосы 1,2x1173 мм ( $D_p = 480$  мм;  $P = 7,5$  МН;  $C = -8$  мм; значение дополнительного изгиба  $F = -72$  кН;  $\Delta D_{\text{тепл.}b} = 0,09$  мм)

Сравнение результатов расчета  $\delta h_{\text{поп}}$  и измерений показало, что погрешности расчета образцов № 2 и № 3 находятся в диапазоне 3–6 %. Сравнение результатов расчета поперечной разнотолщинности и измерения ее на

десяти образцах представлено на рисунке 3.9. Погрешности расчета находятся в диапазоне 2–15 %, а среднее ее значение составляет 8,5 %. На основании этого был сделан вывод, что конечно-элементная модель с достаточной точностью определяет упругие деформации валковой системы при прокатке, необходимые для расчета поперечного профиля полосы, и может быть использована для усовершенствования выпукло-вогнутых профилировок валков.

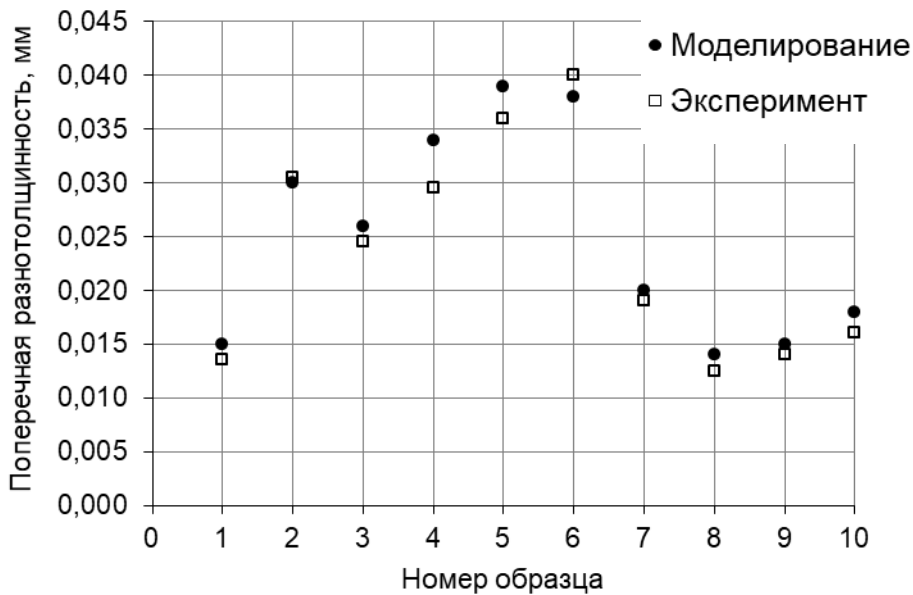


Рисунок 3.9 – Сравнение результатов расчета  $\delta h_{\text{поп}}$  и измерений

Для моделирования поперечного профиля листа в функции упругих деформаций, износа и теплового профиля при прокатке на толстолистовом стане 5000 рассматривалась прокатка листов толщиной 10–50 мм и шириной от 1750 мм до 4700 мм из марок стали 10Г2ФБ-У, К56, К60, S355J2, 300W, АН36.

Анализ связи фактической разнотолщинности листов с их шириной и толщиной по данным о 1500 прокатанных листах (рисунок 3.10 и 3.11) показал отсутствие существенного роста разнотолщинности при увеличении ширины, что объясняется влиянием теплового профиля валков: при увеличении ширины дополнительные тепловые расширения валков компенсируют дополнительную разность их упругих деформаций на ширине полосы. Поперечная

разнотолщинность колеблется в диапазоне от  $\pm(0,5-0,6)$  мм и соответствует требованиям нормативной документации.

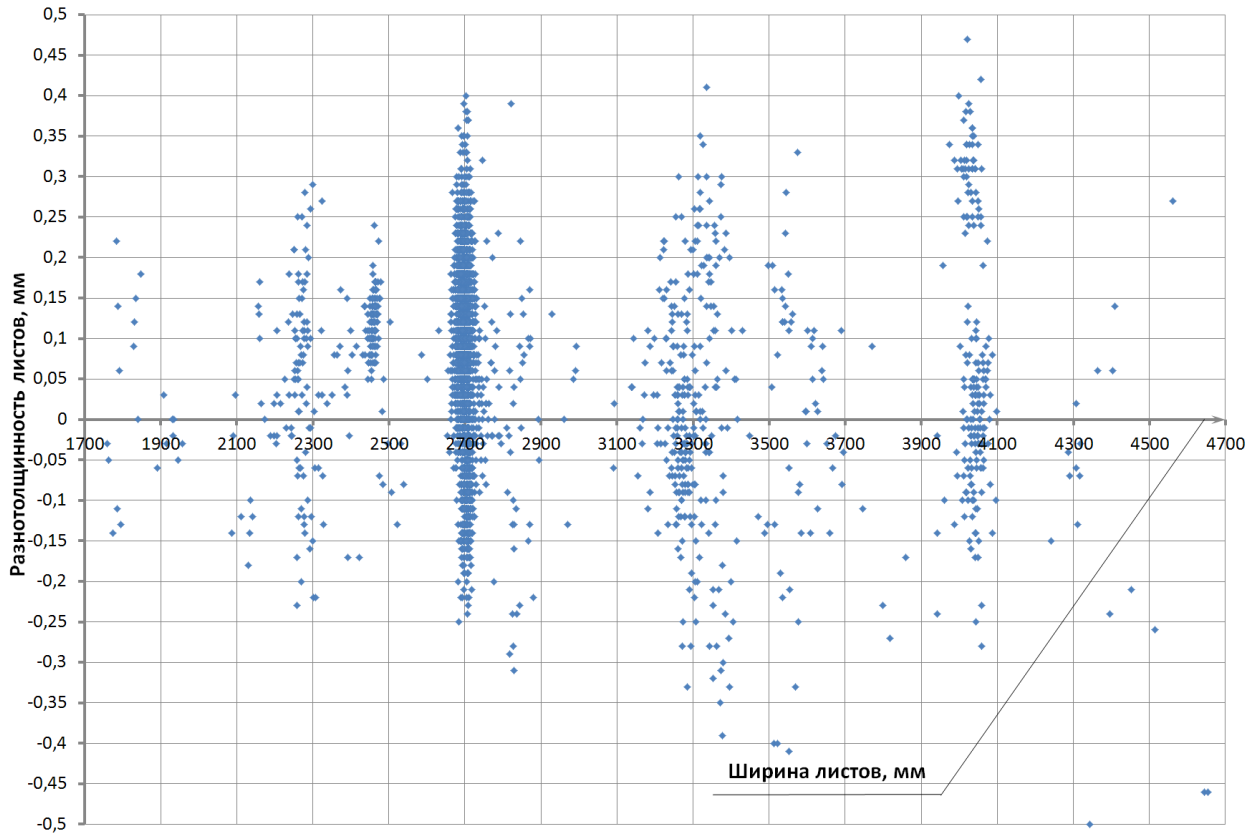


Рисунок 3.10 – Фактическая разнотолщинность 1500 листов при разной ширине листов

Поперечный профиль у части листов вогнутый (толщина в середине  $h_c$  меньше толщины у левой и правой кромок  $h_{лев}$ ,  $h_{пр}$ ), у части листов – выпуклый ( $h_c > h_{лев}$ ,  $h_c > h_{пр}$ ).

Упругие деформации валковой системы были определены на основе конечно-элементного моделирования, учитывая профилировку рабочего вала и одинарные или двойные скосы на опорном валке. Тепловой профиль рабочих валков определен согласно [116, 117].

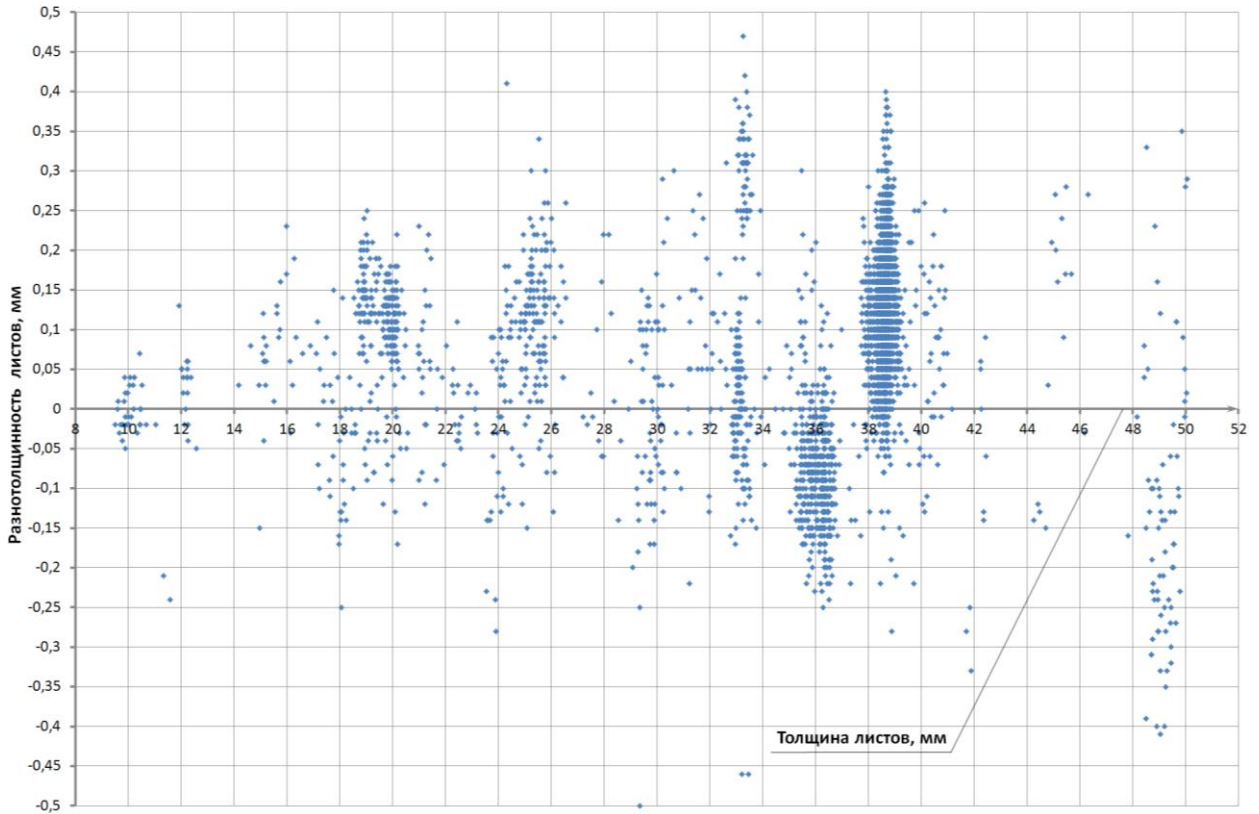


Рисунок 3.11 – Фактическая разнотолщинность 1500 листов при разной толщине

В качестве модели износа валков принята кривая износа на радиус  $\Delta R_{\text{изн}} = f(x)$ . Было установлено, что листы, прокатанные в рабочих валках с самым маленьким пробегом, имеют вогнутый поперечный профиль:  $\delta h_{\text{поп}} = -(0,16-0,31)$  мм. По мере увеличения пробега валков вогнутость профиля постепенно уменьшается: после 30–40 часов пробега  $\delta h_{\text{поп}} = -(0,12-0,28)$  мм; после 70–80 часов пробега  $\delta h_{\text{поп}} = -(0,1-0,2)$  мм. При прокатке в валках, имевших пробег 90–95 часов, вогнутость переходит в выпуклость: листы, прокатанные в рабочих валках с максимальным пробегом 107 часов (что соответствует 9768 т), имеют поперечную разнотолщинность  $\delta h_{\text{поп}} = +(0,17-0,25)$  мм. В зависимости от пробега валков среднее значение поперечной разнотолщинности листов изменилось от -0,24 мм до +0,21 мм, т.е. увеличилось на 0,45 мм и основная причина этого увеличения – износ рабочих валков. На рисунке 3.12 представлена построенная



усредненная зависимость износа бочки рабочих валков на радиус  $\Delta R_{\text{изн}}$ , мм от их пробега  $l_p$  в часах после установки в клеть  $\Delta R_{\text{изн}} = 0,0036e^{0,3962l_p}$  с коэффициентом корреляции  $r = 0,99$ .

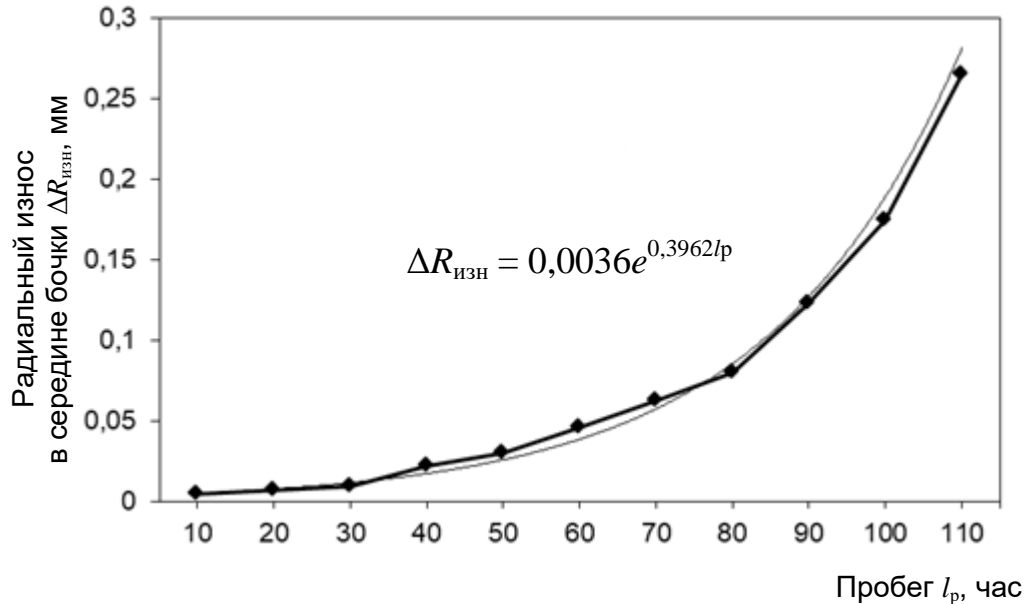


Рисунок 3.12 – Усредненная зависимость износа рабочих валков (в расчете на радиус бочки) от их пробега после завалки

На рисунках 3.13 и 3.14 представлены результаты определения поперечного профиля для двух листов. Образующая рабочего валка 4 получена суперпозицией кривых упругих деформаций 1, износа 2 и теплового профиля 3 верхнего рабочего валка. Схемы поперечных профилей листов построены не в масштабе. Было получено, что все расчетные поперечные разнотолщинности  $\delta h_{\text{поп рас}}$ , в том числе, полученные и для других двадцати листов, попадают в диапазоны их фактических значений  $\delta h_{\text{поп факт}}$ .

Моделированием было подтверждено, что применяемые на стане профилировки рабочих и опорных валков обеспечивают выполнение условия по обеспечению поперечной разнотолщинности готовых листов, не превышающей 0,5–0,6 мм.

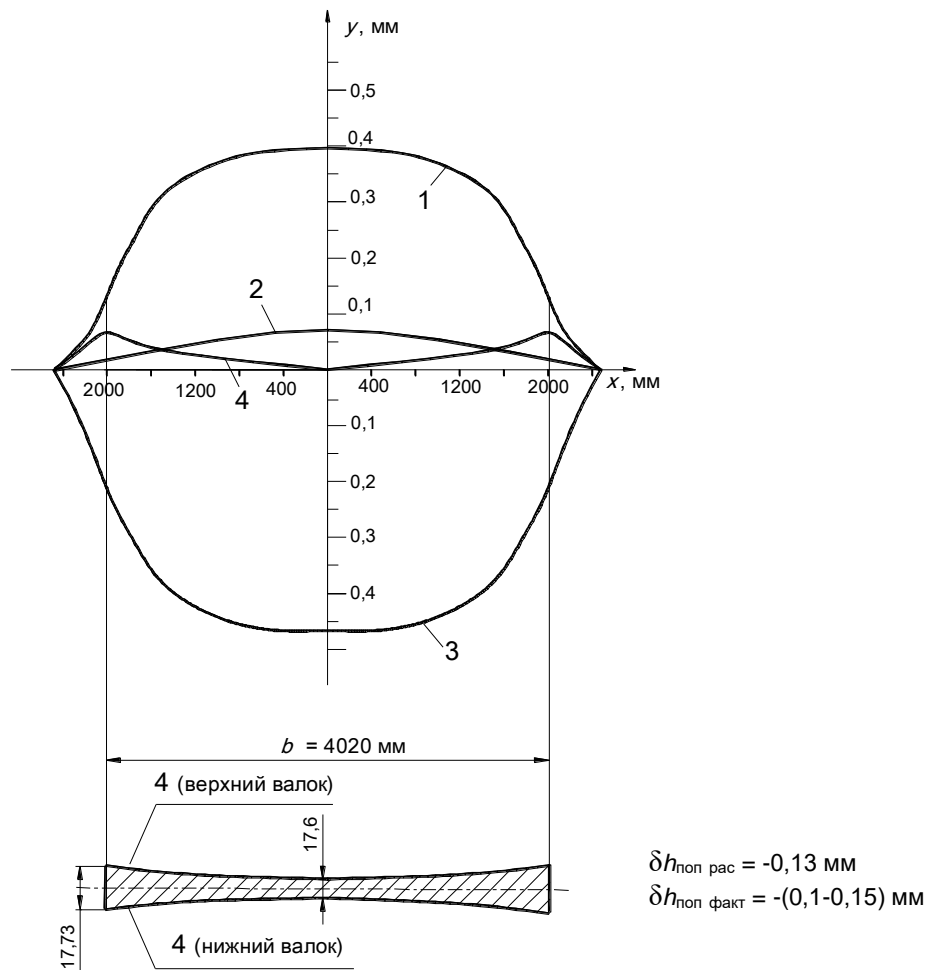


Рисунок 3.13 – Определение поперечного профиля листа из марки стали К56 размером 17,6х4020 мм при прокатке в последнем проходе на основе построения образующей рабочего валка 4 методом суперпозиции кривых упругих деформаций 1, износа его бочки 2 и теплового профиля 3 ( $D_p = 1126 \text{ мм}$ ;  $D_{\text{оп}} = 2360 \text{ мм}$ ;  $P = 48 \text{ МН}$ ; величина износа за 74 ч пробега рабочего валка)

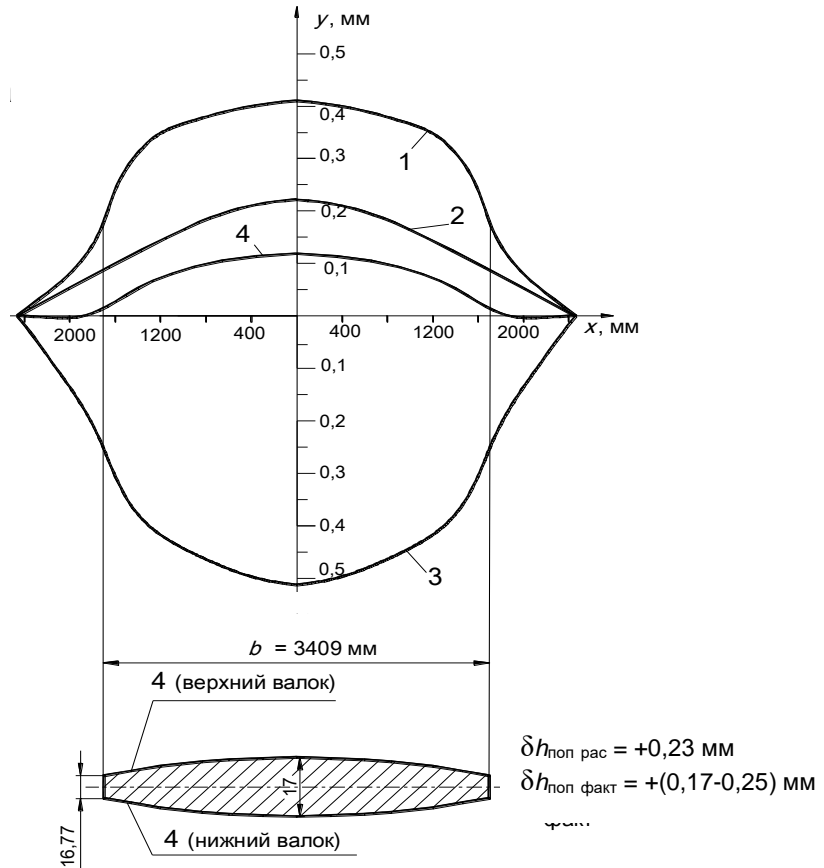


Рисунок 3.14 – Определение поперечного профиля листа из марки стали К60 размером 17,0x3409 мм при прокатке в последнем проходе на основе построения образующей рабочего валка 4 методом суперпозиции кривых упругих деформаций 1, износа его бочки 2 и теплового профиля 3 ( $D_p = 1070$  мм;  $D_{\text{оп}} = 2350$  мм;  $P = 34$  МН; величина износа за 107 ч пробега рабочего валка)

Результаты моделирования формообразования поперечного профиля показали, что использование кривой упругих деформаций рабочего валка, полученной на основе трехмерной модели валковой системы, обеспечивает

точность определения профиля со средней погрешностью, не превышающей 8,5 %.

### **3.3 Исследование влияния средств регулирования, профилировок и износа валков на напряженно-деформированное состояние валковой системы**

Разработанный метод моделирования валковых систем полосовых и листовых станов позволил выполнить исследование их напряженно-деформированного состояния с оценкой влияния средств регулирования, профилировок и износа валков [245–248]. Рассматривалась валковая система с асимметричными выпукло-вогнутыми профилировками (рисунок 3.3), описываемая полиномом третьей степени – выражение (1.3). Такая система валков применяется на 4-клетевом непрерывном стане холодной прокатки 2100 ПАО «Северсталь» после его технического переоснащения, выполненного в 2016 году.

Длина бочек рабочего валка стана 2100 составляет  $L_p = 2120$  мм, опорных –  $L_{оп} = 1850$  мм. Полиномиальные коэффициенты для профилировки рабочего валка имеют значения:  $a_1 = 0,162828 \cdot 10^{-2}$ ;  $a_2 = -0,163314 \cdot 10^{-5}$ ;  $a_3 = 0,482081 \cdot 10^{-9}$ , а опорного валка –  $a_1 = -0,920352 \cdot 10^{-3}$ ;  $a_2 = 0,127934 \cdot 10^{-5}$ ;  $a_3 = -0,482081 \cdot 10^{-9}$ .

Исследование влияния осевого перемещения рабочих валков на их напряженно-деформированное состояние (рисунок 3.15) выполнено при разных значениях смещения верхнего рабочего валка  $C$ : при смещении в сторону привода значения положительные, в сторону обслуживания – отрицательные.

Из распределений напряжений по длине бочки рабочего валка (рисунок 3.15, а) видно, что при  $C = +70$  мм напряжения в межвалковом контакте валков незначительно возрастают (на 6 МПа), а при  $C = -70$  мм, наоборот уменьшаются на 20 МПа. Также был сделан вывод о незначительном влиянии осевой сдвижки на изменения напряжений в контакте с полосой и по радиусу валка.

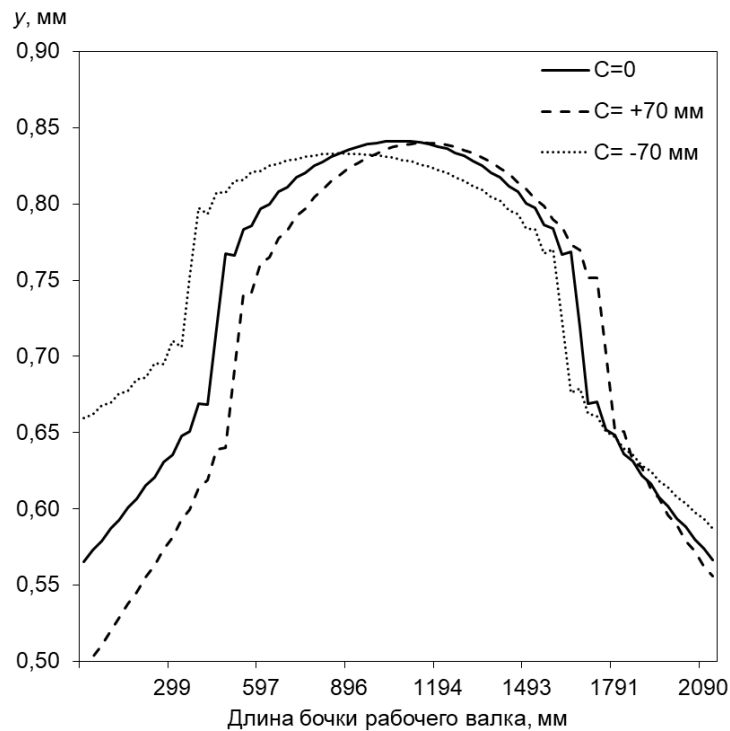
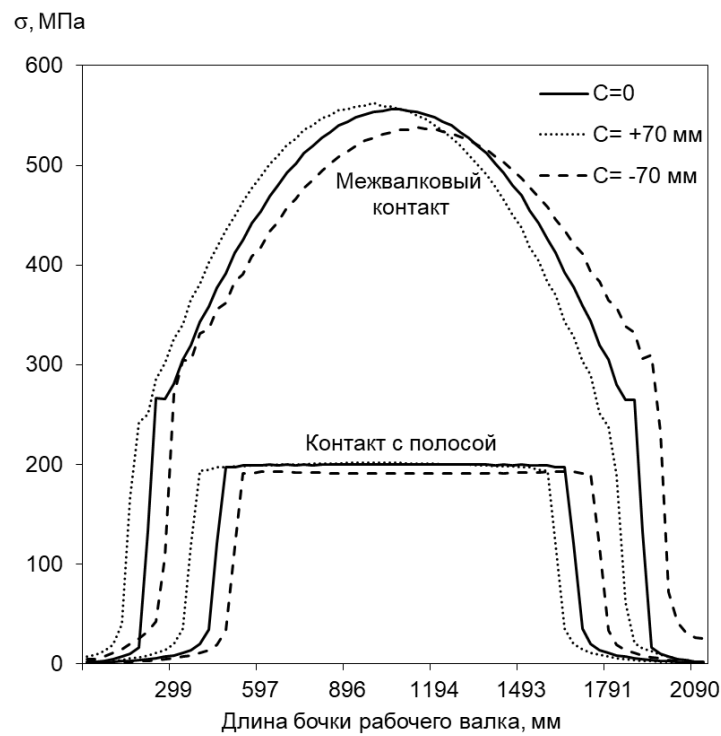


Рисунок 3.15 – Распределение по длине бочки в вертикальной осевой плоскости верхнего рабочего валка напряжений (*a*) и упругих деформаций в контакте с полосой (*б*) в зависимости от значения  $C$  осевой сдвижки ( $D_p = 455$  мм;  $D_{оп} = 1220$  мм;  $b = 1250$  мм;  $P = 10$  МН)

Кривые упругих деформаций рабочего вала в вертикальной плоскости в контакте с полосой (рисунок 3.15, б) показывают, что при смещении рабочего вала в сторону привода  $C > 0$  увеличивается обжатие полосы в середине, приводя к росту разности прогибов рабочего вала в середине и по кромке полосы, а при  $C < 0$  – обжатие полосы в середине уменьшается, вызывая уменьшение разности прогибов. Так, значение смещения рабочего вала с  $C = +70$  мм до  $C = -70$  мм позволяет снизить разность упругих деформаций бочки рабочего вала на ширине полосы, равной 1250 мм, с 0,09 мм до 0,06 мм, то есть на 33 %, обеспечивая уменьшение ее поперечной разнотолщинности.

Для исследования влияния гидравлического изгиба рабочих валков построены кривые распределения напряжений по длине бочки рабочего вала в межвалковом контакте (рисунок 3.16, а) и упругих деформаций верхнего рабочего вала в вертикальной плоскости в контакте с полосой (рисунок 3.16, б) при значениях сил противоизгиба, равных 85 кН и 250 кН, и дополнительного изгиба – 85 кН в клети № 4 с параметрами  $D_p = 480$  мм;  $D_{оп} = 1220$  мм;  $P = 7,6$  МН;  $C = 16$  мм;  $b = 1250$  мм.

При работе противоизгиба напряжения в межвалковом контакте уменьшаются, при дополнительном изгибе – возрастают. Разность упругих деформаций бочки рабочего вала на ширине полосы изменяется от 0,01 мм при максимальном значении противоизгиба до 0,04 мм при дополнительном изгибе, а значит в клетях 4-клетевого стана гидравлическим изгибом обеспечивается широкий диапазон регулирования (до 75 %) поперечной разнотолщинности полосы.

При прокатке на 4-клетевом стане полос шириной от 900 до 1300 мм при существующих профилировках и работе всех средств регулирования в середине поперечного сечения полосы отмечалась повышенная выпуклость с отклонением, превышающим 2 % от номинального значения, и невыполнение условия (1.2), что являлось следствием недостаточного обжатия середины полосы и большего обжатия ее краев.

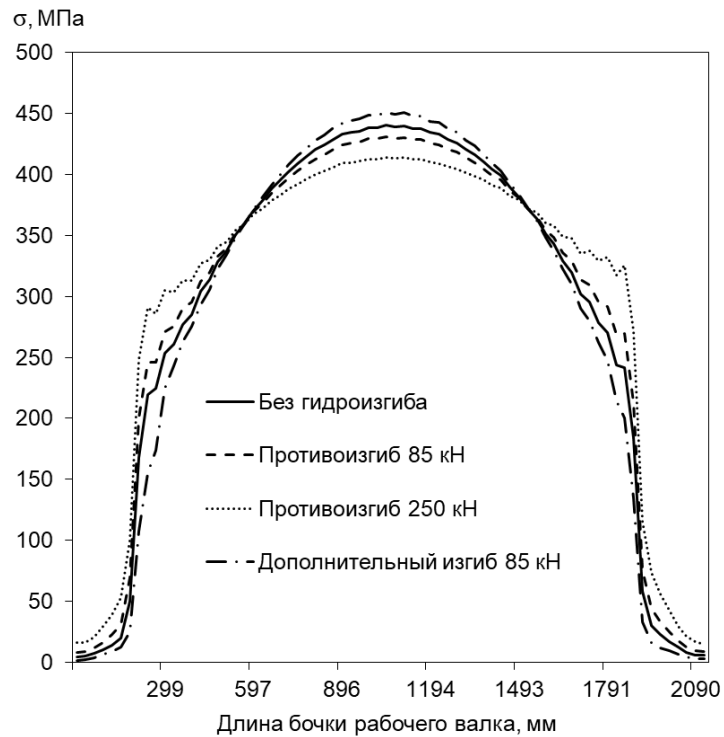
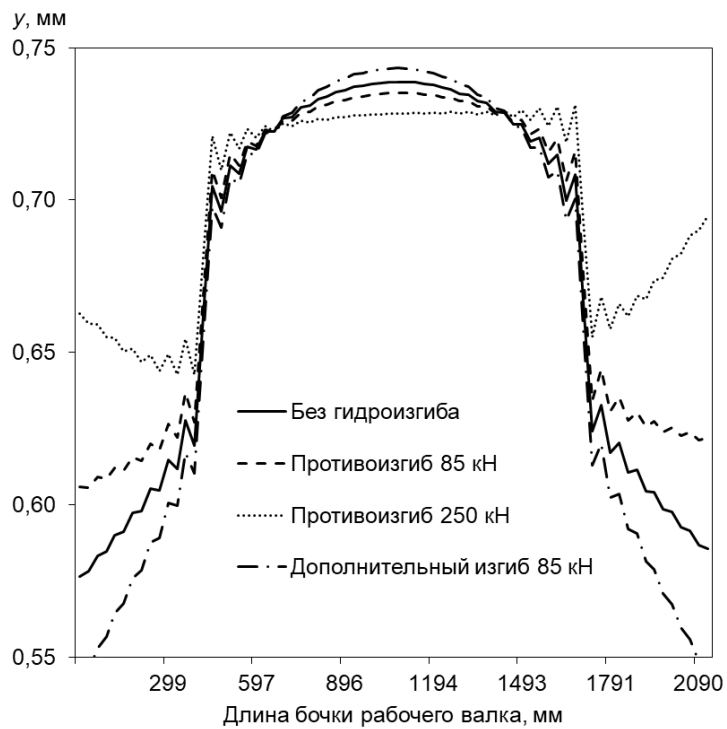
*a**б*

Рисунок 3.16 – Кривые распределения напряжений по длине бочки рабочего валка в середине площадки контакта с опорным (*a*) и упругих деформаций верхнего рабочего валка в вертикальной осевой плоскости в контакте с полосой (*б*) при разных значениях сил гидравлического изгиба

Для решения указанной проблемы выполнено исследование на основе моделирования напряженно-деформированного состояния валковой системы и поиск резерва регулирования поперечного профиля за счет корректировки выпуклости и вогнутости профилировки рабочего вала  $R_{\max}$  и  $R_{\min}$ , изменения его максимального и минимального диаметров бочек со стороны привода и со стороны обслуживания  $D_{\text{об.маx}}$  и  $D_{\text{пр.миn}}$  (рисунок 3.17).

Рассматривались различные варианты изменения профиля рабочего вала без изменения профилировки опорных валков, чтобы не увеличивать их эксплуатационный парк.

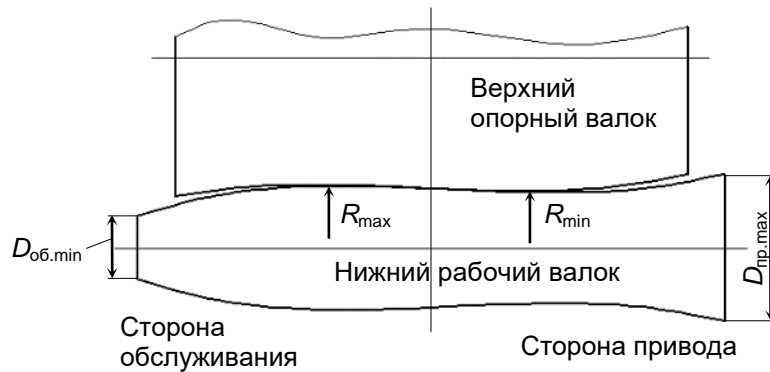


Рисунок 3.17 – Геометрические параметры выпукло-вогнутой профилировки рабочего вала при  $C = 0$

В первом варианте (рисунок 3.18) не изменялись максимальный радиус выпуклой части  $R_{\max}$  и минимальный радиус вогнутой части  $R_{\min}$  существующей профилировки, их значения составили  $R_{\max} = 227,54$  мм и  $R_{\min} = 227,43$  мм при  $D_p = 455$  мм, но увеличилась разница  $\Delta D = D_{\text{об.маx}} - D_{\text{пр.миn}}$  на 0,05 мм ( $\Delta D = D_{\text{об.маx}} - D_{\text{пр.миn}} = 455,376 - 453,912 = 1,464$  мм). Полиномиальные коэффициенты профилировки рабочего вала, описываемой параболой третьего порядка (1.3), в этом случае имели значения:  $a_1 = 0,178211 \cdot 10^{-2}$ ;  $a_2 = -0,169989 \cdot 10^{-5}$ ;  $a_3 = 0,482081 \cdot 10^{-9}$ .



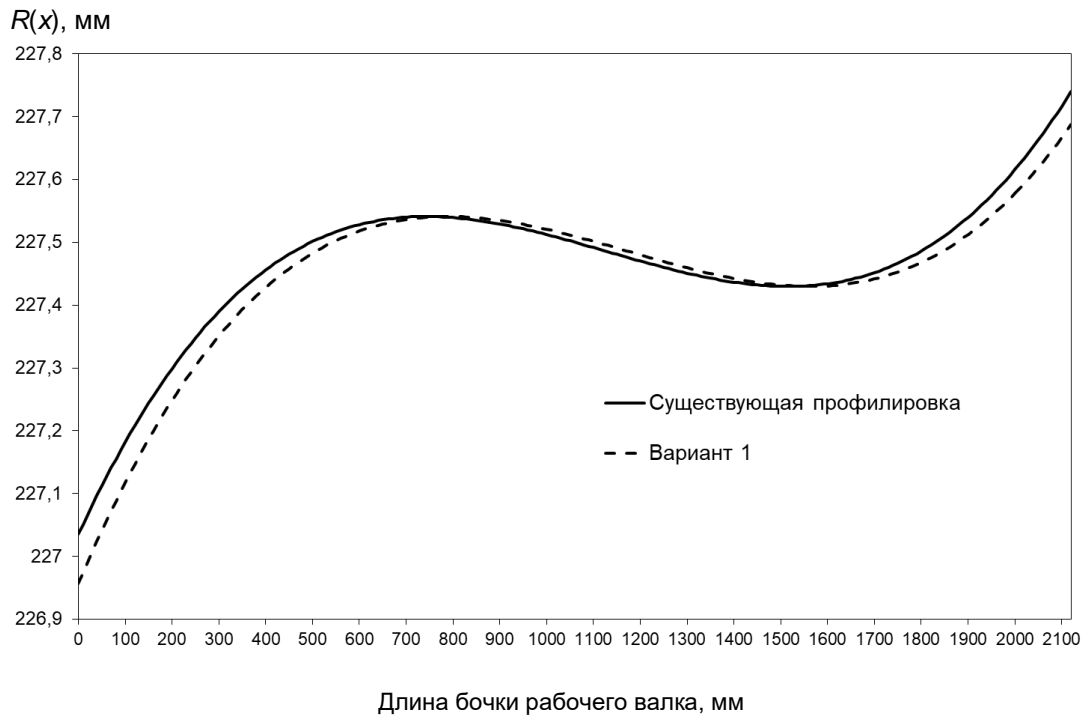


Рисунок 3.18 – Исследуемый вариант 1 и существующая профилировка валков при  $D_p = 455$  мм

Моделирование показало, что вариант 1 профилировки (рисунок 3.18) не приводит к существенному изменению напряжений в валках – напряжения в середине бочки рабочего вала уменьшаются на 7 МПа. Прогиб рабочего вала в контакте с полосой уменьшается (рисунок 3.19), но деформация концевых участков бочки становится неодинаковой – прогиб со стороны привода меньше, чем со стороны обслуживания на 0,02 мм, что позволяет сделать вывод, что при существующей профилировке опорного вала требуется для рабочего вала выполнение условия по разности диаметров  $\Delta D = D_{об.макс} - D_{пр.мин} = 455,48 - 454,07 = 1,41$  мм.

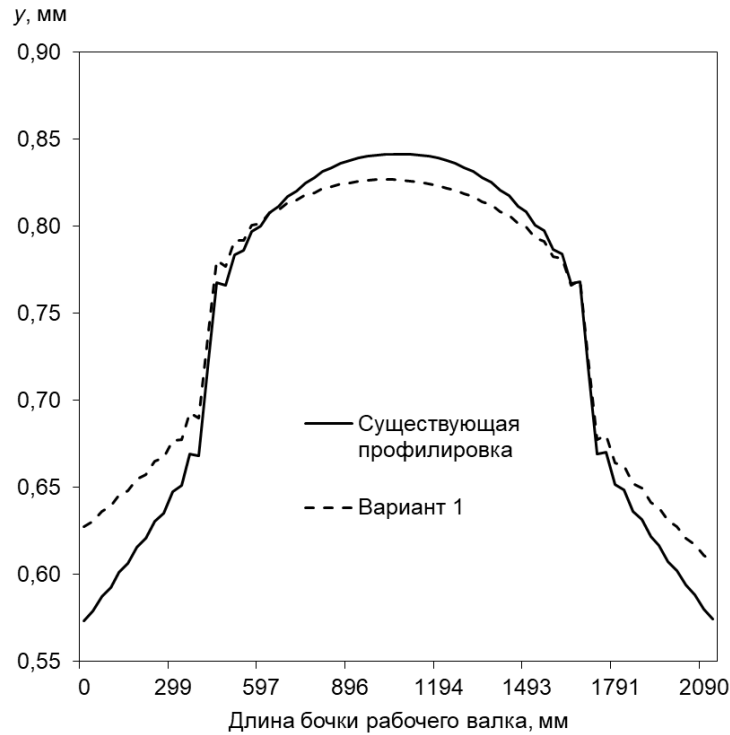


Рисунок 3.19 – Кривые распределения упругих деформаций верхнего рабочего валка в вертикальной осевой плоскости в контакте с полосой при варианте профилировки 1 ( $D_p = 455$  мм;  $D_{оп} = 1220$  мм;  $b = 1250$  мм;  $P = 10$  МН)

Второй вариант профилировки (рисунок 3.20) построен, исходя из следующего, – концевые участки профиля совпадают с существующей профилировкой и не изменяется  $\Delta D$ , но увеличивается выпуклость в средней части бочки, а также и значения радиусов выпуклой и вогнутой частей. Коэффициенты уравнения профилировки в этом случае составили  $a_1 = 0,163402 \cdot 10^{-2}$ ;  $a_2 = -0,163061 \cdot 10^{-5}$ ;  $a_3 = 0,479538 \cdot 10^{-9}$ , радиусы –  $R_{max} = 227,544$  мм и  $R_{min} = 227,434$  мм.

Как видно из рисунка 3.21, вариант 2 профилировки приводит к существенному росту напряжений (на 212 МПа) в межвалковом контакте в середине бочки рабочего валка, а также деформаций в контакте с полосой (рисунок 3.22).

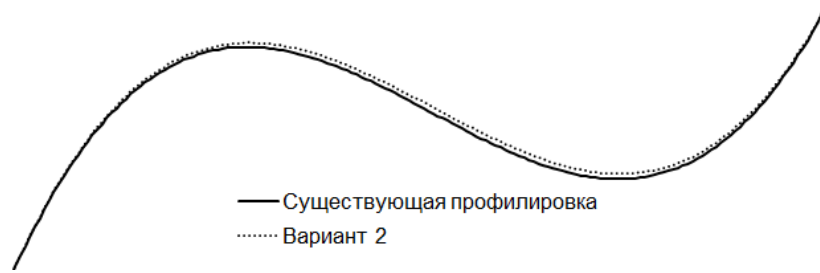


Рисунок 3.20 – Фрагмент профиля середины бочки  
для пояснения варианта 2 профилировки

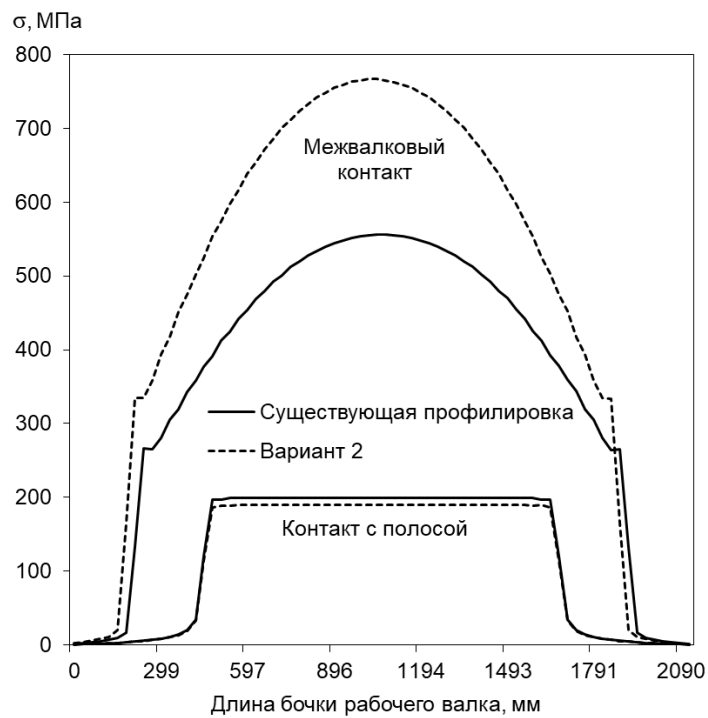


Рисунок 3.21 – Кривые распределения напряжений по длине бочки рабочего вала  
в вертикальной осевой плоскости при варианте профилировки 2  
( $D_p = 455$  мм;  $D_{оп} = 1220$  мм;  $b = 1250$  мм;  $P = 10$  МН)

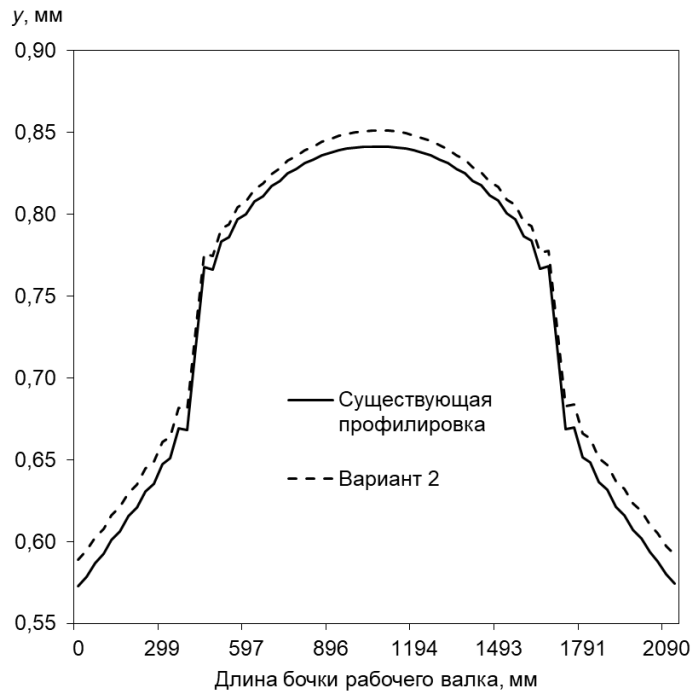


Рисунок 3.22 – Кривые распределения упругих деформаций верхнего рабочего вала в вертикальной осевой плоскости в контакте с полосой при варианте профилировки 2 ( $D_p = 455$  мм;  $D_{оп} = 1220$  мм;  $b = 1250$  мм;  $P = 10$  МН)

В третьем варианте рассматривались возможности уменьшения радиусов выпуклой и вогнутой части рабочего вала. Вычислительные эксперименты с шагом уменьшения радиусов на 0,005 мм показали, что при их уменьшении до значения 0,025 мм разность упругих деформаций бочки рабочего вала на ширине полосы уменьшается до 40 %, дальнейшее уменьшение радиусов приводит к росту величины упругих деформаций, в том числе и на ширине полосы, но без существенного увеличения напряжений в валах. На рисунке 3.23 представлена профилировка варианта 3 с уменьшенными радиусами выпуклой и вогнутой части профиля до 0,025 мм без изменения  $\Delta D$ , а на рисунке 3.24 – полученные для этого варианта распределения напряжений и деформаций.

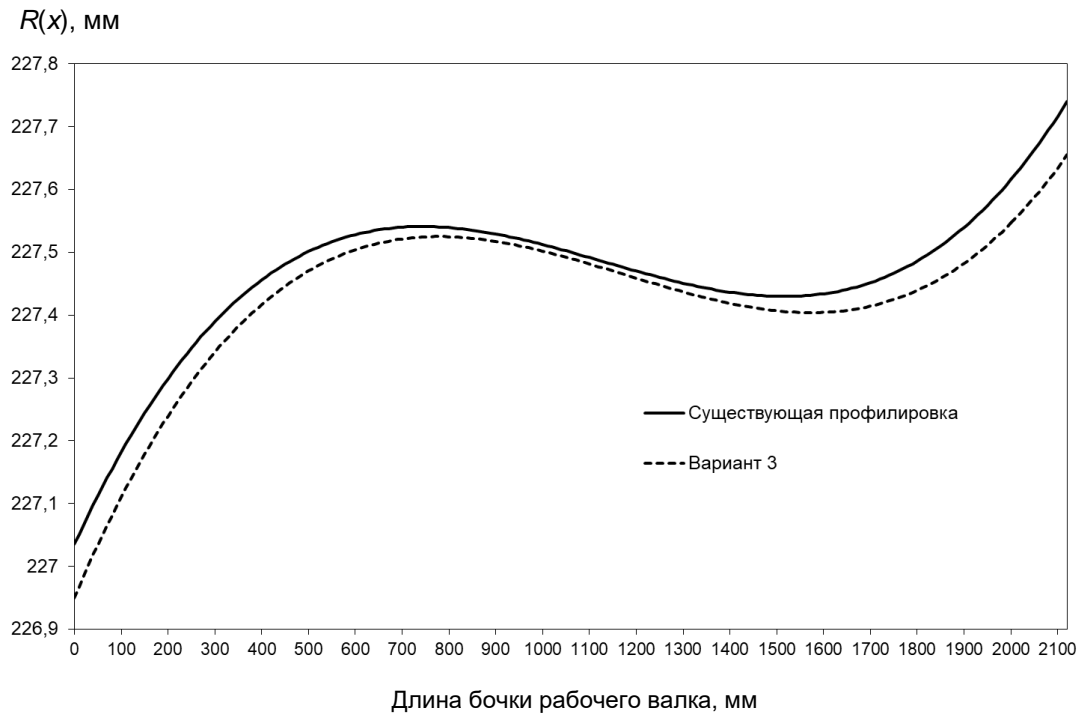


Рисунок 3.23 – Существующая профилировка валков и вариант профилировки 3 при  $D_p = 455$  мм

Полученные результаты показывают, что использование предлагаемого метода моделирования валковых систем позволяет решать задачу поиска новой асимметричной выпукло-вогнутой профилировки валков.

Для исследования влияния износа профилей валков был выполнен анализ профилограмм износа валков в количестве 34 штук, из них опорных валков – 14, рабочих – 20. С ростом наработки износ увеличивается и в среднем на радиус составляет у рабочих валков 0,0059 мм, опорных – 0,035 мм и наблюдается в средней части бочек валков.

На рисунке 3.25 показаны исходные профили и профили износа верхних рабочего (*a*) и опорного (*b*) валков. Максимальное значение износа на радиус рабочего валка составляет 0,006 мм при наработке 714 т, опорного – 0,022 мм при наработке 24 500 т.

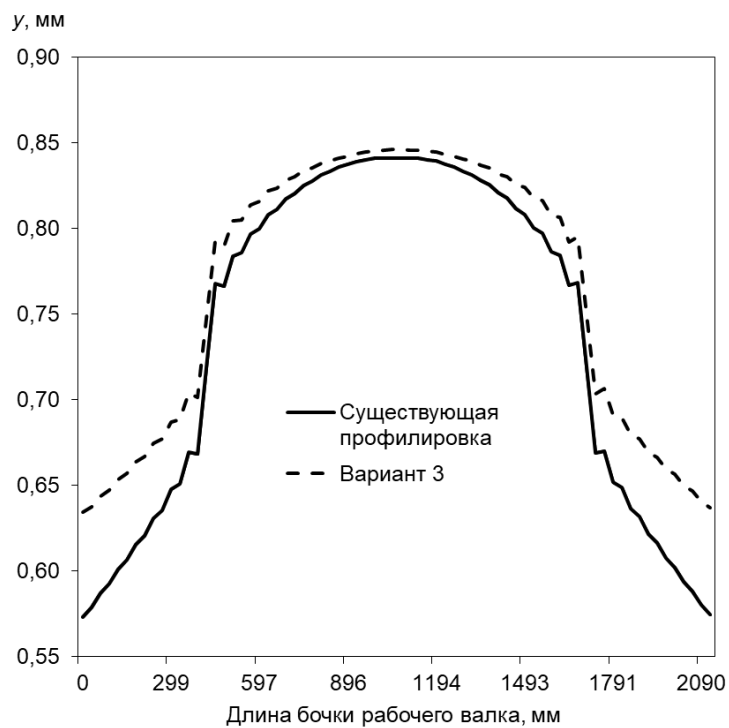
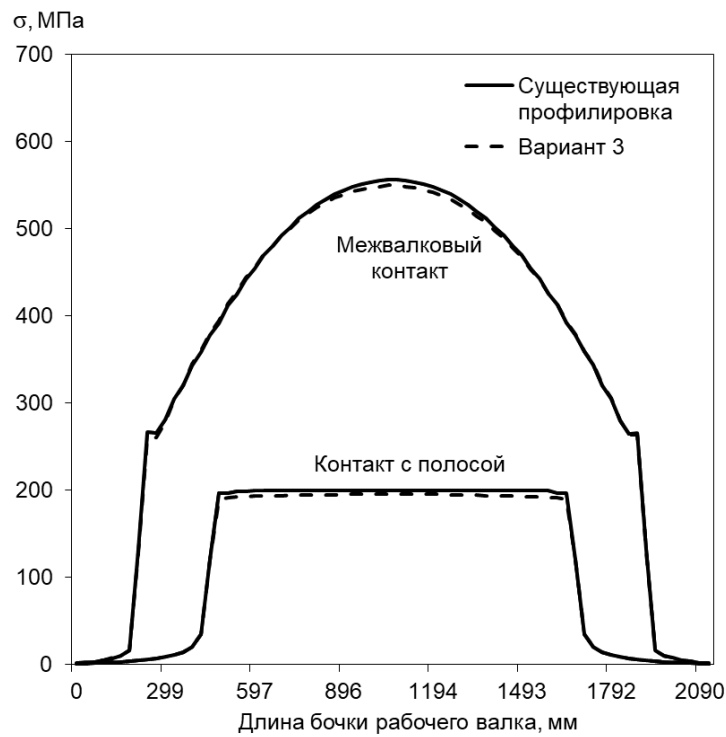


Рисунок 3.24 – Кривые распределения напряжений по длине бочки рабочего вала в вертикальной осевой плоскости (*a*) и упругих деформаций верхнего рабочего вала в вертикальной осевой плоскости в контакте с полосой (*б*) при варианте профилировки 3 ( $D_p = 455$  мм;  $D_{оп} = 1220$  мм;  $b = 1250$  мм;  $P = 10$  МН)

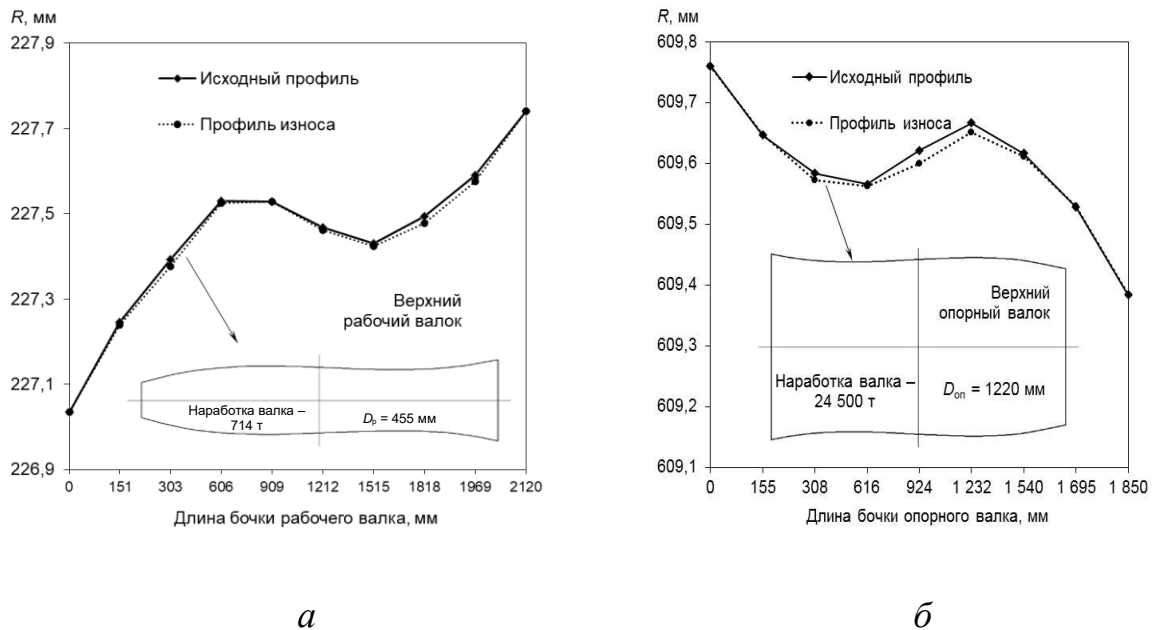


Рисунок 3.25 – Исходные профили и профили износа верхних валков:

*а* – рабочего; *б* – опорного

Как видно из распределений напряжений и деформаций (рисунок 3.26) износ валков не приводит к росту напряжений, но увеличиваются упругие деформации в середине бочки рабочего валка в контакте с полосой. На рисунке 3.26, *а* распределение напряжений при износе рабочего валка не показано из-за незначительно отличия с распределением, построенным с профилем рабочего валка без износа.

При сравнении разности прогибов рабочего валка по ширине полосы без износа и с износом опорного валка, в последнем случае разность прогибов возрастает на 25 %. Износ рабочего валка, в силу его меньшей наработки, не так значительно влияет на разность прогибов рабочего валка в середине и по кромке полосы.

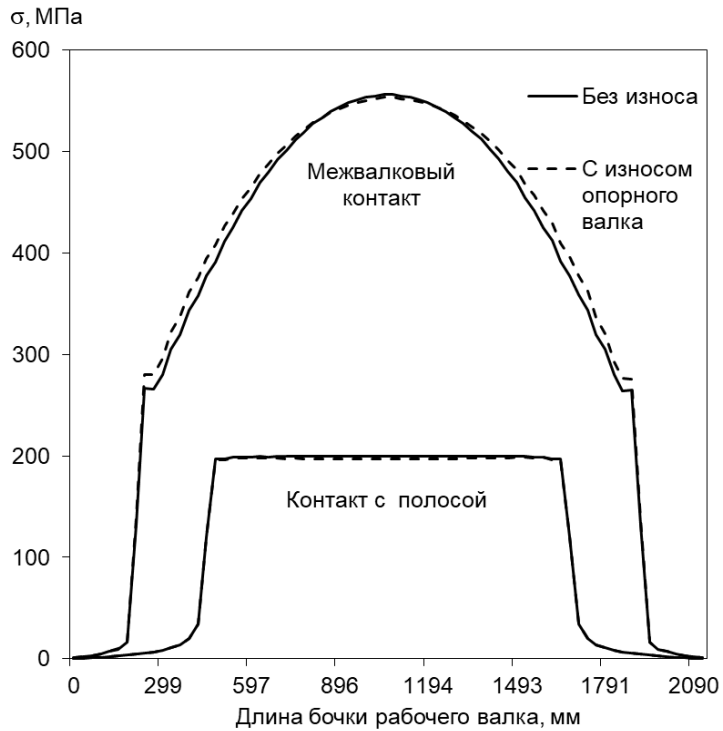
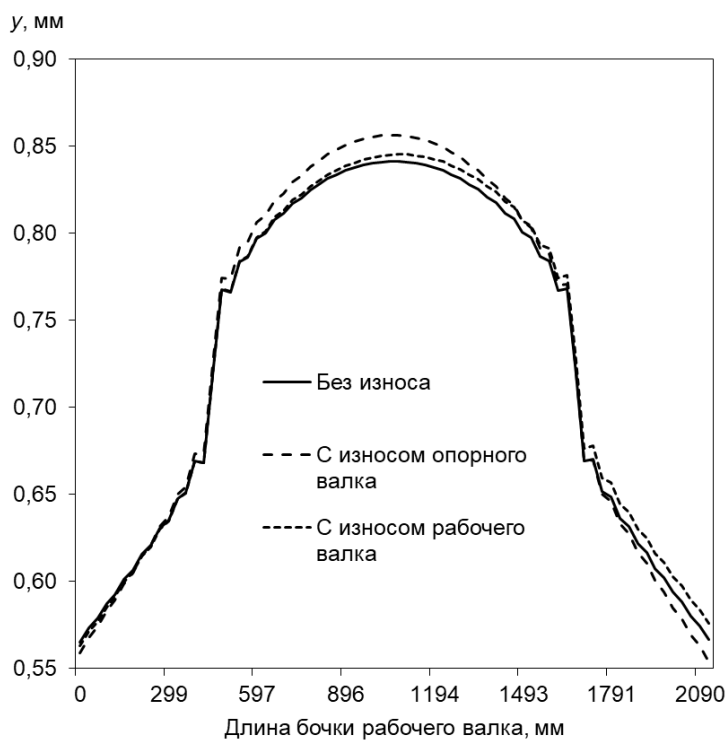
*a**б*

Рисунок 3.26 – Кривые распределения напряжений по длине бочки рабочего валка в вертикальной осевой плоскости (*a*) и упругих деформаций верхнего рабочего валка в вертикальной осевой плоскости в контакте с полосой (*б*) при износе валков ( $D_p = 455$  мм;  $D_{оп} = 1220$  мм;  $b = 1250$  мм;  $P = 10$  МН)



Анализ результатов выполненных исследований влияния средств регулирования, профилировок и износа валков на напряженно-деформированное состояние валковых систем с выпукло-вогнутыми профилировками показал, что диапазон осевой сдвижки рабочих валков позволяет уменьшать разность упругих деформаций на ширине полосы не менее чем на 30 %, гидравлическим изгибом рабочих валков обеспечивается широкий диапазон регулирования (до 75 %) поперечной разнотолщинности полосы, а также имеется резерв регулирования поперечного профиля за счет корректировки радиусов выпуклости и вогнутости профилировки рабочего валка.

Исследование напряженно-деформированного состояния опорных валков с оценкой стойкости концевых участков бочки выполнено с использованием разработанного метода моделирования для системы валков, эксплуатируемых на непрерывном стане горячей прокатки 2000 ПАО «Северсталь». Несмотря на имеющиеся многочисленные исследования валковых систем прокатных станов [89–93, 95, 104, 105, 241, 242, 244, 249], проблема повышения их стойкости остается актуальной и требует решения при оценке предельных нагрузок, изменений конструктивных параметров валковых узлов, применяемых профилировок.

В традиционной клети кварто без осевой сдвижки рабочих валков, как отмечается в работе [167], при совпадении протяженности контакта бочек рабочего валка с опорным, прогиб рабочих валков совпадает с прогибом опорных. При отсутствии такого совпадения в клети возникает изгибающий момент, действующий на рабочие валки от воздействия краевых участков опорных валков, находящихся за пределами ширины полосы. Условие совпадения протяженности контакта рабочего и опорного валков с шириной прокатываемой полосы обеспечивается применением скосов по краям бочки опорных валков. На ряде станов для предотвращения контакта торцевых участков бочек рабочих валков при прокатке полос минимальной ширины, помимо концевых скосов, длина бочка опорного валка выполняется короче длины бочки рабочего. С увеличением длины

бочек валков на листовых станах могут применяться опорные валки с двойными скосами: наружный скос с большим углом конусности и внутренний скос с меньшим углом конусности для исключения преждевременных поверхностных разрушений опорных валков в переходных зонах от гладкой бочки к скосам [95].

Исследование влияния ширины прокатываемой полосы  $b$  на распределение напряжений по длине бочки опорного валка при прокатке на непрерывном широкополосном стане горячей прокатке 2000 выполнено при следующих параметрах [250]:  $D_p = 800$  мм,  $D_{оп} = 1500$  мм, цилиндрическая профилировка опорного валка со скосами длиной  $l_{ск} = 100$  мм и глубиной  $h_{ск} = 0,8$  мм, сила прокатки составила  $P = 30$  МН. Графики распределения напряжений по длине бочки опорного валка в контакте с рабочим представлены на рисунке 3.27.

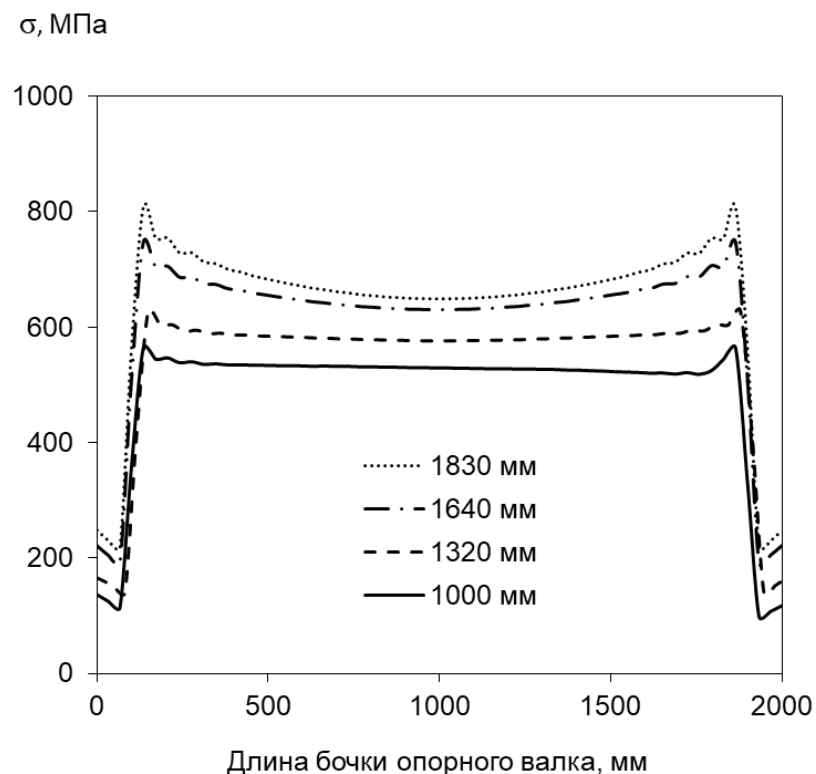


Рисунок 3.27 – Распределение напряжений по длине бочки опорного валка в середине площадки контакта с рабочим при разной ширине прокатываемых полос

Видно, что с ростом ширины при одной и той же силе прокатки напряжения на поверхности опорного валка возрастают. Так, при  $b = 1850$  мм в середине бочки они составляют 650 МПа, а при  $b = 1000$  мм – 530 МПа. При этом с ростом ширины прокатываемой полосы возрастает перепад напряжений в середине бочки и в начале скоса. Например, при ширине 1000 мм перепад составляет 30 МПа, а при ширине 1850 мм – уже 160 МПа.

Для исследования влияния длины и глубины скоса был взят вариант с шириной прокатываемой полосы, равной 1850 мм, которому при прокатке соответствует максимальное значение напряжений опорного валка. Графики распределения напряжений по длине бочки опорного валка в контакте с рабочим при разных значениях скосов представлены на рисунке 3.28.

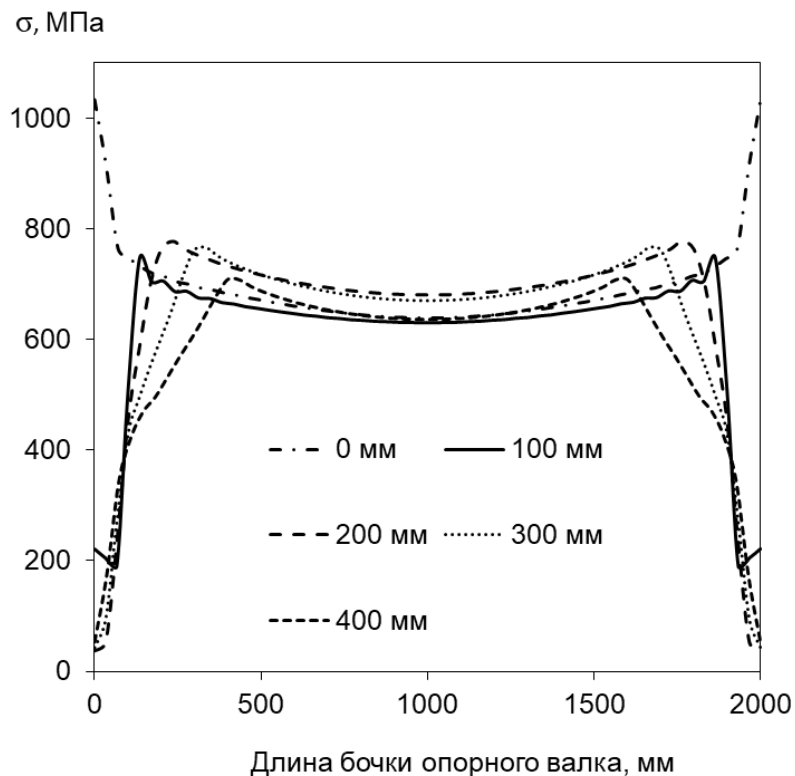


Рисунок 3.28 – Распределение напряжений по длине бочки опорного валка в середине площадки контакта с рабочим при разной длине скосов ( $D_p = 800$  мм;  $D_{оп} = 1500$  мм;  $h_{ск} = 0,8$  мм;  $b = 1830$  мм;  $P = 30$  МН)

При отсутствии скосов отмечается существенный рост напряжений в краевой зоне – 1030 МПа, что подтверждает необходимость выполнения скосов для разгрузки края бочки опорного вала. Анализ остальных графиков показывает, что максимальные напряжения отмечаются в месте перехода гладкой бочки в скос. Увеличение длины скосов приводит к снижению напряжений на краях бочки, а также к незначительному уменьшению напряжений в начале скосов.

Исследование влияния глубины скоса показало, что увеличение этого параметра, например, в два раза ( $h_{ск} = 1,6$  мм) приводит к уменьшению напряжения на краю бочки на 15 %, а уменьшение в два раза глубины скоса ( $h_{ск} = 0,4$  мм) – к существенному, пятикратному росту напряжений. В обоих вариантах отмечается отсутствие существенного увеличения напряжений в начале скосов.

Вариант исполнения скосов со скруглением в месте перехода гладкой бочки в скос не снижает напряжения на краю бочки, хотя приводит к более плавному изменению напряжения по длине скоса, а также к снижению напряжения в начале скоса на 5 %. Моделирование двойных скосов общей длиной до 400 мм также не дает преимуществ в уменьшении величины напряжения на краю бочки.

Оценка величины износа бочек более 100 опорных валков из марки стали AST70X, работавших в различных клетях непрерывного широкополосного стана горячей прокатки 2000 ПАО «Северсталь», на основе анализа значений измерений профиля вала перед шлифовкой в 21-ой точке показала, что предельный радиальный износ в середине бочки может достигать 0,6 мм. Из рисунка 3.29 видно, что такой износ может вызывать интенсивный рост напряжений в зоне края его бочки, а также приводить к росту напряжений в зоне скосов опорных валков.

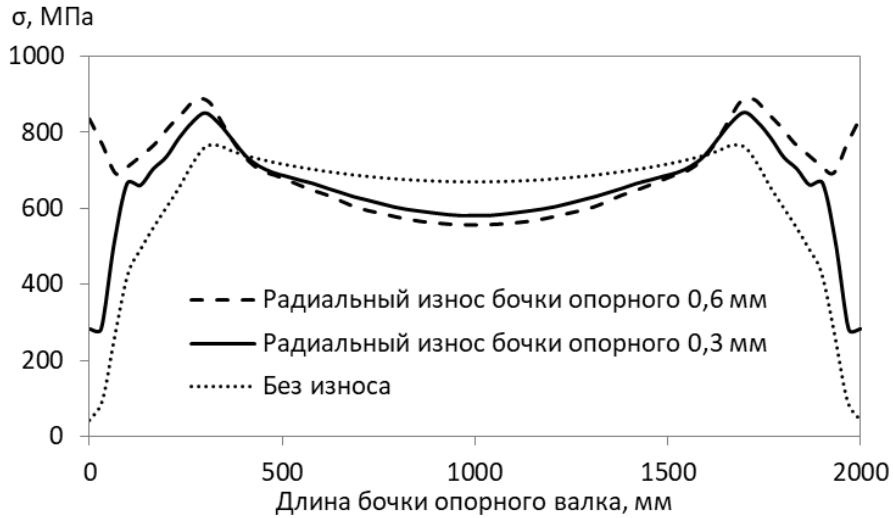


Рисунок 3.29 – Распределение напряжений по длине бочки опорного вала с учетом его износа в середине площадки контакта с рабочим при длине скосов 300 мм ( $D_p = 800$  мм;  $D_{оп} = 1500$  мм;  $h_{ск} = 0,8$  мм;  $b = 1830$  мм;  $P = 30$  МН)

Таким образом, исследование напряжений в межвалковом контакте с выпуклыми, вогнутыми и цилиндрическими профилировками валковых систем кварто показало, что при отсутствии скосов у опорных валков с цилиндрической профилировкой отмечается существенный рост напряжений в краевой зоне до 30 %, с увеличением длины скосов эти напряжения снижаются. На стане горячей прокатки 2000 с цилиндрической профилировкой опорных валков скосы длиной от 300 мм и больше со скруглением в месте перехода гладкой бочки в скос обеспечат наиболее равномерное распределение давлений по длине межвалкового контакта.

### 3.4 Разработка методики выбора профилировок валков

Выполненные теоретические и промышленные исследования позволили создать методику выбора профилировок валков (рисунок 3.30) [251], учитывающую взаимосвязь между различными влияющими факторами и интегрирующую описанный метод моделирования формообразования поперечного профиля.

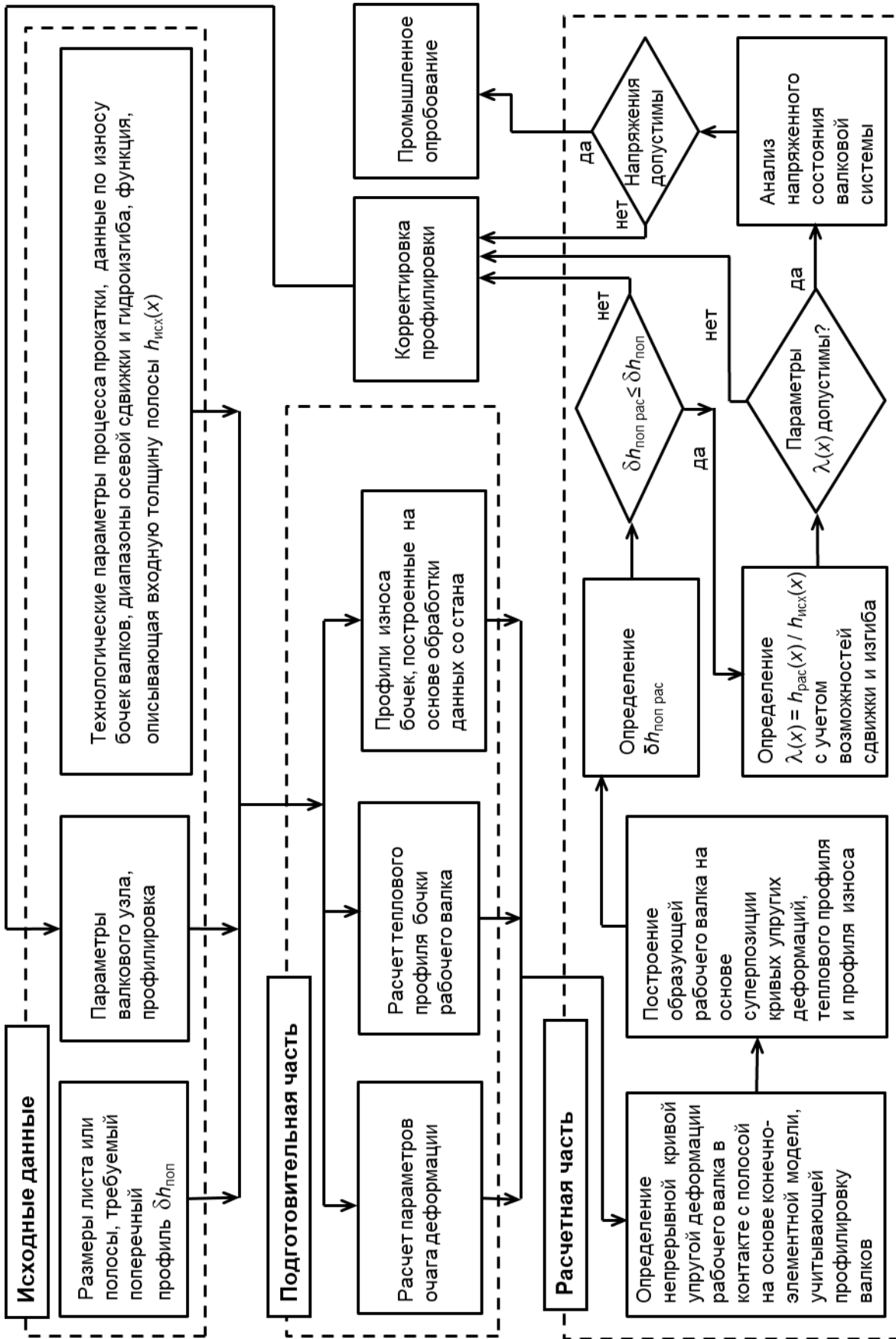


Рисунок 3.30 – Схема реализации методики выбора профилировок валковых систем

Варианты использования методики состоят в оценке существующих профилировок валковых систем по клетям стана и их усовершенствовании или в разработке новых профилировок валков как для всего стана, так и для отдельных клеток на основе учета всего прокатываемого сортамента. В этом случае задается средняя ширина, толщина и средние значения регулирующих воздействий осевой сдвижки рабочих валков и их гидравлического изгиба.

Методика состоит из трех модулей, реализующих анализ и ввод исходных данных, подготовительные расчеты параметров очага деформации, теплового профиля, износа валков и основную расчетную часть.

Модуль «Исходные данные» включает описание размеров листа или полосы, требуемый поперечный профиль  $\delta h_{\text{поп}}$ , параметры валкового узла, применяемые профилировки, технологические параметры процесса прокатки (межклетевые натяжения, обжатия, скорости прокатки, температурные и энергосиловые параметры), данные по износу бочек валков, диапазоны осевой сдвижки и гидроизгиба, функцию, характеризующую входную толщину полосы  $h_{\text{исх}}(x)$ , где  $x$  – произвольная координата по ширине полосы. Также может задаваться исходная неплоскостность подката через функцию распределения вытяжек по ширине  $\lambda_{\text{исх}}(x)$ .

В модуле «Подготовительная часть» реализуются расчеты параметров очага деформации и теплового профиля бочки, определяются профили износа бочек, построенные на основе обработки данных со стана.

В модуле «Расчетная часть» определяется кривая упругой деформации рабочего валка в контакте с полосой на основе конечно-элементной модели, учитывающей профилировку валков, осуществляется построение кривой образующей бочки рабочего валка на основе суперпозиции кривых упругих деформаций, теплового профиля и профиля износа, определяется  $\delta h_{\text{поп рас}}$ . После расчета осуществляется проверка на соответствие требуемой величине поперечного профиля. В случае положительной проверки определяется распределение вытяжек по ширине  $\lambda(x) = h_{\text{рас}}(x)/h_{\text{исх}}(x)$  с учетом возможностей

сдвижки и изгиба рабочих валков и окончательная оценка напряженного состояния валковой системы при выбранных профилировках. Если по какому-либо параметру – поперечному профилю и вытяжкам по ширине – наблюдается невыполнение установленных требований, то принимаются соответствующие корректирующие меры по профилировкам и расчет повторяется. Также после анализа напряженного состояния валковой системы может быть принято решение о корректировке профилировок с их новым расчетом.

Разработанную методику предлагается использовать для разных широкополосных и листовых станов при проектировании или усовершенствовании профилировок различных валковых систем и достижения высоких показателей качества листового проката и повышения стойкости валков.

### **3.5 Реализация методики выбора профилировки валковой системы толстолиствого стана 5000**

Реализация изложенной методики выбора профилировки выполнена на примере валковой системы толстолиствого стана 5000 ПАО «Северсталь». Технологическая практика стана 5000 с наибольшей длиной бочки показала, что существующая система профилировок вызывает преждевременные поверхностные разрушения опорных валков в переходных зонах от гладкой бочки к скосам (рисунок 3.31). Это свидетельствует об опасных контактных напряжениях между бочками рабочих и опорных валков в этих зонах.

Для оценки и разработки профилировок опорных валков стана 5000, согласно методике рисунка 3.30, были собраны и проанализированы данные о профилировках, износе, поверхностных дефектах валков, колебаниях толщины по длине и ширине листов. По существующей технологии на стане рабочие валки цилиндрические или имеют параболическую вогнутость 0,1–0,3 мм на диаметр, опорные – цилиндрические с одинарными или двойными скосами. Влияние



регулирующих воздействий на поперечный профиль листа и разнотолщинность исходной заготовки не рассматривались.

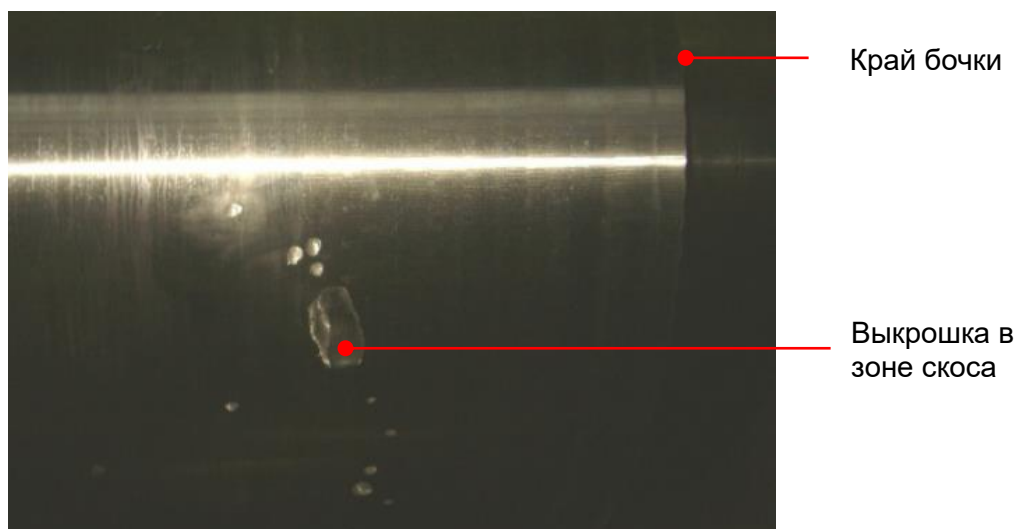


Рисунок 3.31 – Поверхностные дефекты опорного валка в зоне скоса

На основе технологических параметров, взятых из системы контроля производства, выполнен расчет параметров очага деформации и определен тепловой профиль бочки рабочих валков при прокатке более чем 20 листов из различных марок сталей и профилеразмеров. Результаты выполненной расчетной части показали, что определяемые поперечные разнотолщинности полосы оказались близки к фактическим. Некоторые результаты моделирования поперечного профиля листов представлены на рисунках 3.13 и 3.14.

Анализ напряженного состояния валковой системы показал, что на опорный валок, как с одинарными, так с двойными скосами действуют пиковые значения напряжений со стороны рабочего валка в месте, где кончается гладкая часть бочки и начинается скос (рисунок 3.32). Максимальные значения пиковых напряжений в 1,3 раза больше при прокатке листов максимальной ширины  $b = 4750$  мм в сравнении с шириной  $b = 2100$  мм, при этом характер распределений напряжений не изменяется.

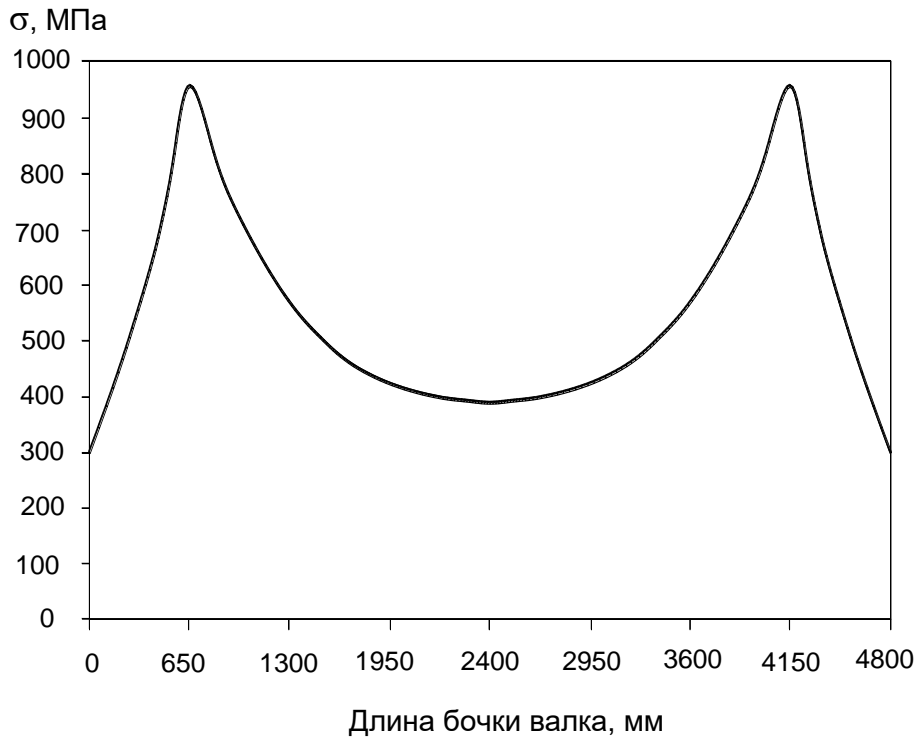


Рисунок 3.32 – Распределение напряжений по длине бочки опорного вала в середине площадки контакта с рабочим валком (цилиндрическая профилировка опорного вала,  $l_{ск} = 650$  мм,  $h_{ск} = 1,5$  мм,  $b = 4750$  мм,  $P = 50$  МН)

Перед поиском новой профилировки опорных валков было выполнено исследование влияния изменения вогнутости бочки рабочего вала  $\Delta D_{шл}$  в диапазоне от 0 до -0,6 мм. Для этого был взят усредненный тепловой профиль, рассчитанный по методике [116, 117]. Рабочие валки в середине бочки имеют температуру 90–100 °С, а на свободных от полосы концах 28–30 °С и их тепловая выпуклость усреднено равна  $\Delta D_{р\text{ тепл}} = 0,9\text{--}1,0$  мм. Температура листа по его ширине не постоянна – максимальную температуру он имеет примерно на половине ширины, а к боковым кромкам она уменьшается на 60–100 °С, что было подтверждено измерениями тепловизионной камерой в промышленных условиях на стане. Кривая упругих деформаций рабочего вала определена на основе

конечно-элементного моделирования валковой системы при прокатке самой широкой полосы ( $b = 4750$  мм) для случая, когда опорный валок имеет двойные скосы, а рабочий имеет  $\Delta D_{\text{шл}} = 0$ ;  $-0,4$  мм;  $-0,6$  мм. Было получено, что при шлифовке рабочего валка цилиндрическим ( $\Delta D_{\text{шл}} = 0$ ) поперечный профиль листа вогнутый, с разнотолщинностью  $\delta h_{\text{поп}} = -0,56$  мм, при  $\Delta D_{\text{шл}} = -0,4$  мм – поперечный профиль листа также вогнутый, но поперечная разнотолщинность  $\delta h_{\text{поп}} = -0,14$  мм. С увеличением вогнутости до  $\Delta D_{\text{шл}} = -0,6$  мм поперечный профиль листа становится выпуклым:  $\delta h_{\text{поп}} = +0,04$  мм.

Таким образом, анализ показал, что варьируя вогнутость бочки рабочего валка в диапазоне  $\Delta D_{\text{шл}} = 0-0,6$  мм, можно получать листы с выпуклым, вогнутым или близким к прямоугольному поперечным профилем и задачу исключения пиковых напряжений в межвалковом контакте следует решать путем изменения профилировки бочек опорных валков, оставив за профилировками рабочих валков только функцию формирования поперечной разнотолщинности листов.

Опробовав по вышеописанной методике разные варианты профилировок бочек опорных валков, была разработана принципиально новая профилировка, показанная на рисунке 3.33 [252, 253]. Ее особенность состоит в том, что профиль выполняется в форме участков трех выпуклых парабол: один участок – в средней части бочки и два сопряженных с ним по краям. При этом, в каждом из сопряжений участки парабол имеют общую касательную, а краевые участки плавно сопрягают с торцом бочки и касательные в местах сопряжений перпендикулярны к оси валка. Выбор формы среднего участка профиля валка в виде выпуклой параболы определялся тем, что при прогибе валка линия изгиба, как известно, принимает форму вогнутой параболы, компенсируя таким образом выпуклость профиля. Выбор формы краевых участков также в виде параболы обеспечивает плавное сопряжение среднего участка с торцом бочки и в этом случае контакт между рабочим и опорным валками характеризуется минимальной неравномерностью. Выбор стрелы выпуклости краевых парабол  $f_{\text{кр}}$  (расстояние в радиальном направлении от точек сопряжения со средним участком до торца)

определяется достаточностью формы этого скругления для снятия пиков контактных напряжений. Этот результат также выявлен расчетами. Для валковой системы стана 5000 были определены следующие диапазоны параметров профилировки: выпуклость средней части бочки  $f_{\text{ср}} = 3\text{--}5$  мм, длина участка краевой параболы  $l_{\text{кр}}$  составляет 4–8 % от длины бочки, а  $f_{\text{кр}} = 5\text{--}10$  мм.

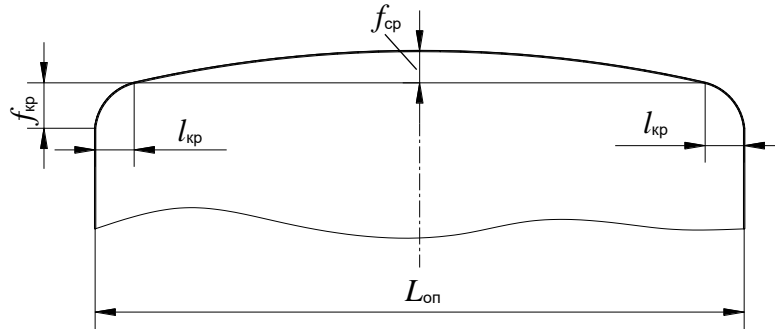


Рисунок 3.33 – Предлагаемая профилировка опорного вала

Исключение резких переходов между краевыми кривыми, средней параболической кривой и торцом бочки, выполнение всех сопряжений профилировки таким образом, чтобы у сопряженных кривых были общие касательные, оптимальный выбор длины и стрелы выпуклости участков краевых кривых обеспечивают существенное уменьшение контактных напряжений в межвалковом контакте. На рисунке 3.34 показано распределение напряжений в межвалковом контакте при выполнении опорного вала с параметрами профилировки  $f_{\text{ср}} = 5$  мм,  $l_{\text{кр}} = 200$  мм,  $f_{\text{кр}} = 8$  мм при прокатке листа шириной 4750 мм. Пики напряжений в межвалковом контакте, соответствующие началам скосов, исчезли, максимальные значения напряжений отмечаются в середине бочки и снижены не менее чем на 20 % в сравнении с цилиндрической профилировкой со скосами.

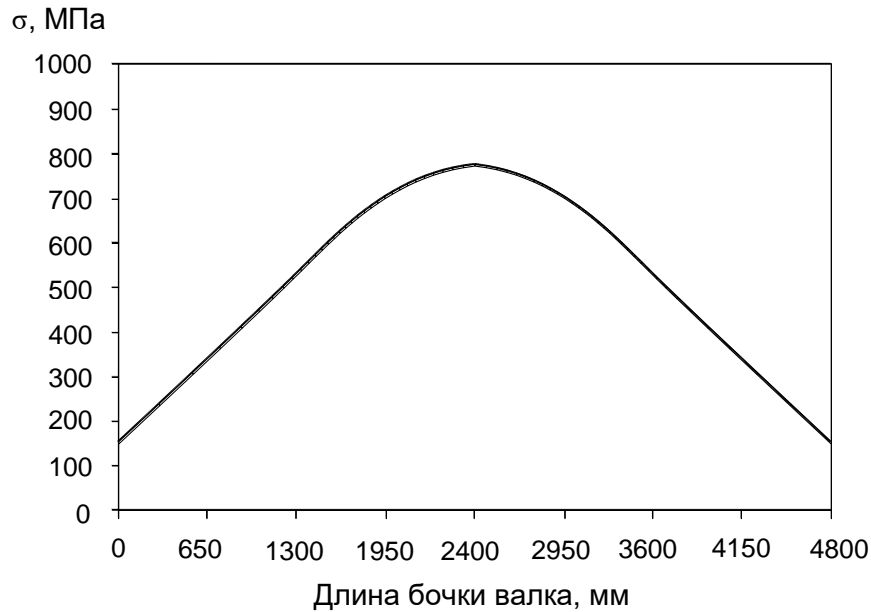


Рисунок 3.34 – Распределение напряжений по длине бочки опорного валка с новой профилировкой в середине площадки контакта с рабочим валком ( $b = 4750$  мм,  $P = 48$  МН)

Было исследовано влияние изменения параметров профилировки – в варианте 1 уменьшена выпуклость профиля  $f_{\text{ср}}$  до 3 мм, в варианте 2 – увеличена длина участков дополнительных закруглений образующей бочки  $l_{\text{кр}}$  до 400 мм и уменьшена глубина этих закруглений у торцов бочки  $f_{\text{кр}}$  до 5 мм. Рассмотрение дополнительных вариантов показало небольшое увеличение напряжений в середине бочки – до 50–60 МПа, во втором варианте отмечался незначительный рост напряжений в краевой зоне до 220 МПа, что существенно меньше, чем при использовании опорных валков с цилиндрической профилировкой со скосами.

Учитывая возможности вальцешлифовального станка КЖ 3404 участка подготовки валков стана 5000 ЛПЦ-3 ПАО «Северсталь», предложен вариант профилировки к опробованию с параметрами  $f_{\text{ср}} = 5$  мм,  $l_{\text{кр}} = 400$  мм,  $f_{\text{кр}} = 5$  мм. Профили бочек рабочих валков выполняются с плавной параболической вогнутостью, каждый глубиной 0,3–0,4 мм на диаметр.

На способ профилирования опорных валков стана кварто получен патент Российской Федерации [254].

### **Выводы по главе 3**

1. Реализовано численное моделирование напряженно-деформированного состояния валковых систем полосовых и листовых станов, позволяющее учитывать их различные конструктивные особенности, средства регулирования, профилировки и определять кривые упругих деформаций по длине бочки рабочего валка в контакте с полосой и напряжения в межвалковом контакте. Показано соответствие результатов численного моделирования напряжений с результатами расчета на основе теоретических формул, базирующихся на теории контакта двух цилиндров.

2. Предложено развитие метод формообразования поперечного профиля листового проката в концепции геометрического суммирования кривых упругих деформаций, износа и теплового расширения валков за счет применения пространственной конечно-элементной модели валковых систем с непрерывным описанием профиля бочки. Обосновано, что использование кривой упругих деформаций рабочего валка, полученной по трехмерной модели валковой системы, обеспечивает точность определения профиля со средней погрешностью, не превышающей 8,5 %.

3. Установлены закономерности влияния выпукло-вогнутых профилировок валковых систем и средств регулирования на формирование поперечного профиля прокатываемых полос:

3.1. Диапазон осевой сдвижки рабочих валков при выпукло-вогнутых профилировках валковой системы позволяет уменьшать разность упругих деформаций на ширине полосы не менее чем на 30 %.

3.2. Гидравлическим изгибом рабочих валков обеспечивается широкий диапазон регулирования (до 75 %) поперечной разнотолщинности полосы.

3.3. Резерв регулирования поперечного профиля за счет корректировки выпуклости и вогнутости профилировки рабочего валка составляет не менее 38 %.

4. Разработана новая методика выбора профилировок валков листопрокатного производства, интегрирующая разработанный метод формообразования поперечного профиля листового проката с оценкой стойкости валковых систем прокатных станов.

5. С применением методики выбора профилировок валков разработана принципиально новая профилировка опорных валков. Способ профилирования опорных валков заключается в выполнении профиля бочки выпуклым из отрезков трех парабол, плавно сопрягающихся между собой и с торцом бочки. Способ направлен на снижение контактных напряжений между опорным и рабочим валками и увеличение срока службы валков. На способ получен патент Российской Федерации.

## **Глава 4. Исследование и повышение стойкости валков в процессе формообразования широкой стальной полосы при непрерывной прокатке**

### **4.1 Методологический подход к оценке параметров состояния поверхностного слоя опорных валков**

Интенсификация технологических процессов формообразования листового проката требует не только корректно разработанных профилировок прокатных валков, но и всестороннего анализа и оценки состояния их рабочего слоя. Важнейшим фактором, определяющим работоспособность рабочих валков, применяемых в клетях непрерывных прокатных станов, является состояние поверхности опорных валков. Рост загрузки оборудования непрерывных прокатных станов приводит к повышению требований к материалу рабочего слоя опорных валков и к ужесточению условий работы, связанных с увеличением продолжительности кампаний до перешлифовки и ростом нагрузки в контакте со смежным рабочим валком. В этом случае задача обеспечения высокой стойкости опорных валков при продлении их прокатной кампании с одновременным снижением их расхода является актуальной, а ее решение для каждого стана должно основываться на методологическом подходе к оценке параметров состояния поверхностного слоя опорных валков. Анализ степени разработанности проблемы показал отсутствие комплексной стратегии оценки, включающей анализ интенсивности работы опорного валка, величину приращения твердости бочки и износа по клетям непрерывного стана и определение величины съема после прокатной кампании, учитывая особенности работы валка по клетям стана.

Предлагаемый методологический подход к оценке параметров состояния поверхностного слоя опорных валков (рисунок 4.1) включает четыре взаимосвязанные части по определению:



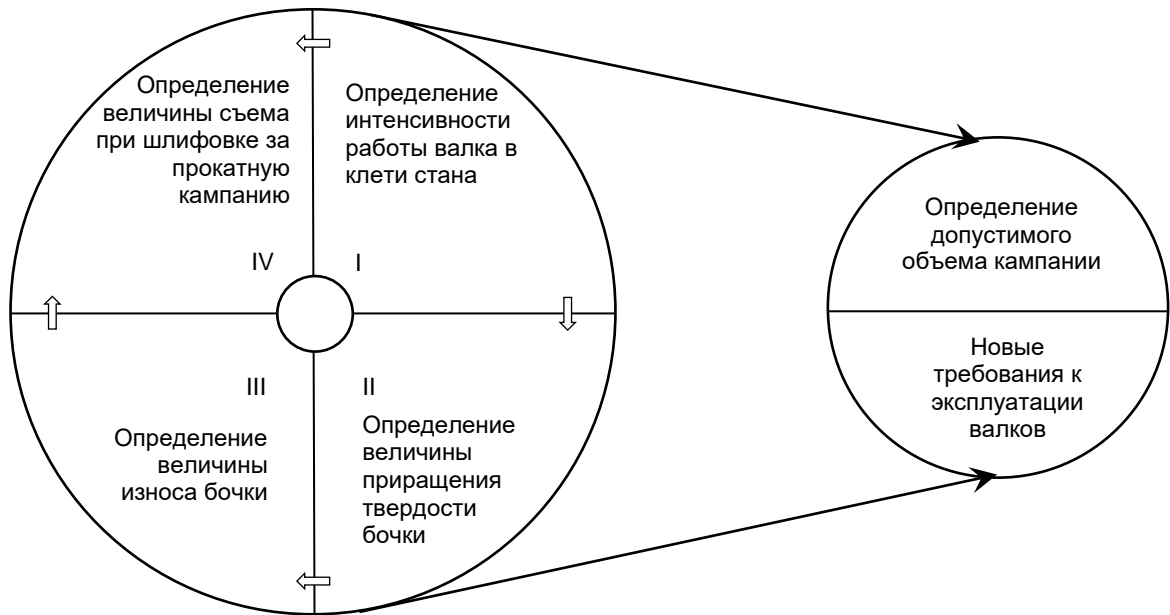


Рисунок 4.1 – Методологический подход к оценке параметров состояния рабочего поверхностного слоя опорного валка в клети непрерывного стана

I – параметров технологии, позволяющих оценить особенности работы валка в соответствующей клети непрерывного стана;

II – упрочнения бочки после прокатной кампании в зависимости от клети стана;

III – износа бочки;

IV – величины съема при шлифовке с учетом интенсивности работы опорного валка в клети стана.

Предлагаемая комплексная оценка позволяет решать вопросы обоснованного увеличения прокатной кампании опорных валков, снижения расхода валков, увеличения их наработки и разработки новых требований к их эксплуатации. Реализация такого подхода рассмотрена для непрерывного широкополосного стана горячей прокатки 2000 ПАО «Северсталь».

## 4.2 Определение интенсивности работы опорного валка в клетки стана

Работа опорных валков непрерывных станов за кампанию определяется массой прокатываемого металла  $Q$  и номером клетки. Одним из направлений снижения расхода и повышения их наработки является возможность учета при съеме за шлифовку особенностей работы опорного валка в зависимости от номера клетки стана. Для этого был выполнен анализ регистрируемых автоматической системой измерения и контроля технологических данных процесса прокатки на непрерывном широкополосном стане 2000 ПАО «Северсталь» по каждой кампании опорных валков с оценкой степени износа и упрочнения бочки по клетям стана.

Анализ параметров прокатки показал, что интенсивность работы опорного валка за кампанию в клетки непрерывного стана определяется числом контактов с рабочим валком и погонной нагрузкой, действующей на валок в межвалковом контакте. Учитывая, что число циклов нагружения зависит от массы прокатываемого металла за кампанию, оценку интенсивности работы опорных валков можно также напрямую связать с длиной прокатываемых полос в каждой клетки непрерывного стана.

Количественные значения числа циклов нагружения  $N_i$ , длины полосы  $L_{\text{пи}}$  (км) и средней погонной нагрузки в межвалковом контакте  $q_i$  (т/мм) в каждой  $i$ -ой клетки прокатной кампании определяются путем обработки данных, фиксируемых автоматической системой измерения и контроля параметров прокатки.

Число циклов нагружения опорного валка в  $i$ -ой клетки за кампанию вычисляется по формуле:

$$N_i = \sum_{j=1}^m \frac{L_j}{\pi D_{\text{опи}}} \frac{B_j H_j}{b_{ji} h_{ji}}, \quad (4.1)$$

где  $m$  – общее число полос, прокатанное за кампанию;  $L_j$ ,  $B_j$ ,  $H_j$  – длина, ширина и толщина исходной заготовки – сляба, мм;  $h_{ji}$  и  $b_{ji}$  толщина и ширина  $j$ -ой полосы

после  $i$ -ой клетки, мм;  $D_{опi}$  – диаметр опорного вала  $i$ -ой клетки, мм.

Длина полосы  $L_{пи}$  после прокатки в  $i$ -ой клетки, км:

$$L_{пи} = \frac{L_j}{1 \cdot 10^6} \frac{B_j H_j}{b_{ji} h_{ji}}. \quad (4.2)$$

Средняя погонная нагрузка в межвалковом контакте в  $i$ -ой клетки за кампанию, т/мм:

$$q_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{P_{ji}}{10000 L_{оп}}, \quad (4.3)$$

где  $P_{ji}$  – сила прокатки  $j$ -ой полосы в  $i$ -ой клетки, Н;  $L_{оп}$  – длина бочки опорного вала прокатного стана, мм.

Результаты расчета средних значений циклов нагружений, длины прокатанных полос и погонной нагрузки по клетям чистовой группы стана 2000 за 22 кампании в период с января 2020 г. по май 2021 г. при их средней тоннажности  $Q_{ср} = 275$  тыс. т представлены в таблице 4.1. Среднее значение погонной нагрузки  $q_i$  не зависит от тоннажности кампании, а определяется номером клетки. Анализ всех кампаний опорных валков показал, что самой нагруженной клетью по совместному влиянию числа циклов нагружений и межвалковой нагрузки является клеть № 11.

При этом также оценивался прокатанный тоннаж  $Q$  полос разной ширины  $b$  по клетям стана за все кампании (таблица 4.2). Масса прокатываемого металла за кампанию в среднем не превышает 300 тыс. т. Доля полос свыше 1600 мм в среднем составляет 2,5 % от всего тоннажа кампаний, а на долю полос шириной 1201–1400 мм приходится до 50 % тоннажа кампаний.

Одновременно с оценкой интенсивности работы опорных валков из марки стали AST70X по клетям стана 2000 производилось измерение твердости их бочек в пяти контрольных точках (рисунок 4.2) перед шлифовкой и после шлифовки электронным переносным твердомером ТЭМП-2 (35890-13) по шкале Шора «D»

(HSD). Измерение твердости всегда выполнялось по линии образующей бочки между 2-мя шпонками, расположенными на цапфах опорного вала:

Таблица 4.1 – Среднее число циклов контакта рабочего и опорного валков, средний километраж прокатанных полос и средняя погонная нагрузка по клетям стана за 22 кампании опорных валков при их  $Q_{cp} = 275$  тыс. т

Номер клетки	Число циклов $N_i \cdot 10^6$	Длина прокатанных полос $L_{pi}$ , км	Погонная нагрузка в контакте $q_i$ , т/мм
6	0,30	1441	1,14
7	0,50	2351	1,15
8	0,74	3502	0,94
9	1,03	4885	0,90
10	1,36	6496	0,81
11	1,60	7697	0,72
12	1,74	8280	0,49

Таблица 4.2 – Прокатанный тоннаж  $Q$  полос разной ширины  $b$  за 22 кампании опорных валков чистовой группы

$b$ , мм	$Q$ , т	%
920-1200	35 964	11,3
1201-1400	155 284	48,7
1401-1600	119 788	37,6
1601-1850	7 907	2,5

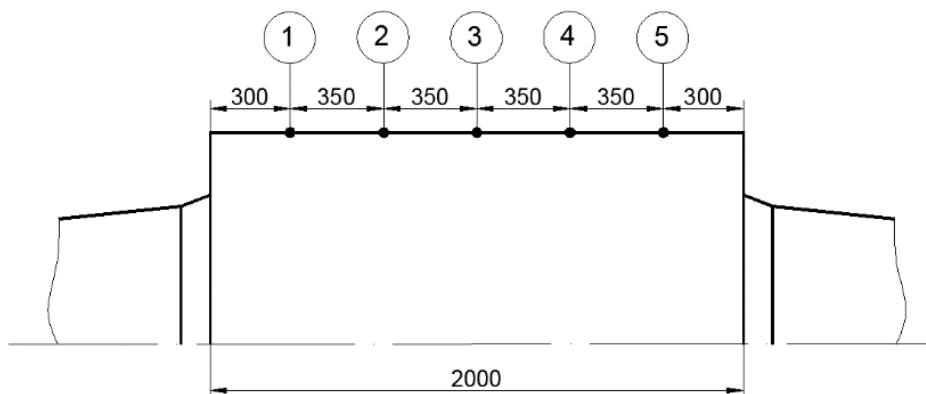


Рисунок 4.2 – Расположение контрольных точек  
на поверхности бочки опорного валка  
(координаты указаны в мм)

Используя все фактические измерения твердости (180 измерений сорока валков из марки стали AST70X в пяти точках после эксплуатации в клетях чистовой группы стана), определено изменение средних значений твердости бочек валков по клетям стана перед шлифовкой (рисунок 4.3). Видно, что наибольшим приращением твердости бочки характеризуется клеть № 11.

Оценка величины износа бочки опорных валков и его интенсивности производилась на основе анализа значений измерений профиля валка перед шлифовкой в 21 точке. Профиль износа измерялся пассаметром (рычажной скобой) с погрешностью измерений, не превышающей 2 мкм. При этом рассматривался радиальный износ на следующих участках бочки опорного валка (рисунок 4.4): краевых, размер которых – до 299 мм от каждого края бочки опорного валка (зоны А), центральном – середина валка длиной 800 мм (зона С) и зоны перехода между этими участками от 300 мм до 599 мм и 1401 мм до 1700 мм (зоны Б). Также определялась максимальная интенсивность износа, характеризуемая коэффициентом  $K_{и}$  в зонах А, Б и С, равным изменению диаметра валка при прокатке одного километра полосы.

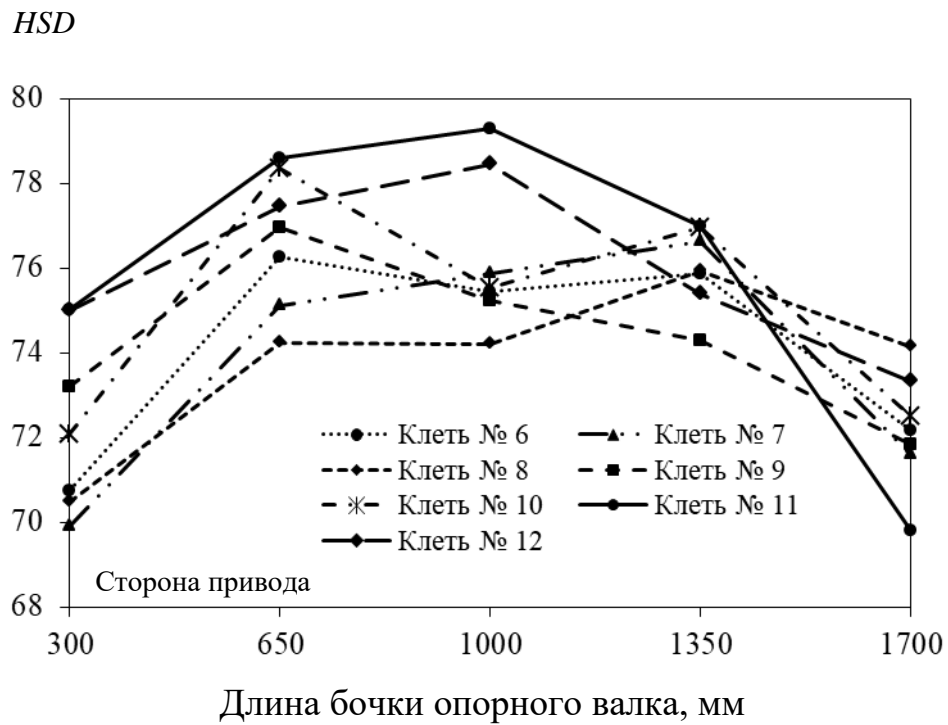


Рисунок 4.3 – Изменение средних значений твердости бочек валков по клетям стана перед шлифовкой по результатам 180 измерений

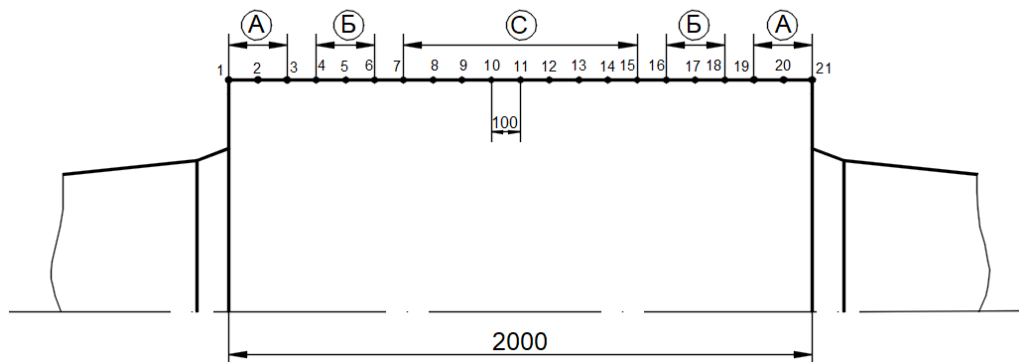


Рисунок 4.4 – Участки бочки опорного вала для оценки неравномерности износа

Динамика изменения средних значений износа  $\Delta_n$  по клетям стана на участках бочки и его интенсивности  $K_n$  за все кампании представлена в таблице 4.3. Видно, что максимальный износ зафиксирован в зонах Б и С у валков,

эксплуатируемых в клетях № 11 и № 12, а максимальный износ в зоне А – у валков в клетях № 6, № 7 и № 9. При этом также видно, что максимальный износ во всех кампаниях соответствует зоне Б – кромкам прокатываемых полос шириной 930-1400 мм.

Таблица 4.3 – Средняя величина износа и его интенсивность на участках бочки опорных валков по клетям стана за все кампании

Номер клетки	Износ $\Delta_{и}$ , мм			Интенсивность износа $K_{и} \cdot 10^{-5}$ , мм/км		
	Зона А (до 299 мм от края бочки)	Зона Б (от 300 до 599 мм)	Зона С (середина 800 мм)	Зона А (до 299 мм от края бочки)	Зона Б (от 300 до 599 мм)	Зона С (середина 800 мм)
6	0,17	0,18	0,08	11,80	12,49	5,55
7	0,16	0,21	0,12	6,81	8,93	5,10
8	0,11	0,19	0,14	3,14	5,43	4,00
9	0,2	0,25	0,13	4,09	5,12	2,66
10	0,15	0,19	0,14	2,31	2,92	2,16
11	0,10	0,23	0,16	1,30	2,99	2,08
12	0,10	0,27	0,19	1,21	3,26	2,29

Стоит отметить, что рост доли полос свыше 1600 мм в отдельных кампаниях не приводит к существенному увеличению износа зоны А. В целом, увеличение тоннажности кампании приводит к росту истирания в середине бочки валка.

Выполненный анализ особенностей работы опорного валка в соответствующей клетке непрерывного стана показал целесообразность учета интенсивности его работы в каждой клетке стана, поскольку число циклов нагружения и средняя погонная нагрузка в межвалковом контакте являются ключевыми факторами, характеризующими величину износа и приращение

твердости бочки опорного валка после прокатной кампании. Экспериментально установлено, что в процессе прокатки происходит различный износ бочек опорных валков и повышение их твердости по клетям стана.

### 4.3 Определение напряжений в межвалковом контакте, исследование и моделирование деформационного упрочнения бочки опорного валка

Для сравнения условий работы опорных валков по клетям непрерывного стана в силу разных значений числа контактов рабочих и опорных валков, а также силовых условий нагружения исследованы напряжения в межвалковом контакте и произведено моделирование упрочнения бочки опорного валка.

Определение напряжений в межвалковом контакте выполнено на основе теории контакта двух цилиндров под воздействием сжимающих сил. Из теории [14, 91, 95, 144, 148, 244] известно, что максимальное эквивалентное напряжение  $\sigma_{\text{экр.мах}}$ , являющееся результирующим трех главных напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\sigma_z$ , располагается не на поверхности, а под поверхностью бочки валков на глубине, равной  $y = 0,78b_{\text{оп}}$  (рисунок 4.5). Здесь  $b_{\text{оп}}$  – половина ширины контакта двух цилиндров, определяемая по формуле, полученной на основании решения Г. Герца:

$$b_{\text{оп}} = 1,128 \sqrt{\eta q \frac{R_p \cdot R_{\text{оп}}}{R_p + R_{\text{оп}}}}, \quad (4.4)$$

где  $\eta = \frac{1 - \nu_p^2}{E_p} + \frac{1 - \nu_{\text{оп}}^2}{E_{\text{оп}}}$  – упругая постоянная материала, зависящая от модуля

упругости материала опорного  $E_{\text{оп}}$  и рабочего  $E_p$  валков, а также от коэффициент Пуассона материала валков  $\nu_{\text{оп}}$  и  $\nu_p$ ;  $q$  – погонная нагрузка в контакте валков;  $R_{\text{оп}}$  и  $R_p$  – радиусы бочек опорного и рабочего валков.

Максимальное нормальное напряжение в межвалковом контакте определяется по формуле:



$$p_0 = \frac{2q}{\pi b_{\text{оп}}} . \quad (4.5)$$

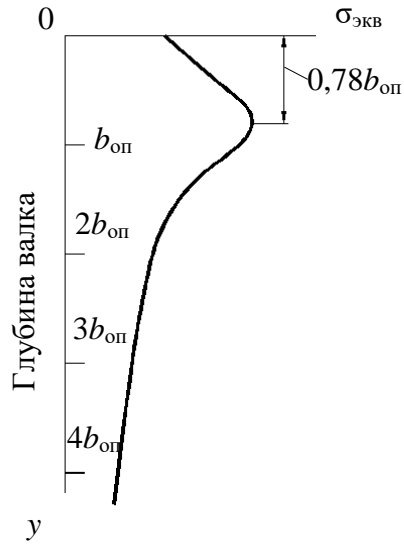


Рисунок 4.5 – Изменение по глубине вала эквивалентного напряжения

На рисунке 4.6 показано распределение нормальных контактных напряжений по ширине площадки контакта валков.

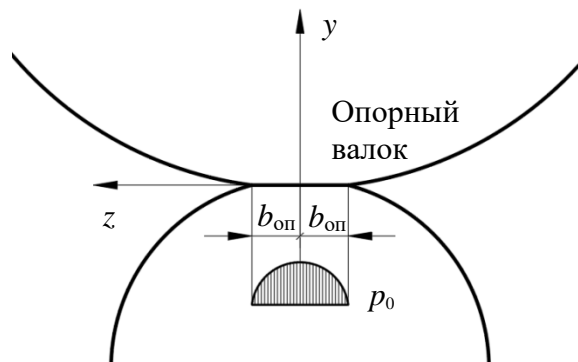


Рисунок 4.6 – Распределение нормальных напряжений по площадке контакта валков

Используя третью теорию прочности (теорию максимальных касательных напряжений) и учитывая, что максимальное главное напряжение  $\sigma_1 = \sigma_x$ , минимальное –  $\sigma_3 = \sigma_y$ , максимальное эквивалентное напряжение определяется по формуле:

$$\sigma_{\text{экв.мах}} = \sigma_1 - \sigma_3 = 0,6\rho_0. \quad (4.6)$$

Для оценки максимальных напряжений в межвалковом контакте были рассмотрены средние значения усилий по клетям стана и максимальные, взятые из данных системы контроля производства на широкополосном стане 2000 горячей прокатки ПАО «Северсталь» при прокатке полос следующей ширины [255]: 1000 мм, 1320 мм, 1640 мм и 1830 мм. Результаты расчета значений напряжений в межвалковом контакте  $\sigma_{\text{экв.мах}}$  (*a*) и их глубины *y* (*b*) по клетям стана, полученные на основе теории контакта двух цилиндров, представлены на рисунке 4.7.

Анализ полученных распределений  $\sigma_{\text{экв.мах}}$  и их глубины по клетям стана показал, что максимальные значения этих параметров отмечаются в валках первых двух клеток чистовой группы и на 20–35 % выше, чем в двух последних клетях стана. При этом  $\sigma_{\text{экв.мах}}$  в самых нагруженных клетях на 20 % меньше предела выносливости материала рабочих слоя опорных валков из марки стали AST70X, равного 980 МПа. Все это с учетом числа циклов контакта опорного валка с рабочим за прокатную компанию  $N_i$  (таблица 4.1) позволяет рассматривать работу опорных валков чистовой группы в условиях многоциклового деформации, приводящей к многоциклового усталости рабочего слоя.

Для рабочего слоя опорных валков из марки стали AST70X характерна мартенситно-бейнитная структура с распределенными мелкими карбидами [162, 163]. При многоциклового усталости в макрообъеме материал рабочего слоя деформируется упруго. При упругом деформировании в микрообъемах (в отдельных слабых зернах, вблизи дефектов) из-за многокомпонентной структуры

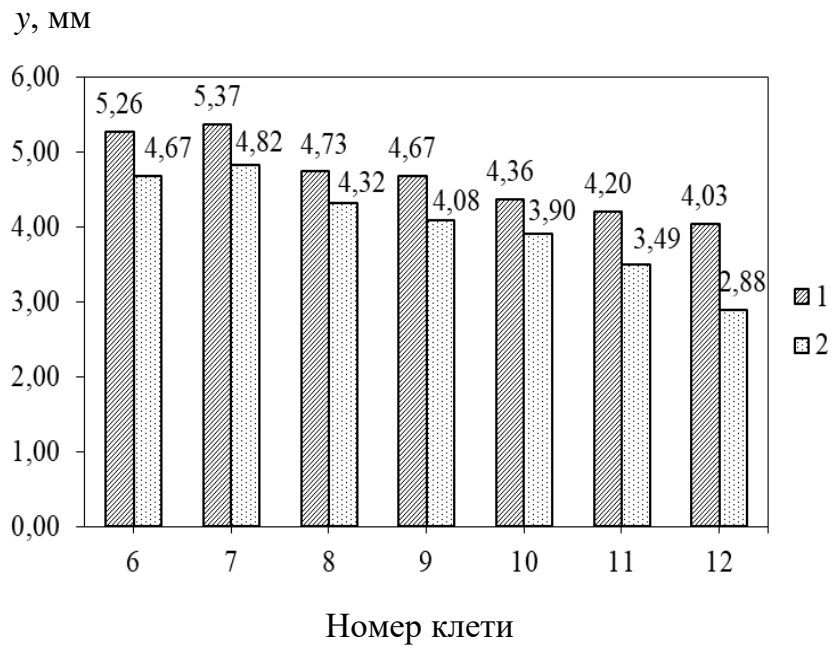
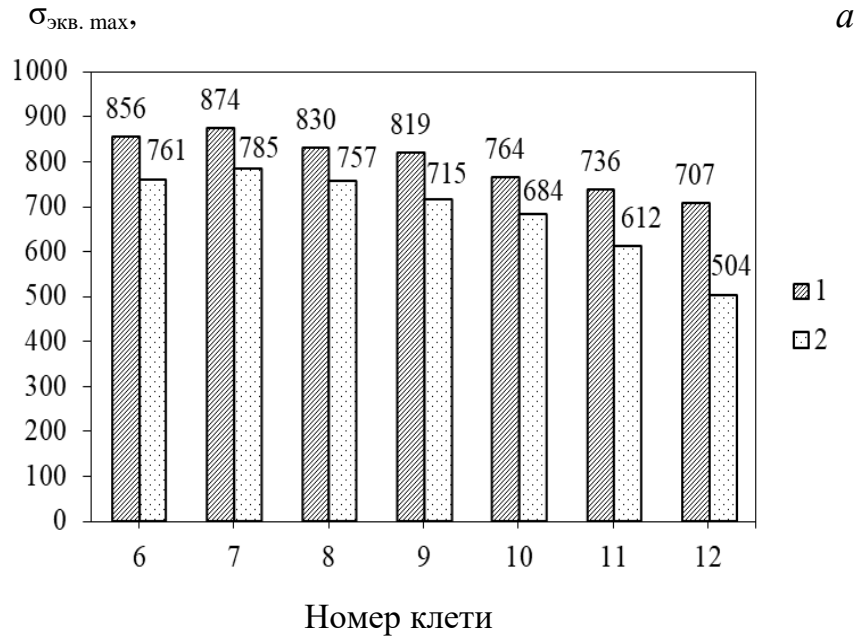


Рисунок 4.7 – Распределение значений напряжений  
в межвалковом контакте  $\sigma_{\text{экв. max}}$  (*a*) и  
их глубины  $y$  (*б*) по клетям стана:  
1 – максимальные значения силы прокатки;  
2 – средние значения силы прокатки

материала рабочего слоя вала происходит локальное пластическое деформирование, называемое микропластическим. Его многократное повторение приводит к зарождению микроскопических трещин. Постепенное их развитие и слияние в магистральную трещину приводит к усталостному разрушению поверхности бочки, в частности к образованию выкрошек и сколов. По данным работ [85, 256] число циклов, соответствующее точке перелома кривой усталости  $N_0$ , или продолжительность стадии многоциклового усталости до момента зарождения магистральной усталостной макротрещины для сталей находится в пределах  $(1,0-4,0) \cdot 10^6$  циклов.

Моделирование упрочнения бочки опорного вала выполнено на основе применения среды конечно-элементного анализа [257–259]. Диаметр бочки опорного вала равен  $D_{оп} = 1500$  мм, свойства материала рабочего слоя бочки вала получены в программном комплексе JMatPro. Для учета числа циклов контакта опорного вала с рабочим в зависимости от номера клетки (таблица 4.1) и экономии времени расчета разработка модели выполнена в 2D-постановке. В этом случае упругопластическая модель бочки опорного вала (рисунок 4.8, а) со стороны контакта с рабочим валком от действия силы прокатки нагружена нормальным давлением, которое можно определить по формуле (4.5). Рассматривались варианты: а) сила прокатки  $P = 30$  МН,  $b_{оп} = 6,8$  мм и  $p_0 = 1405$  МПа; б)  $P = 15$  МН,  $b_{оп} = 4,6$  мм и  $p_0 = 1038$  МПа.

В зоне межвалкового контакта выполнено измельчение сетки (рисунок 4.8, б), ее размер составляет 1,5 мм. Для реализации циклов контакта межвалковое давление задавалось в виде графика гармонических колебаний по закону косинуса:

$$y = A \cos(\omega \cdot \tau + \varphi_0), \quad (4.7)$$

где  $y$  – величина, характеризующая положение опорного вала в момент времени  $\tau$  относительно рабочего вала;  $A$  – амплитуда колебаний;  $\omega = 2\pi/T$  – циклическая

частота;  $T$  – период колебаний или время полного оборота опорного вала, составляет в среднем 0,2 с в клетке № 12 и 2 с в клетке № 6;  $\varphi_0$  – начальная фаза.

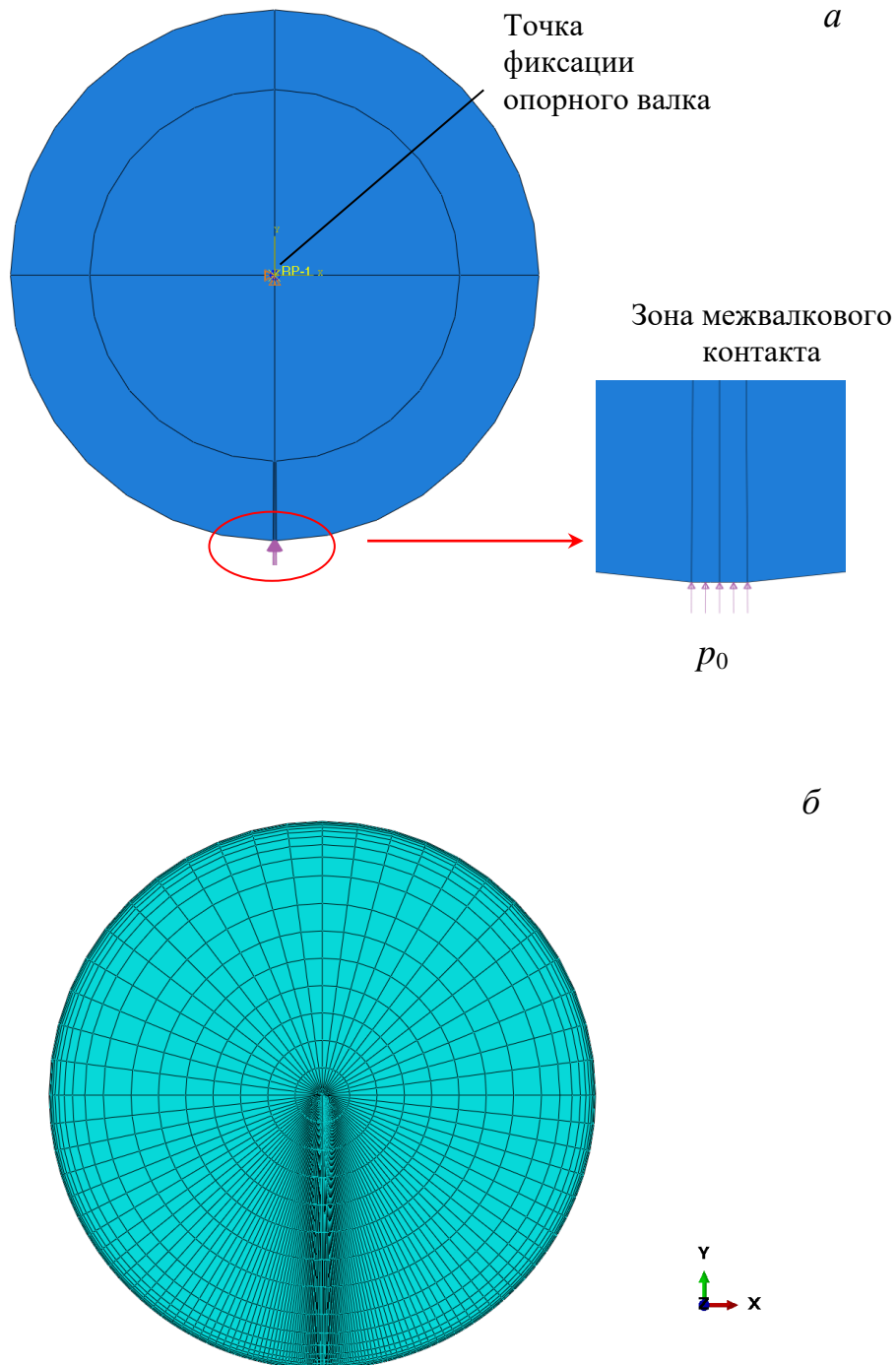


Рисунок 4.8 – Задание граничных условий (а) и конечно-элементная модель опорного вала (б)

На рисунке 4.9, в качестве примера, приведен график периодического контакта опорного вала с рабочим в клети № 6.

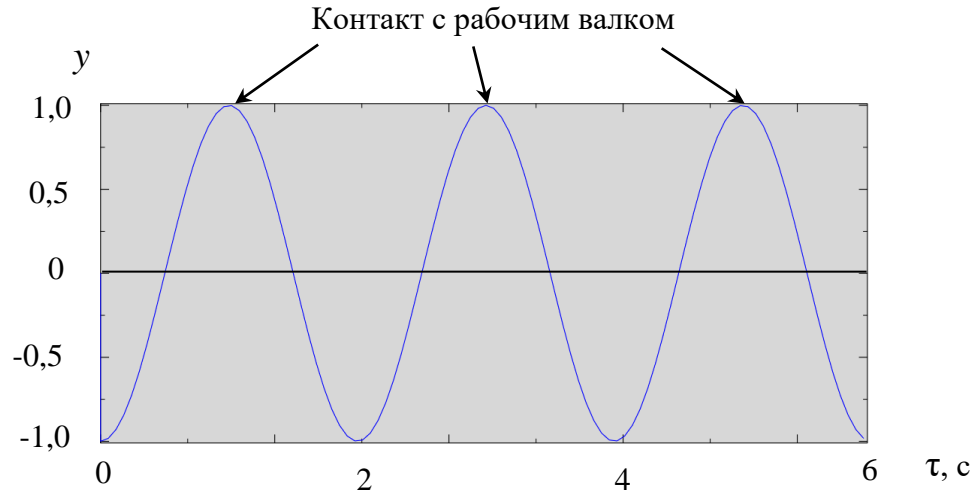


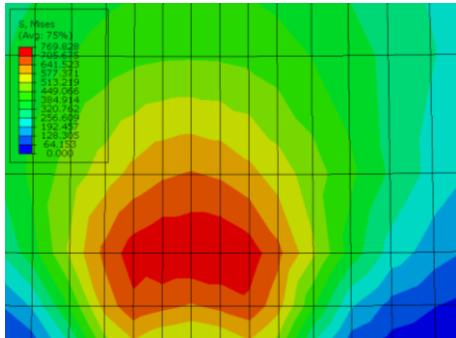
Рисунок 4.9 – График периодического контакта опорного вала с рабочим

Результаты моделирования числа циклов нагружения в клетях № 6 (а) и № 12 (б) при  $p_0 = 1405$  МПа приведены на рисунке 4.10. Максимальные напряжения располагаются на глубине 5 мм и составляют 770 МПа. Увеличение числа циклов нагружения, как в клети № 12, приводит к увеличению остаточных напряжений на 82 МПа и деформаций – на 0,02 мм.

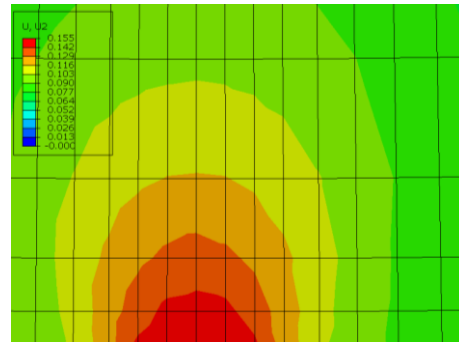
Имеющиеся исследования зависимости между твердостью и напряжением деформируемого тела на основе получения тарировочных графиков «твердость – напряжения» при испытаниях на сжатие [260] позволили принять, что рост интенсивности напряжений на 20 МПа приводит к росту *HSD* на 4 единицы. Значит, увеличение напряжений на 82 МПа может привести к росту твердости на 16 единиц.

*a*

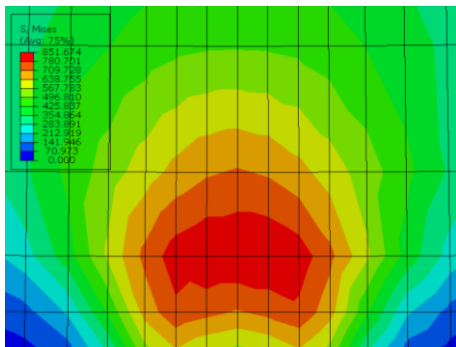
Распределение напряжений, МПа



Распределение деформаций, мм

*б*

Распределение напряжений, МПа



Распределение деформаций, мм

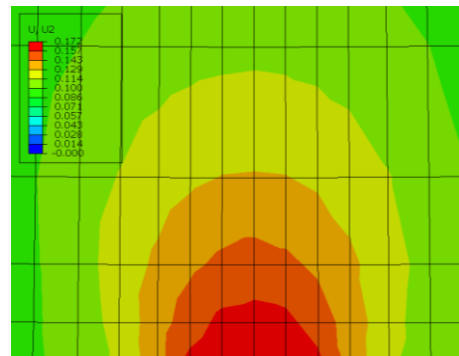


Рисунок 4.10 – Результаты моделирования распределения напряжений и деформаций при  $P = 30$  МН с числом циклов нагружения, соответствующих клетки № 6 (*a*) и клетки № 12 (*б*)

Учитывая, что опорные валки клетки № 12 не работают в условиях  $1,74 \cdot 10^6$  циклов при силе прокатки, равной 30 МН (допустимое усилие составляет 17 МН), на рисунке 4.11 представлены результаты моделирования напряжений при усилнии 15 МН с числом циклов нагружения, соответствующих клетям № 6 (*a*) и № 12 (*б*). В этом случае, при одной и той же нагрузке в клетки № 12 за счет большего числа циклов твердость возрастет на 4 единицы в сравнении с клетью № 6.

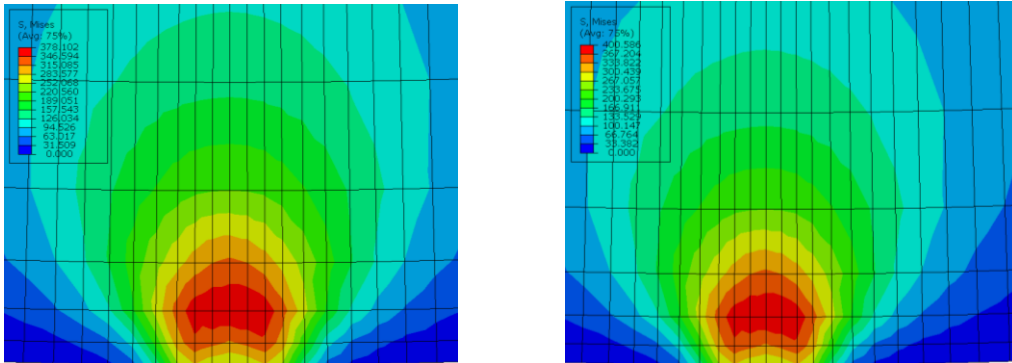


Рисунок 4.11 – Распределение напряжений при различных циклах нагружения в клетях № 6 (а) и № 12 (б) при  $P = 15$  МН

Также определено, что при одном цикле нагружения при усилии 30 МН напряжения в валке составили 748 МПа, при 15 МН – 378 МПа, следовательно, рост твердости при усилии 30 МН может составлять за число контактов  $0,3 \cdot 10^6$  в клетки № 6 может составлять 4,4 единицы, а при усилии 15 МН – 2,1 единицы.

Результаты вычислительного эксперимента по определению напряжений в каждой клетке при средних значениях погонной нагрузки и числе циклов контакта рабочего и опорного валков за 22 кампании представлены в таблице 4.4. Получено, что максимальное приращение твердости характерно для последних клеток стана и составляет 6,1–6,3 *HSD* и есть резерв по увеличению тоннажа прокатных кампаний, поскольку производители валков рекомендуют не превышать твердость бочки валка более чем на 8 единиц *HSD* за прокатную кампанию.

После обработки результатов численного эксперимента с помощью обобщенного метода наименьших квадратов было получено выражение приращения твердости бочки валка в зависимости от работы в  $i$ -ой клетки чистовой группы за прокатную кампанию:



Таблица 4.4 – Результаты определения максимальных напряжений и приращения твердости

Номер клетки	Число циклов $N_i \cdot 10^6$	Длина прокатанных полос $L_{\pi i}$ , км	Погонная нагрузка в контакте $q_i$ , т/мм	Напряжения при одном цикле нагружения ( $N = 1$ ) / при $N$ циклах, МПа	Приращение твердости бочки, $HSD$
6	0,30	1441	1,14	569 / 585	3,3
7	0,50	2351	1,15	569 / 589	4,0
8	0,74	3502	0,94	492 / 513	4,1
9	1,03	4885	0,90	473 / 498	5,0
10	1,36	6496	0,81	436 / 465	5,8
11	1,60	7697	0,72	402 / 433	6,3
12	1,74	8280	0,49	323 / 353	6,1

$$\Delta HSD_i = -1,1158 + 0,0006926 \cdot L_{\pi i} + 3,0258 \cdot q_i, \quad (4.8)$$

где  $L_{\pi i}$  – длина прокатанной полосы в  $i$ -ой клетки, км;  $q_i$  – средняя погонная нагрузка в межвалковом контакте  $i$ -ой клетки, т/мм. Значение коэффициента корреляции составило  $r = 0,99$ .

На рисунке 4.12 представлено изменение приращения твердости рабочего слоя опорных валков по клетям стана при разных объемах кампаний  $Q$ .

Для качественной оценки выбранного критерия оценки рабочего слоя опорного валка – приращение твердости бочки, учитывающего интенсивность работы валка в зависимости от номера клетки непрерывного стана, и полученной зависимости (4.8) была реализована дополнительная серия промышленных экспериментов, суть которых состояла в следующем:

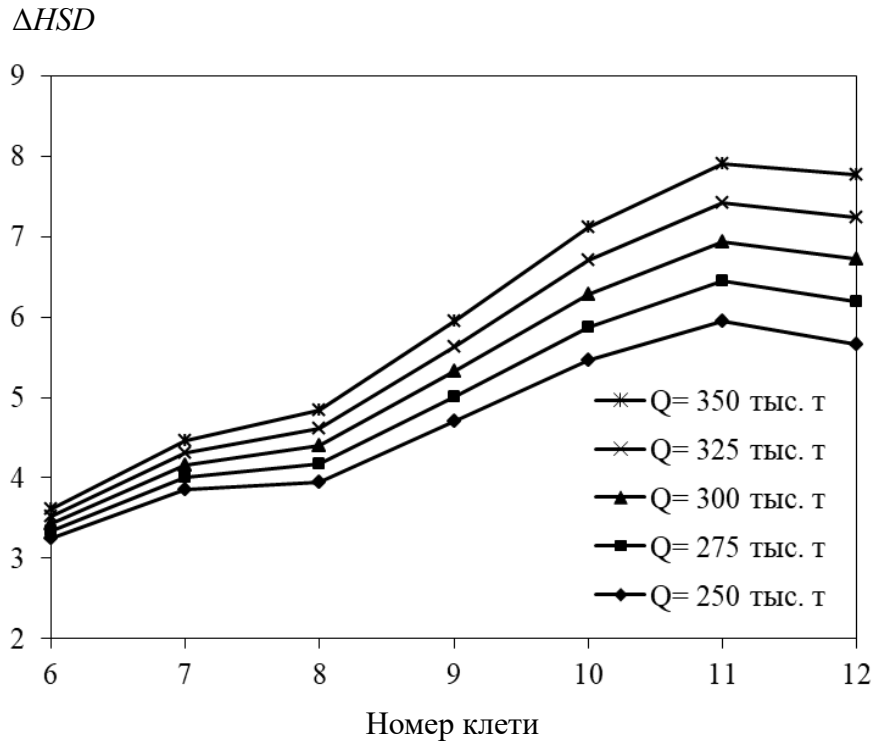


Рисунок 4.12 – Приращение твердости бочки опорного вала  
в зависимости от номера клетки и объема кампании

1. Измерение твердости производилось для валков, отработавших кампанию в клетях № 11 и № 6. Выбор этих клеток был обусловлен тем, что клеть № 11 является самой нагруженной клетью стана, в сравнении с первой клетью чистовой группы № 6. В среднем, отношение циклов контактов  $N$  или длины прокатанной полосы  $L_{\text{п}}$  в этих клетях составляет:  $N_{11} / N_6 = L_{\text{п}11} / L_{\text{п}6} \approx 5,3$ . В эксперименте участвовали валки из марки стали AST70X, их доля в парке валков стана 2000 максимальна. Рассматривались валки, работавшие в нижнем положении в клетях стана. Как показывает практика работы различных широкополосных станов, что подтверждается и на стане 2000, истирание бочек валков в нижнем положении чуть больше в сравнении с верхним. В основном, как отмечается в работах [125, 128], это связывается с бóльшим количеством окалина, попадаемой на нижний валок – окалина «срезает» частички поверхностного слоя, приводя к более интенсивному абразивному износу бочки опорного вала.

2. Измерение твердости до и после шлифовки выполнялось по линии образующей бочки между двумя шпонками в 14-ти точках: в краевых зонах скосов с шагом 100 мм, в остальной части с интервалом 200 мм (рисунок 4.13) с помощью электронного переносного твердомера ТЭМП-2. Погрешность измерений твердости гарантированно не превышает  $\pm 3,0$  единицы *HSD*, что обеспечивается периодической поверкой твердомера ТЭМП-2 (35890-13), при которой подтверждается точность и достоверность измерений в пределах от 30,0 до 99,9 *HSD* на образцовых мерах твердости.

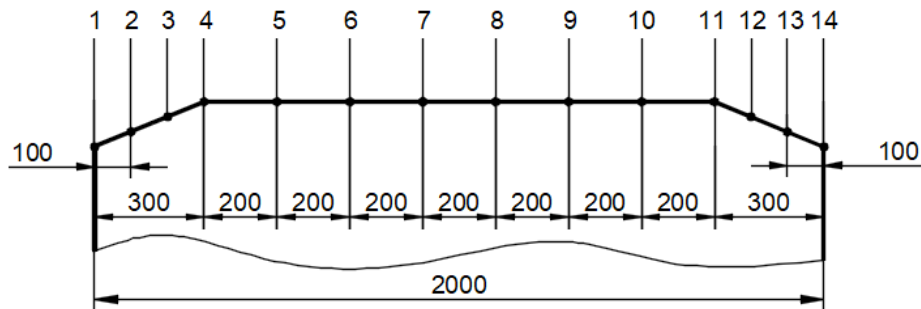


Рисунок 4.13 – Точки измерения твердости поверхности бочки опорного вала

Меньший шаг измерения твердости в краевых зонах скосов был выбран для сравнения уровней наклепа зон скосов и середины поверхности валков. Также производилось измерение профиля износа валков.

Характеристики валков, участвующих в эксперименте, представлены в таблице 4.5. Твердость после последней шлифовки *HSD* измерялась как среднее значение в пяти точках образующей бочки между шпонками.

Таблица 4.5 – Твердость по паспорту и после последней шлифовки валков, *HSD*

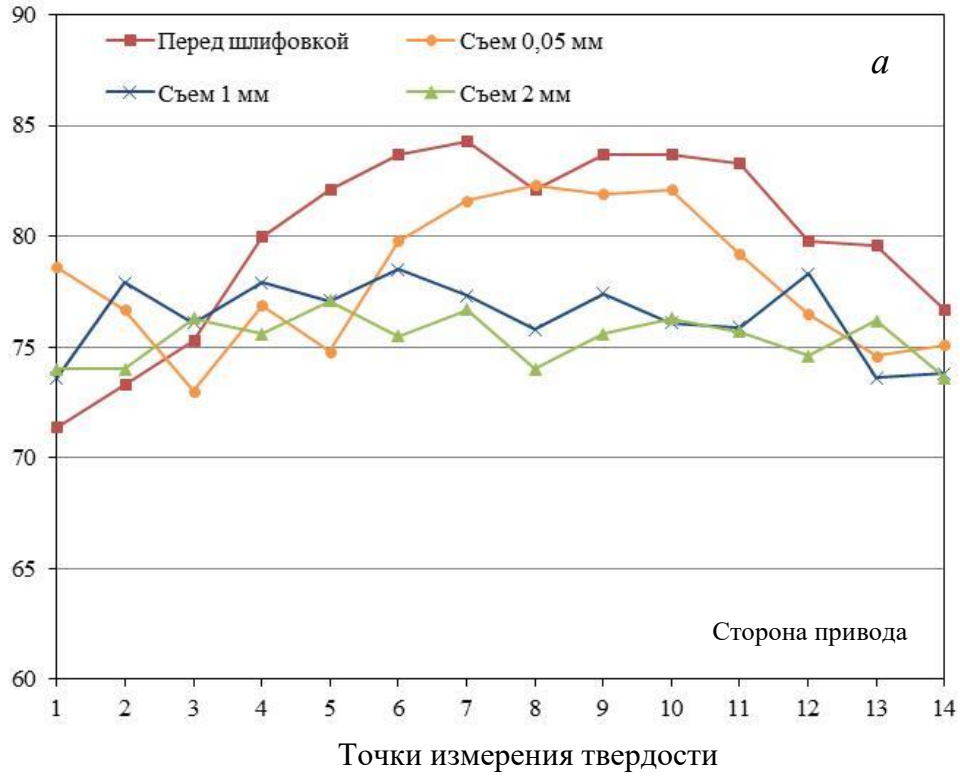
№ валка / № клетки	Твердость по паспорту	Твердость после последней шлифовки
1 / 11	67-68	73,0
2 / 6	63-67	77,4

На рисунке 4.14 приведены результаты измерений валков № 1 и № 2. Величина съема 0,05 мм соответствует одному проходу шлифовального круга. Сравнивая твердость участков скосов и середины бочки можно констатировать, что применение скосов разгружает краевые участки бочки и они становятся менее наклепанными.

Что касается измерений износа, то подтвердились выполняемые ранее изменения – износ в середине бочки в клетки № 6 минимален, для клетки № 11 характерен износ в зоне прокатки кромок полос (рисунок 4.15).

Полученные измерения твердости по образующей бочки опорных валков были сведены в таблицу 4.6. Сравнивалось изменение твердости после последней шлифовки *HSD* (таблица 4.5) со средними значениями измеренной твердости в 14-ти точках  $HSD_{cp}$  (рисунок 4.13). В эксперименте получено, что при прокатке 283 тыс. т в клетки № 11 приращение твердости бочки опорного валка составляет 6,9 *HSD*, а после работы в клетки № 6 – 2,5 *HSD*. Эти значения соотносятся с результатами моделирования, полученными на основе использования зависимостей по результатам конечно-элементного моделирования – значения приращения твердости равны 6,5 *HSD* и 3,4 *HSD* для клеток № 11 и № 6 соответственно.

HSD



HSD

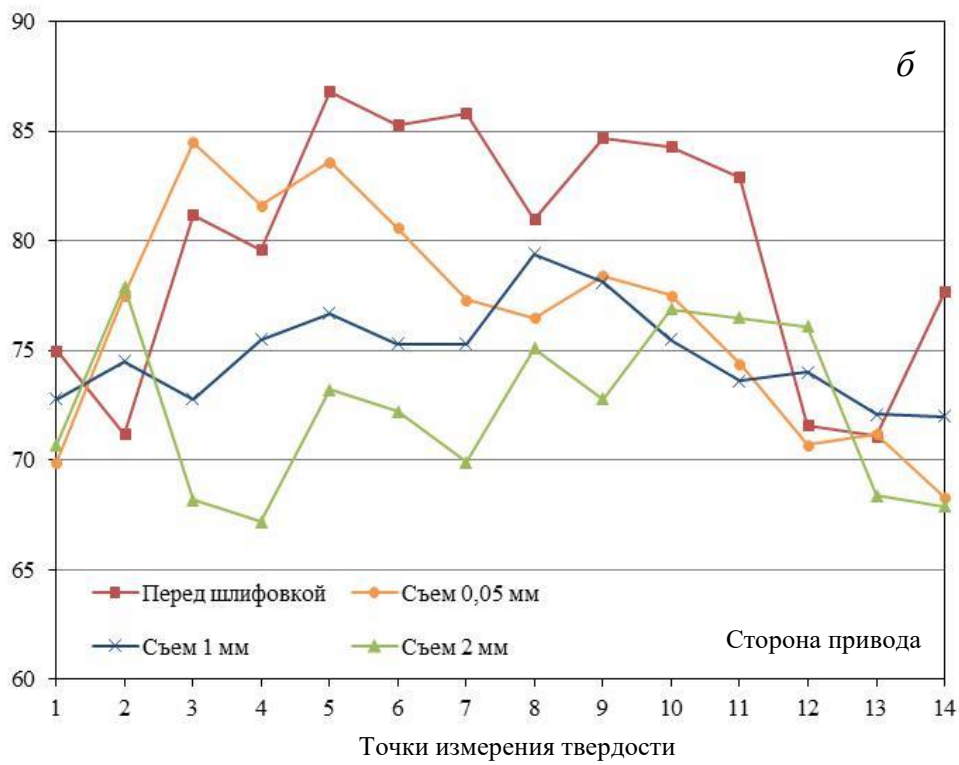


Рисунок 4.14 – Результаты измерений твердости:  
 а – валка № 1 (клеть № 11); б – валка № 2 (клеть № 6)

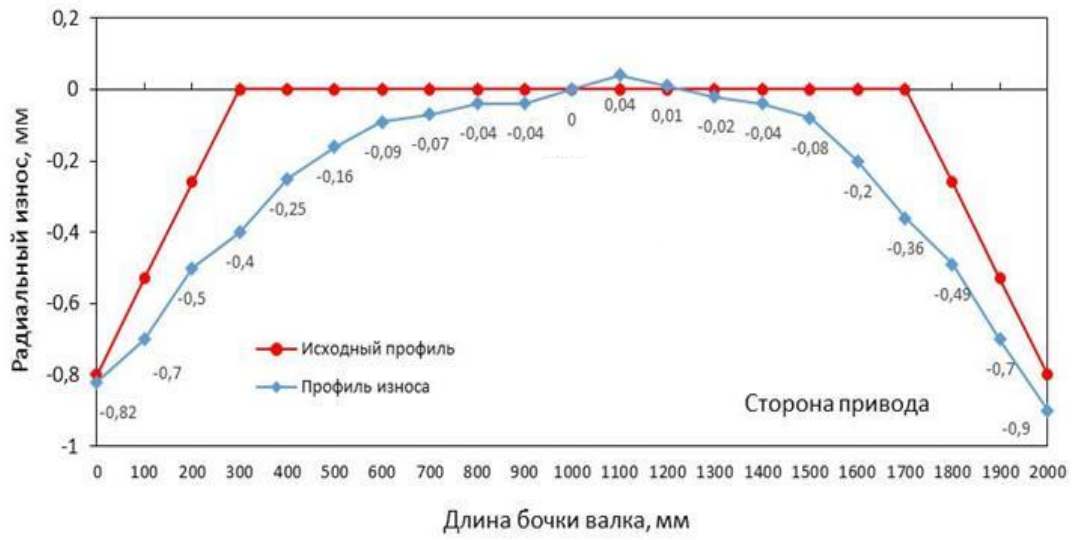
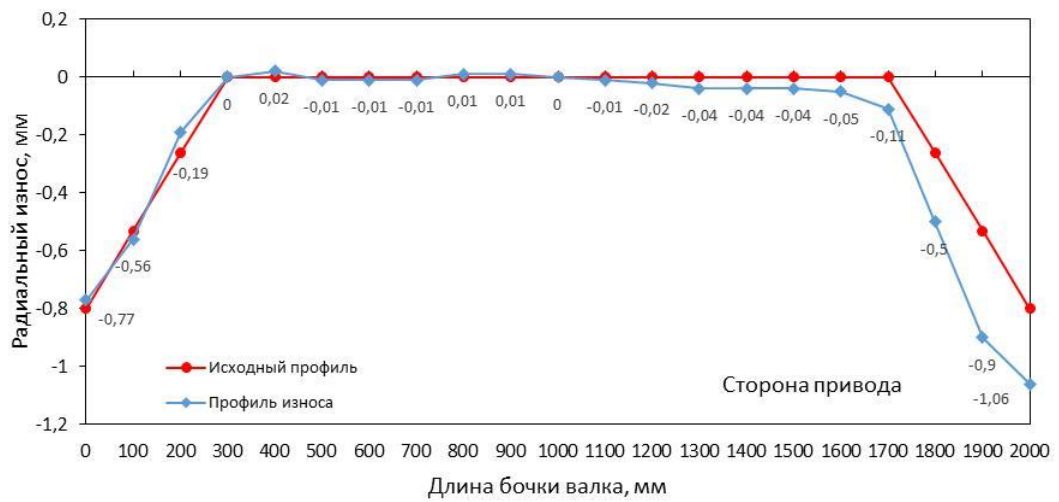
*a**б*

Рисунок 4.15 – Результаты измерений износа:

*a* – валка № 1 (клеть № 11);*б* – валка № 2 (клеть № 6)

Таблица 4.6 – Результаты измерения твердости валков, ее изменение в сравнении с твердостью после последней шлифовки

№ валка / № клетки	Съем, мм	Точки измерения твердости														$HSD_{cp}$	$\Delta HSD_{cp}$
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
1 / 11	0	71,4	73,3	75,3	80,0	82,1	83,7	84,3	82,1	83,7	83,7	83,3	79,8	79,6	76,7	79,93	<b>6,9</b>
	0,05	74,6	76,7	73,0	76,9	74,8	79,8	81,6	82,3	81,9	82,1	79,2	76,5	74,6	75,1	77,79	4,8
	1	73,6	77,9	76,1	77,9	77,1	78,5	77,3	75,8	77,4	76,1	75,9	78,3	73,6	73,8	76,38	3,4
	2	74,0	74,0	76,3	75,6	77,1	75,5	76,7	74,0	75,6	76,3	75,7	74,6	76,2	73,6	75,37	2,4
2 / 6	0	75,0	71,2	81,2	79,6	86,8	85,3	85,8	81,0	84,7	84,3	82,9	71,6	71,1	77,7	79,9	<b>2,5</b>
	0,05	69,9	77,5	84,5	81,6	83,6	80,6	77,3	76,5	78,4	77,5	74,4	70,7	71,2	68,3	76,6	-0,8
	1	72,8	74,5	72,8	75,5	76,7	75,3	75,3	79,4	78,1	75,5	73,6	74,0	72,1	72,0	74,8	-2,6
	2	70,7	77,9	68,2	67,2	73,2	72,2	69,9	75,1	72,8	76,9	76,5	76,1	68,4	67,9	72,4	-5,0

$\Delta HSD_{cp}$  – разность между твердостью после последней шлифовки и средним значением измеренной твердости  $HSD_{cp}$ .

Выполненный эксперимент и анализ произведенных измерений твердости бочек 180 валков из марки стали AST70X показал, что приращение твердости после прокатки по клетям стана можно оценить, используя средние значения твердости бочек валков по клетям стана перед шлифовкой (рисунок 4.3) и после шлифовки всех валков. После шлифовки всех валков из марки стали AST70X среднее значение твердости составило 72,8  $HSD$ . В зоне фактических значений таблицы 4.7 – столбец  $HSD_{cpmax}$  указаны максимальные средние значения твердости, взятые с графиков изменения твердости рисунка 4.3. Фактическое приращение твердости  $\Delta HSD_{cp}$  было рассчитано как разность между  $HSD_{cpmax}$  и средней твердостью после всех шлифовок валков.

Также в таблице 4.7 представлены прогнозные значения приращения твердости, полученные на основе моделирования при средней тоннажности кампаний за все время измерений 275 тыс. т.

На основе данных  $\Delta HSD_{cp}$  таблицы 4.7 построена диаграмма соответствия значений фактического и рассчитанного приращения твердости бочек опорного валка по клетям стана (рисунок 4.16).

Таблица 4.7 – Фактические максимальные средние значения твердости бочек перед шлифовкой  $HSD_{срmax}$ , фактические и расчетные средние значения приращения твердости по клетям стана

Номер клетей	Фактические значения		Результаты моделирования
	$HSD_{срmax}$	$\Delta HSD_{ср}$	$\Delta HSD_{ср}$
6	76,3	3,5	3,35
7	76,6	3,8	4,00
8	75,9	3,1	4,15
9	76,9	4,1	4,99
10	78,35	5,55	5,83
11	79,3	6,5	6,39
12	78,45	5,65	6,11

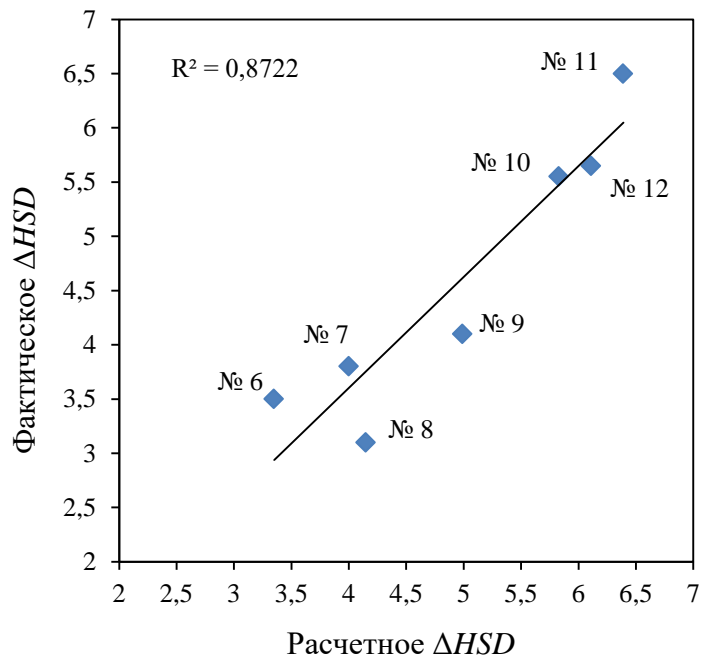


Рисунок 4.16 – Диаграмма соответствия значений фактического и рассчитанного приращения твердости бочек опорного валка по клетям стана



Степень соответствия значений фактического и рассчитанного приращения твердости бочки опорного вала по клетям стана составила  $R^2 = 87,2 \%$  и средняя погрешность – 11,4 %. Результаты выполненного эксперимента показали, что зависимость приращения твердости по клетям чистой группы стана 2000 (формула (4.8)) может использоваться для определения допустимого объема кампании опорных валков с учетом обеспечения требований эксплуатации – приращение твердости бочки опорного вала не должно превышать 8 единиц *HSD*.

Теоретические и промышленные исследования позволили создать алгоритм оценки состояния поверхности рабочего слоя бочки опорного вала (рисунок 4.17) в части определения приращения твердости.

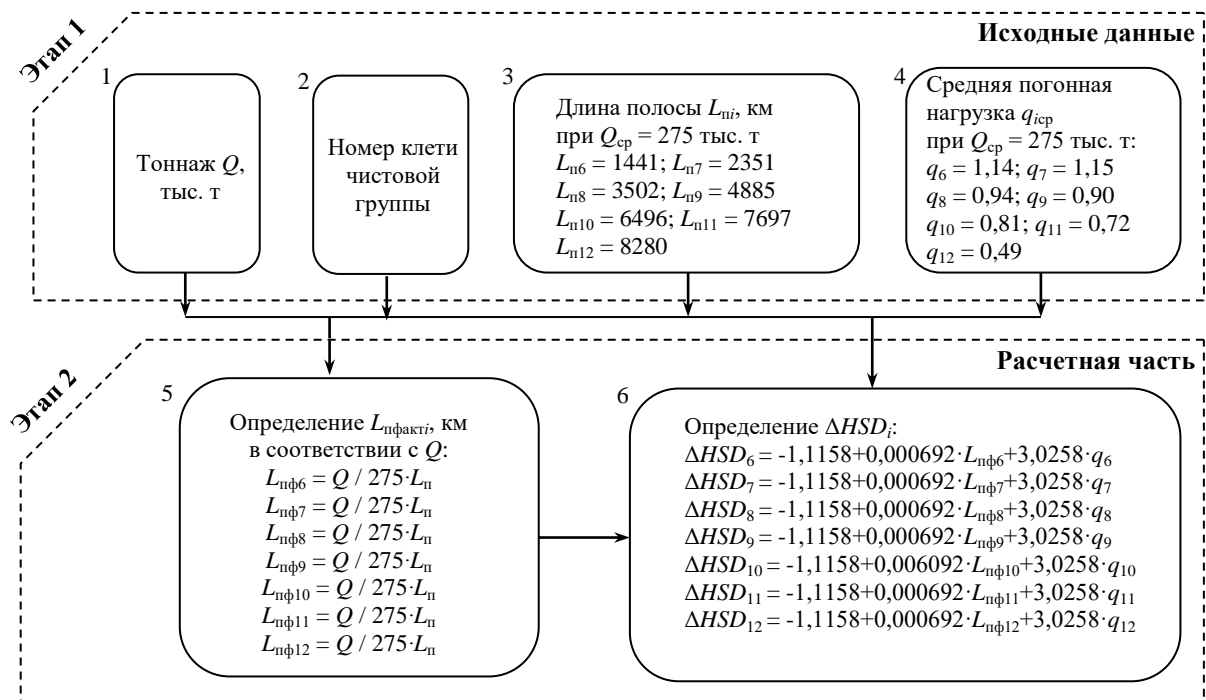


Рисунок 4.17 – Алгоритм определения приращения твердости бочки опорных валков чистой группы стана, учитывающий длину прокатанных полос

Практика эксплуатации опорных валков и результаты исследования показали, что один из резервов повышения их эксплуатационной стойкости связан с увеличением исходной твердости их бочек. Как отмечалось выше, после шлифовки всех валков из марки стали AST70X, используемых на стане 2000, среднее значение твердости составляет 72,8 *HSD*. Твердость рабочих валков ~ 75-77 единиц *HSD* и соотношение твердостей бочек опорного и рабочего валков находится в диапазоне 0,95–0,97. Кроме того, на стане 2000 ПАО «Северсталь» с 2020 г. эксплуатируются валки AST90X с содержанием хрома 6,3 % в рабочем слое и их средняя твердость после эксплуатации и шлифовке составляет по шкале *HSD* ~ 75-77 единиц, что соответствует твердости поверхностного слоя бочки рабочих валков. В этом случае рациональным соотношением твердости опорных и рабочих валков широкополосного стана горячей прокатке следует считать диапазон 0,95–1.

#### **4.4 Определение величины износа бочки опорного валка**

Анализ результатов измерений радиального износа в 21-ой точке по длине бочки позволил предложить оценку величины износа в трех основных зонах А, Б и С с учетом верхнего и нижнего положений валков в клети. Для верхнего и нижнего положений валков определены зависимости средней величины износа на участках А, Б, С от прокатываемого тоннажа  $Q$ , тыс. т и номера клети чистовой группы. Эти зависимости имеют линейный характер. На рисунках 4.18 и 4.19 представлены зависимости величины износа по зонам бочки опорного валка, мм от прокатанного тоннажа  $Q$ , тыс. т. В большинстве случаев валки в нижнем положении характеризуются большим износом, в среднем на 10–20 % истирание бочки в нижнем больше, в сравнении с верхним положением. Во всех кампаниях опорных валков зона Б характеризуется максимальным износом.

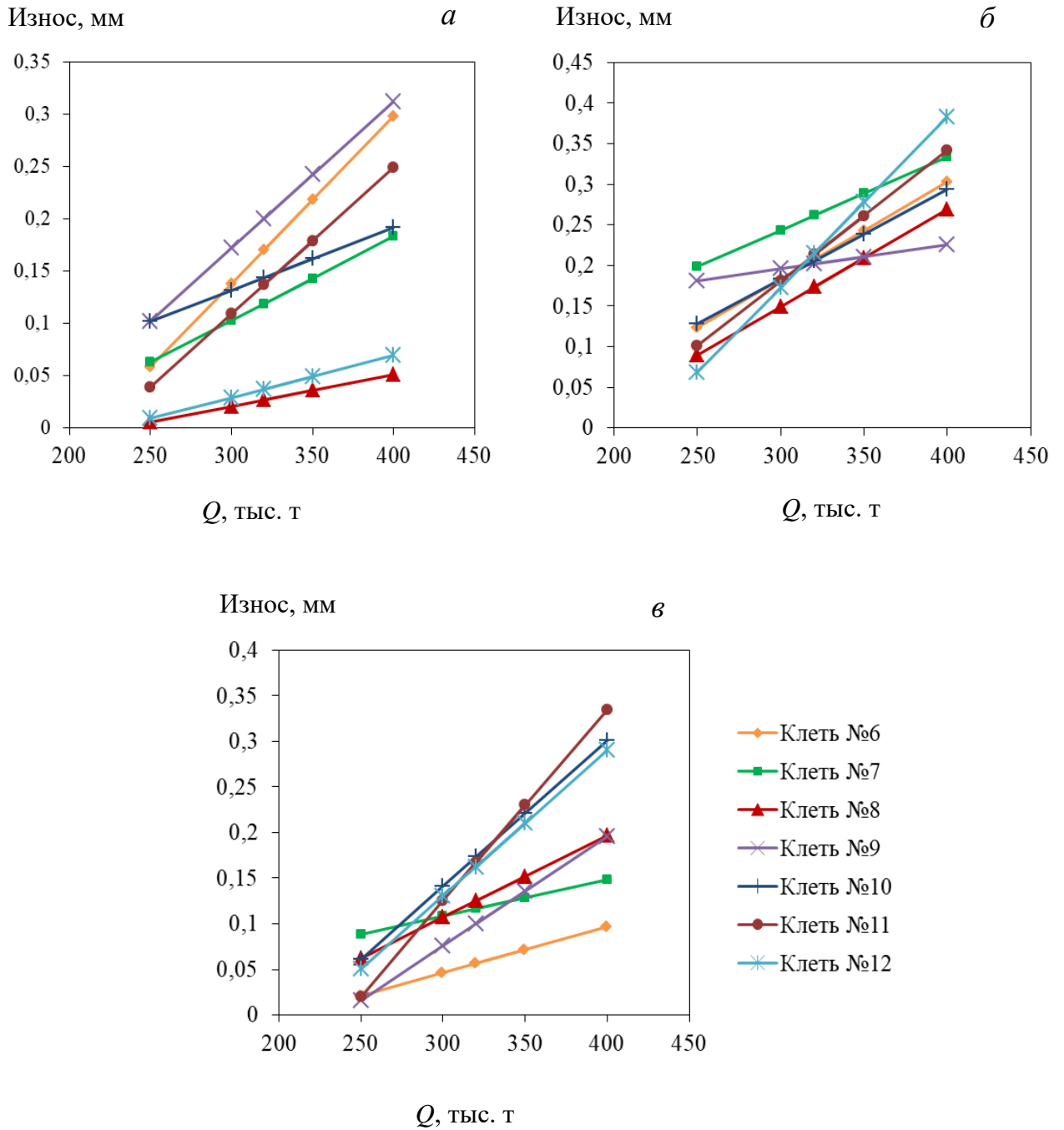


Рисунок 4.18 – Зависимости величины радиального износа по зонам бочки опорного вала в верхнем положении в клетях от прокатанного тоннажа  $Q$  и номера клетки:

$a$  – зона А;  $б$  – зона Б;  $в$  – зона С

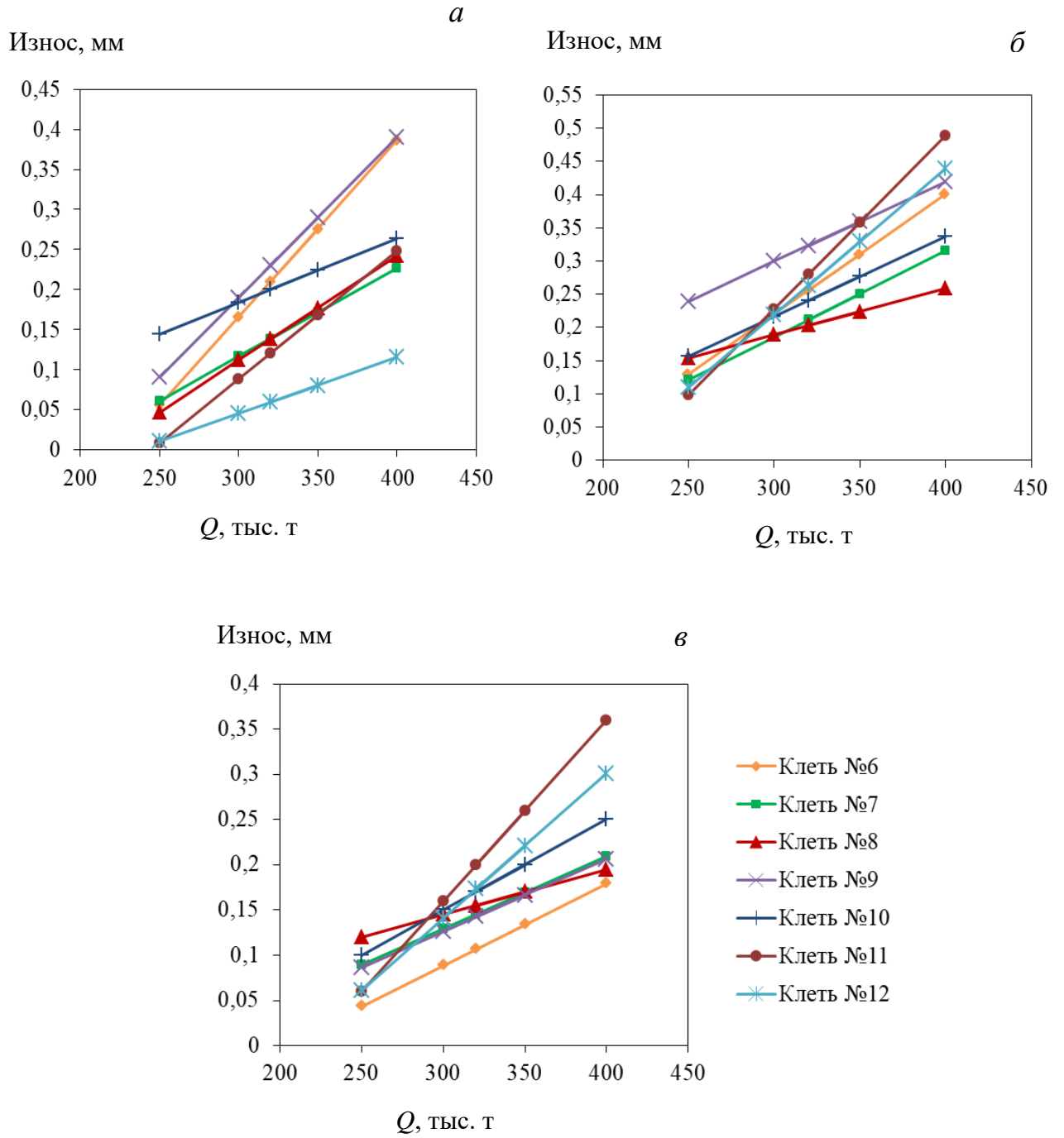


Рисунок 4.19 – Зависимости величины радиального износа по зонам бочки опорного вала в нижнем положении в клетях от прокатанного тоннажа  $Q$  и номера клетки:  
 а – зона А; б – зона Б; в – зона С

На основе построенных зависимостей величины радиального износа от прокатанного тоннажа создан алгоритм определения износа в трех зонах бочки в зависимости от верхнего или нижнего положения опорных валков чистой группы стана (рисунок 4.20). Сравнение расчетных значений износа с измеренными показало достигнутую точность прогнозирования не ниже 85 %.

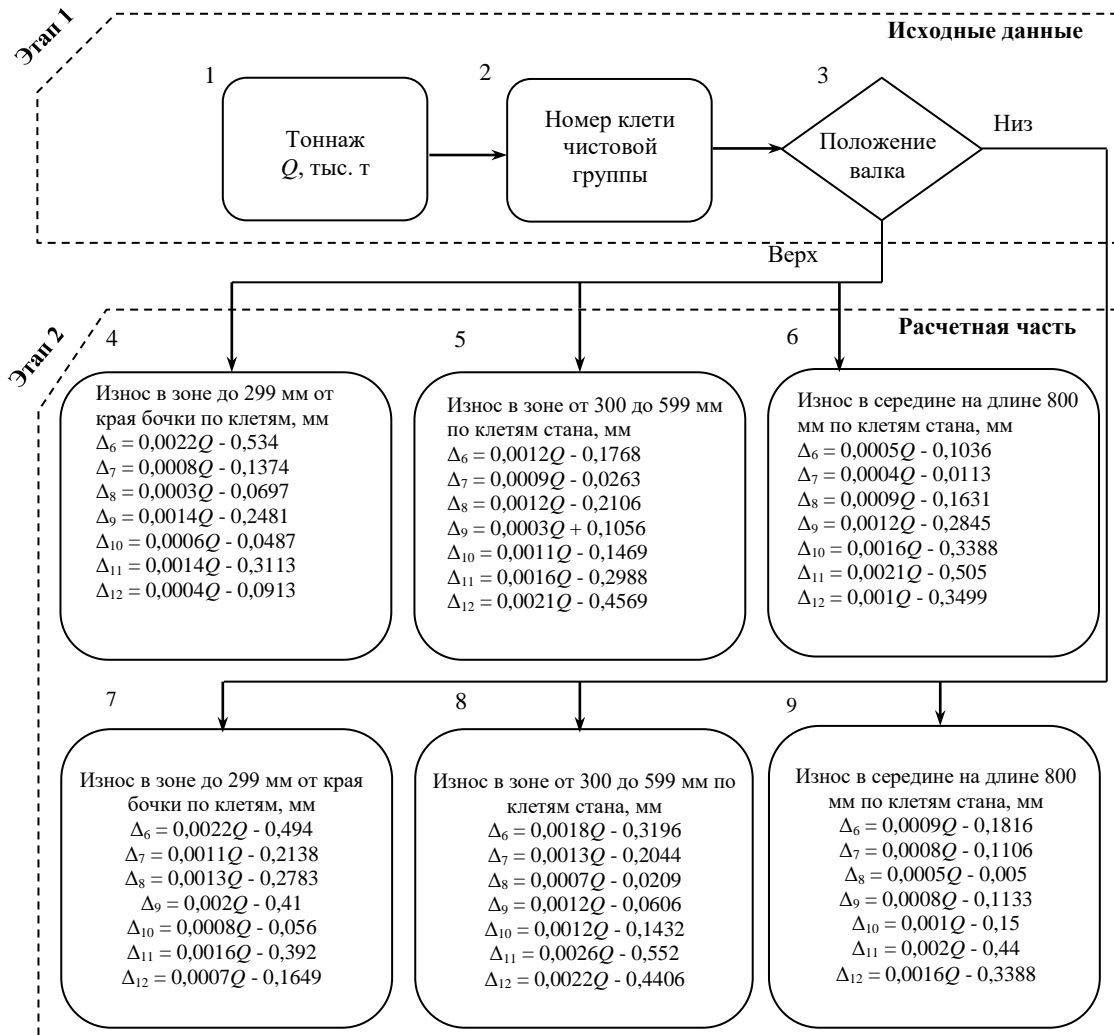


Рисунок 4.20 – Алгоритм определения износа в трех зонах бочки опорных валков чистой группы стана

Реализация алгоритмов оценки состояния рабочего поверхностного слоя опорного валка (рисунки 4.17 и 4.20), являющихся II и III частями

методологического подхода, представленного на рисунке 4.1, направлена на разработку и внедрение эффективных способов эксплуатации валковых систем непрерывного стана горячей прокатки, связанных с увеличением тоннажности кампаний опорных валков, снижением их расхода при перешлифовке и оценкой влияния на геометрические показатели прокатываемых полос.

#### **4.5. Новый способ определения величины съема металла при шлифовке опорных валков после прокатной кампании**

В рамках IV части комплексной стратегии оценки состояния рабочего поверхностного слоя опорного валка предложен новый способ определения величины съема при шлифовке после прокатной кампании, учитывающий интенсивность работы валков по клетям стана.

Для снижения расхода и своевременного удаления рабочего слоя опорного валка, подвергшегося значительному числу циклов нагружения, предложено новое техническое решение по определению величины съема за прокатную кампанию.

Нахождение числа циклов нагружения  $N_i$  или длины прокатанной полосы  $L_{\text{пи}}$  и  $q_i$  (формулы (4.1) – (4.3)) необходимо для определения комплексного коэффициента съема металла  $k_i$  для каждой клетки стана:

$$k_i = k_{N_i} \cdot k_{q_i} \text{ или } k_i = k_{L_{\text{пи}}} \cdot k_{q_i}, \quad (4.9)$$

где  $k_{N_i}$  – соотношение числа циклов нагружения  $N_i$   $i$ -ой клетки к числу циклов в базовой клетке  $N_{\text{баз}}$ ;  $k_{L_{\text{пи}}}$  – соотношение длины полосы  $L_{\text{пи}}$ , прокатанной в  $i$ -ой клетке, к длине полосы  $L_{\text{пбаз}}$ , прокатанной в базовой клетке непрерывного стана за прокатную кампанию и  $k_{q_i}$  – соотношение средней погонной нагрузки  $q_i$  в  $i$ -ой клетке к средней погонной нагрузке  $q_{\text{баз}}$  в самой нагруженной клетке непрерывного стана:

$$k_{Ni} = N_i / N_{\text{баз}} \text{ или } k_{L_{\text{пи}}} = L_{\text{пи}} / L_{\text{пбаз}}; k_{qi} = q_i / q_{\text{баз}}, \quad (4.10)$$

где  $N_{\text{баз}}$ ,  $L_{\text{пбаз}}$  и  $q_{\text{баз}}$  – число циклов нагружения опорного вала, длина прокатанной полосы и средняя погонная нагрузка в межвалковом контакте в базовой клетке, являющейся последней и/или предпоследней клетью стана с высоким числом циклов нагружения и прокатываемым километражом.

Для снятия поврежденного слоя опорных валков, эксплуатируемых в самых нагруженных клетях, необходимо и достаточно, как показала практика, величину съема при перешлифовках связывать с массой прокатываемого металла и выполнять за каждые прокатанные 80000 т металла 1 мм съема. В этом случае величина съема в базовой клетке составит:

$$\Delta_{\text{баз}} = \frac{Q}{Q_{\Delta 1\text{мм}}}, \quad (4.11)$$

где  $Q$  – масса прокатанного металла за кампанию, т;  $Q_{\Delta 1\text{мм}}$  – масса прокатанного металла, соответствующая 1 мм съема, т/мм.

Тогда величину съема при перешлифовке опорного вала  $\Delta_i$  после прокатной кампании в  $i$ -ой клетке определяют из выражения

$$\Delta_i = k_i \cdot \Delta_{\text{баз}}. \quad (4.12)$$

Различный съем по клетям стана при перешлифовке опорных валков на основе учета числа циклов нагружения или длины прокатанной полосы и средней погонной нагрузки в межвалковом контакте в каждой клетке непрерывного стана прокатной кампании приводит к существенному снижению расхода валков по клетям стана.

Новый способ поясняется примером эксплуатации опорных валков в чистовой группе стана 2000.

В клетки № 6–№ 12 стана устанавливают пары опорных валков с длиной бочек  $L_{\text{оп}} = 2000$  мм из марки стали AST70X, исходя из допустимых диапазонов

диаметров бочек для каждой клетки. Затем устанавливают рабочие валки и осуществляют горячую прокатку полос. После прокатки  $Q = 240$  тыс. т металла производят вывалку опорных валков из клеток и перешлифовку на вальцешлифовальном станке с дифференцированной величиной съема в зависимости от номера клетки, в которой был установлен валок. В таблице 4.8 приведены рассчитанные циклы нагружения  $N_i$  и значения средней погонной нагрузки в межвалковом контакте  $q_i$  в каждой клетке при прокатке  $m = 10$  127 полос по формулам (4.1) и (4.3) за прокатную кампанию по данным, фиксируемым автоматической системой измерения и контроля параметров прокатки.

Из таблицы 4.8 следует, что максимальной интенсивностью работы по числу циклов нагружения и средней погонной нагрузки в межвалковом контакте характеризуется клетка № 11, что подтверждается практикой работы стана, и она принимается в качестве базовой клетки.

Величина съема за перешлифовку опорных валков после работы в клетях стана № 11 и № 12 составляет:

$$\Delta_{\text{баз}} = \frac{240000}{80000} = 3,0 \text{ мм.}$$

Для нахождения комплексного коэффициента съема металла  $k_i$  используется максимальное значение  $N_i$  в клетке стана.

Для клетки № 6 расчетные коэффициенты получаются равными:

$$k_{N6} = N_6 / N_{11} = 0,26 / 1,39 = 0,19;$$

$$k_{q6} = q_6 / q_{11} = 1,13 / 0,74 = 1,53;$$

$$k_6 = k_{N6} \cdot k_{q6} = 0,19 \cdot 1,53 = 0,29.$$



Таблица 4.8 – Параметры эксплуатации опорных валков чистовой группы стана 2000

№ клетки / положение в клетки	Диаметр опорного валка $D_{опi}$ , мм	Число циклов нагрузки опорного валка $N_i \cdot 10^6$	Средняя погонная нагрузка в межвалковом контакте $q_i$ , т/мм
6В	1485,0	0,26	1,13
6Н	1589,0	0,25	
7В	1506,5	0,44	1,14
7Н	1510,5	0,44	
8В	1614,7	0,61	0,95
8Н	1528,5	0,64	
9В	1584,2	0,85	0,88
9Н	1504,0	0,90	
10В	1567,3	1,16	0,82
10Н	1542,1	1,18	
11В	1552,1	1,39	0,74
11Н	1576,3	1,37	
12В	1548,8	1,47	0,51
12Н	1508,9	1,51	

В – верх; Н – низ

Тогда величина съема при перешлифовке опорных валков после прокатной кампании в клетки № 6 составит:

$$\Delta_6 = k_6 \cdot \Delta_{баз} = 0,29 \cdot 3 = 0,87 \text{ мм.}$$

Аналогично определяется величина съема для остальных клеток № 7 – № 10 (таблица 4.9).

Перешлифованные опорные валки вновь устанавливаются в клетки чистовой группы непрерывного стана кварто 2000 и осуществляют горячую прокатку

полос. Периодические перевалки и перешлифовки опорных валков ведут до полной выработки рабочего слоя их бочек.

Таблица 4.9 – Расчетные коэффициенты  $k_N$  и  $k_q$ , комплексный коэффициент  $k$  кампании и величина съема  $\Delta$  при перешлифовке

№ клетки	$k_{Ni}$	$k_{qi}$	$k_i$	$\Delta_i$ , мм
6	0,19	1,53	0,29	0,87
7	0,32	1,54	0,49	1,47
8	0,46	1,28	0,59	1,06
9	0,65	1,19	0,77	2,31
10	0,85	1,11	0,94	2,82
11, 12	1	1	1	3,0

Данные опытной проверки эксплуатации опорного валка показывают, что последовательная установка в клетки № 6 – № 12 и использование предлагаемого способа позволяет гарантированно увеличивать наработку рабочего слоя не менее, чем на 10 % без увеличения степени наклепа и износа бочки, а также обеспечивать снижение расхода опорных валков в 1,2 раза с 0,089 кг/т до 0,074 кг/т.

Кроме того, анализ нового подхода к съему при шлифовке с учетом глубины залегания максимальных напряжений (рисунок 4.7, б) и числа циклов нагружения (таблица 4.1) по клетям стана показал очевидную эффективность, поскольку исключается установка в клетки валков, имеющих более  $4 \cdot 10^6$  циклов нагружения или с наработкой рабочего слоя более 19 тыс. км в сравнении с существующим способом съема, применяемом на стане и описанном в [168], что особенно важно при рассмотрении вопросов увеличения тоннажности кампаний опорных валков для повышения эффективности технологического процесса в части роста производительности, а также снижения издержек производства,

связанных с эксплуатацией прокатных валков. Новизна решения подтверждена патентом РФ на изобретение № 2795664.

Разработанный методологический подход к оценке рабочего слоя опорных валков может использоваться и на непрерывных станах холодной прокатки.

#### **Выводы по главе 4**

1. Разработаны принципы стратегии оценки параметров состояния поверхностного рабочего слоя опорного валка в клетки непрерывного стана, включающие анализ интенсивности работы опорного валка, величину приращения твердости бочки и износа по клетям непрерывного стана и определение величины съема после прокатной кампании, учитывающей особенности работы валка по клетям стана.

2. Интенсивность работы опорных валков за кампанию в клетки непрерывного стана предложено оценивать через число контактов с рабочим валком или длину прокатываемых полос в каждой клетке и погонную нагрузку, действующую на валки в межвалковом контакте. Экспериментально установлено, что число циклов нагружения и средняя погонная нагрузка в межвалковом контакте являются ключевыми факторами, характеризующими износ и приращение твердости бочек опорных валков за прокатную кампанию, и в процессе прокатки происходит различный износ бочек опорных валков и повышение их твердости по клетям непрерывного стана.

3. На основе обработки результатов численного эксперимента получена зависимость, описывающая влияние длины прокатанных полос и межвалковой нагрузки на приращение твердости бочки. Показано соответствие результатов численного и промышленного экспериментов.

4. Обоснована рекомендация для современной практики эксплуатации валков на широкополосном стане горячей прокатки по увеличению соотношения твердостей бочек опорного и рабочего валков до значений 0,95–1.

5. Разработан алгоритм определения износа в трех зонах бочки опорных валков чистовой группы по клетям стана от прокатанного тоннажа с точностью прогнозирования не менее 85 %. Установлено, что максимальный износ во всех кампаниях соответствует зоне кромок полос наибольшего прокатываемого объема.

6. Предложено новое техническое решение по определению величины съема при шлифовке опорного валка по актуальным данным со стана за прокатную кампанию в зависимости от интенсивности работы валка в клети. Решение направлено на снижение расхода валков и на своевременное удаление рабочего слоя, подвергшегося значительному числу циклов нагружения. Опытной проверкой доказано, что его использование позволяет гарантированно увеличивать наработку рабочего слоя не менее, чем на 10 % без увеличения степени наклепа и износа бочки, а также обеспечивать снижение расхода опорных валков в 1,2 раза.

**Глава 5. Исследование процесса формоизменения горячекатаных полос при правке в условиях циклической знакопеременной деформации для достижения новых возможностей улучшения плоскостности стальных полос**

**5.1 Численное описание процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации**

Процесс правки стальных горячекатаных полос в условиях многократного знакопеременного деформирования на роликовых правильных машинах направлен на минимизацию дефектов неплоскостности при прохождении полосы между двумя рядами роликов (рисунок 5.1).

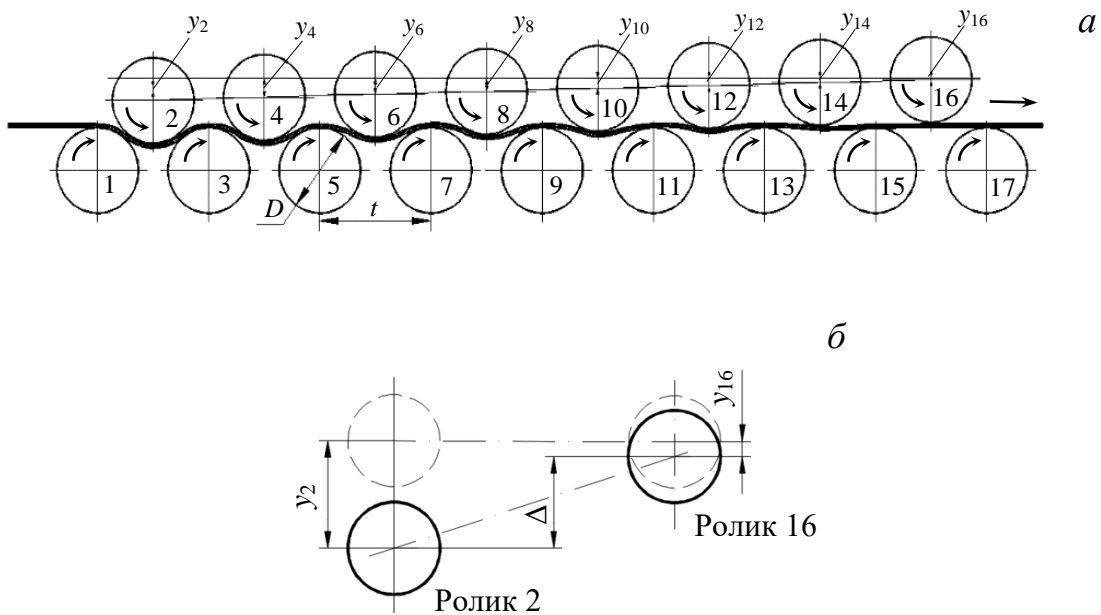


Рисунок 5.1 – Схема 17-роликовой правильной машины:

$y_2 \dots y_{16}$  – смещения осей верхних роликов по вертикали;

$D$  – диаметр роликов;  $t$  – шаг роликов – (а); схема к определению разницы перемещений по вертикали

первого и последнего роликов верхней кассеты  $\Delta$  – (б)

Наклон верхнего ряда роликов определяет величину переменного воздействия растягивающих и сжимающих усилий на внешние волокна полосы и характеризуется величиной  $\Delta$ , рассчитываемой как разность перемещений по вертикали первого и последнего роликов верхней кассеты. Для 17-роликовой РПМ (рисунок 5.1)  $\Delta = y_2 - y_{16}$ .

Моделирование процесса правки было реализовано в 2D-постановке с применением системы конечно-элементного анализа SIMULIA Abaqus для широкого диапазона полос толщиной 3–10 мм разных категорий прочности в РПМ с числом роликов  $n = 13–19$ , диаметром роликов  $D = 50–110$  мм и величиной, характеризующей наклон верхней кассеты роликов  $\Delta = 1,5–7$  мм. При этом учитывалось, что минимальный шаг роликов составляет  $t = 1,1D$ . Между верхними и нижними роликами была размещена упругопластическая модель полосы общей длиной 3000 мм с участком на входе в РПМ длиной 700 мм с 36-ю элементами по толщине, на остальной части модель полосы была сформирована из 4-х элементов по толщине. На рисунке 5.2 показан пример настройки конечно-элементной модели правки горячекатаной полосы в 17-роликовой правильной машине.

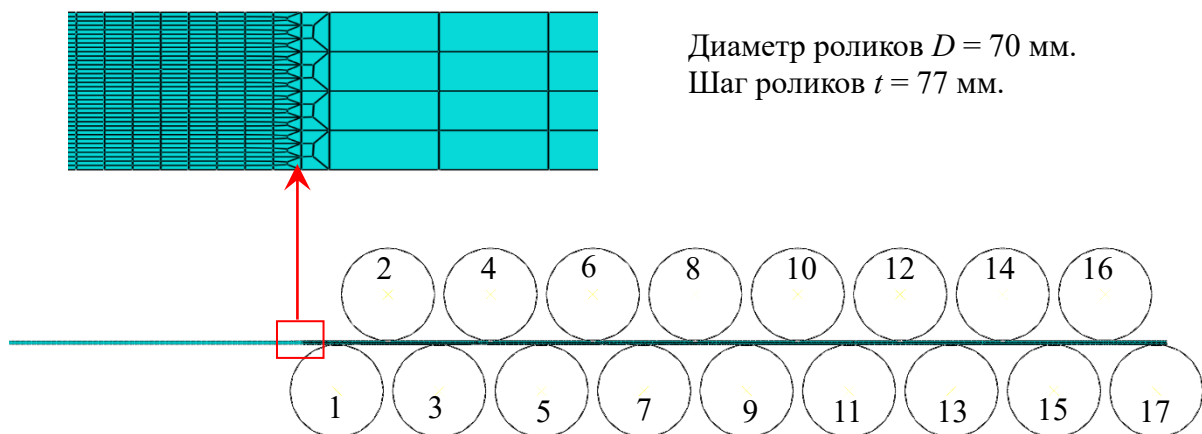


Рисунок 5.2 – Настройка конечно-элементной модели правки полосы в 17-роликовой правильной машине

В качестве материала полосы рассматривались марки стали – сталь 3 и 09Г2С и их аналоги S235MC и S355MC, как наиболее подходящие для всех видов резки, включая лазерную. Их свойства получены при испытаниях образцов, отобранных непосредственно после прокатки на непрерывном широкополосном стане 2000 ПАО «Северсталь», на растяжение (рисунок 5.3) и при циклическом нагружении «растяжение – сжатие» со степенью деформации до 2 % (рисунок 5.4) по стандартным методикам с использованием универсальной испытательной машины Galdabini Quasar 50. Химический состав исследуемых сталей приведен в таблице 5.1, а механические характеристики – в таблице 5.2.

Также в расчете использовались следующие механические характеристики полосы: плотность  $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$ ; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ ; модуль упругости 1-го рода  $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ .

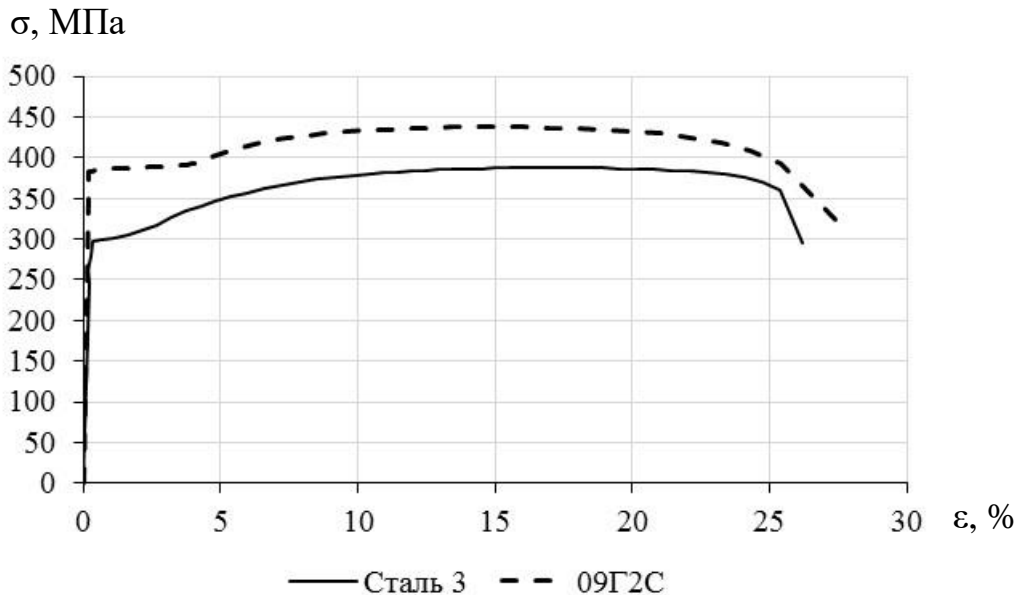


Рисунок 5.3 – Диаграммы растяжения образцов из марок стали 3 и 09Г2С

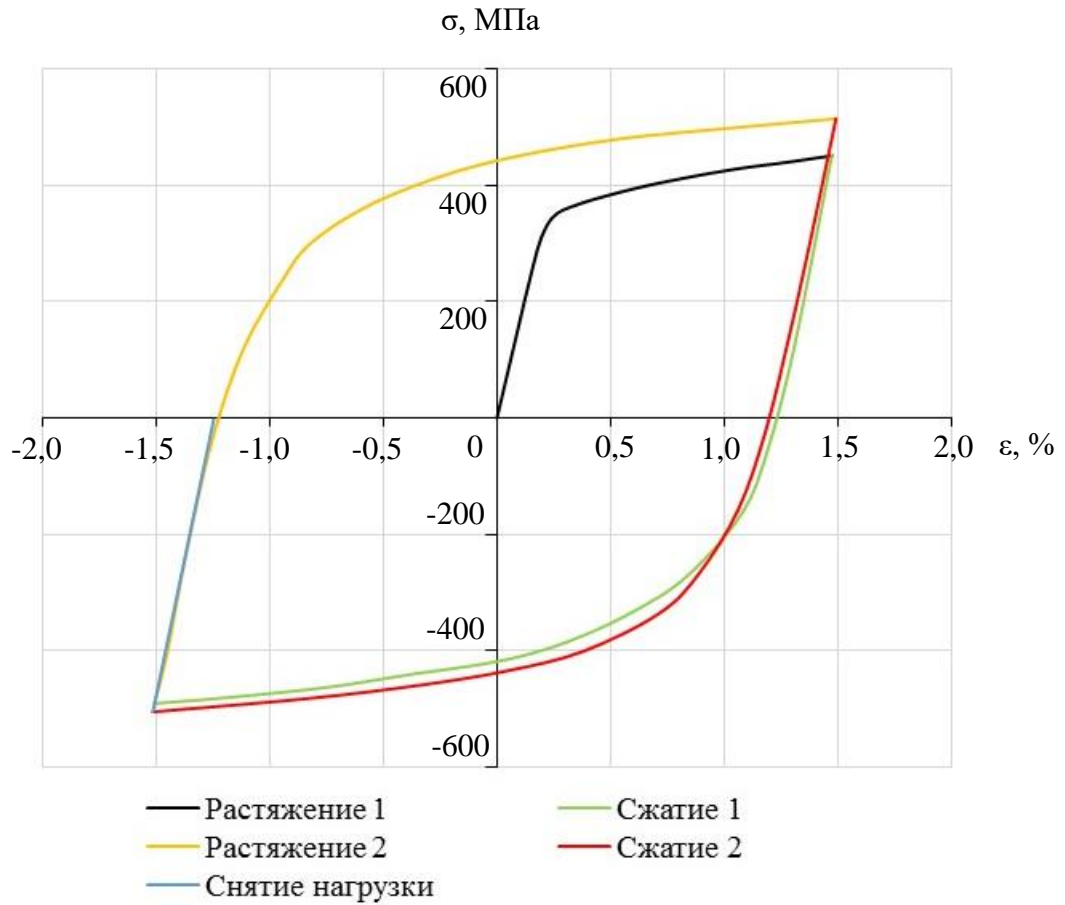


Рисунок 5.4 – Диаграмма знакопеременного деформирования образца из марки стали 09Г2С

Таблица 5.1 – Химический состав сталей

Марка стали	Стандарт	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu	V	Nb	Ti
S235MC	EN 10025-2	до 0,17	-	до 1,4	-	до 0,045	до 0,045	-	до 0,009	-	-	-	-
S355MC*	EN 10025-2	до 0,12	до 0,5	до 1,5		до 0,02	до 0,025	-	до 0,008	-	до 0,2	до 0,09	до 0,15
Ст3	ГОСТ 380	0,14 - 0,22	0,15 - 0,3	0,4 - 0,65	до 0,3	до 0,05	до 0,04	до 0,3	до 0,008	до 0,3	-	-	-
09Г2С	ГОСТ 19281	до 0,12	0,5 - 0,8	1,3 - 1,7	до 0,3	до 0,04	до 0,035	до 0,3	до 0,008	до 0,3	-	-	-

\* Nb + V + Ti < 0,22%



Таблица 5.2 – Механические характеристики горячекатаных полос

Марка стали	Стандарт	Толщина, мм	Предел текучести (min), МПа	Предел прочности (min – max), МПа	Относительное удлинение, %
S235MC	EN 10025-2	3,0 – 15,0	235	360 – 510	24
S355MC	EN 10025-2	3,0 – 10,0	355	430 – 550	23
Ст3	ГОСТ 380	До 20	235	360 – 460	26
09Г2С	ГОСТ 19281	До 20	355	430 – 550	20

Далее выполнялось перемещение верхних роликов вниз в рабочее положение с обеспечением заданной величины  $\Delta$ . При этом перемещение  $i$ -го ролика верхней кассеты при известных значениях перемещений  $y_2$  и  $y_{n-1}$  определялось из уравнения:

$$y_i = y_2 - [(n_{\text{верх}i} - 1)t] \frac{y_2 - y_{n-1}}{(n_{\text{верх}} - 1)t}, \quad (5.1)$$

где  $n_{\text{верх}}$  – число роликов верхней кассеты РПМ;  $n_{\text{верх}i}$  – номер  $i$ -го ролика верхней кассеты;  $t$  – шаг роликов.

Для моделирования движения полосы за счет сил трения между ней и роликами задавалась скорость вращения роликов. Скорость правки для всех вариантов принималась равной 1 м/с, что соответствует средней скорости процесса для различных РПМ, осуществляющих правку рассматриваемого сортамента. Коэффициент трения был равен 0,12, что соответствует рекомендациям [193, 194]. Оценка напряженного состояния после правки выполнялась с учетом упругой разгрузки материала полосы.

Адекватность результатов моделирования оценивалась путем сравнения относительных продольных деформаций и усилий, действующих на ролики,

полученных расчетным методом и измеренных в результате эксперимента на лабораторной 13-роликовой правильной машине инженерами фирмы Fagor Arrasate [219], погрешности расчета не превысили 1,2 % и 10 % соответственно.

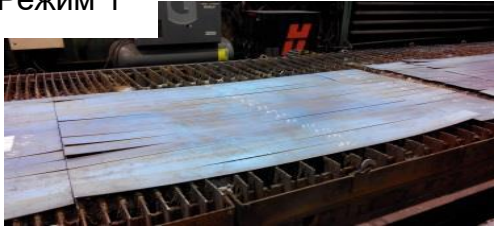
Анализ имеющегося большого числа методов определения остаточных напряжений, включая механические (разрезание, высверливание отверстий в материале с определением измерений по показателям тензометров) и физические (рентгеновский, ультразвуковой, электромагнитный и др.) [261–267], показал, что измерить остаточные напряжения, как по толщине, так и всему объему стального тонкого широкого листа, учитывая их высокую трудоемкость и сложность, не представляется возможным. В этом случае остается сравнение результатов моделирования полей напряжений и деформаций полосы при правке и после правки с результатами деформаций листов после резки высокотехнологичными методами с оценкой того, был ли горячекатаный лист должным образом «освобожден» от остаточных напряжений после правки.

Для изучения влияния параметров процесса правки на изгиб листов после высокотехнологичной резки, был выполнен промышленный эксперимент, включающий правку горячекатаной полосы толщиной 3 мм и шириной 1500 мм из стали S355MC на 15-роликовой правильной машине фирмы LDM, установленной в агрегате поперечной резки № 3 ПАО «Северсталь», а также отбор листов и их порезку на машинах плазменной резки SatroniK LS3000 машиностроительного центра «СММ-Тяжмаш» и установке лазерной резки BYSPRINT 3015 на энергомашиностроительном предприятии ООО «Электросила» (г. Санкт-Петербург). В промышленном эксперименте было отобрано по четыре листа размерами 3x1500x3000 мм на каждый вид резки.

Измерение отклонений от плоскостности листов после правки производилось на контрольной плите, а также фиксировались значения в системе контроля данных технологического процесса правки. Отклонения полосок от плоскостности после резки листов определялись согласно разработанной методике, включающей порезку листа на продольные полоски шириной 100 мм,

отрезку участков длиной не менее 500 мм по краям полосок для исключения влияния механического реза после правки и определение величины фактического изгиба каждой полоски длиной 2000 мм. Наличие хотя бы одной полоски с неплоскостностью более 20 мм после лазерной или плазменной резки приводит к отбраковке листа по плоскостности. На рисунке 5.5 показаны результаты плазменной порезки листов.

Режим 1



Режим 3



Режим 2



Режим 4



Рисунок 5.5 – Отклонения полосок от плоскостности  
после плазменной резки

Выбранные четыре режима правки, отличающиеся величиной наклона верхней кассеты роликов, характеризующейся  $\Delta = y_2 - y_{14}$ , а также полученные при моделировании максимальные напряжения и результаты измерений отклонений полосок после двух видов резки представлены в таблице 5.3. Скорость правки  $v$  составляла 1,0 м/с.

Таблица 5.3 – Значения перемещений верхних роликов вниз при правке в 15-роликовой РПМ и результаты моделирования напряжений и измерений отклонений полосок после плазменной резки

№ режима	Перемещения роликов, мм							$\Delta$ , мм	$\sigma_{\max}$ , МПа	Число полосок, имеющих отклонения более 5 мм		Максимальное отклонение полосок, мм	
	$y_2$	$y_4$	$y_6$	$y_8$	$y_{10}$	$y_{12}$	$y_{14}$			Плазменная резка	Лазерная резка	Плазменная резка	Лазерная резка
1	4,0	3,83	3,67	3,5	3,3	3,17	3,0	1	297	9	6	45	80
2	4,5	4,25	4,0	3,75	3,5	3,25	3,0	1,5	294	8	4	40	57
3	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	3	284	1	2	35	7
4	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	0	305	10	-	100	-

Стоит отметить, что резка лазером листа, прошедшего правку по режиму № 4, была прекращена досрочно для предотвращения повреждения машины из-за сильного изгиба полосок. Результаты измерений после лазерной резки подтвердили выводы, сделанные после раскроя плазмой: наименьшие отклонения полосок от плоскостности имели листы, прошедшие правку по режиму с максимальным перемещением первого верхнего ролика и наименьшим значением перемещения последнего верхнего ролика. По результатам моделирования этому варианту соответствовало минимальное отклонение напряжений по толщине в сравнении с другими вариантами.

Полученные результаты показали возможность и перспективность изучения закономерностей отклонений от плоскостности горячекатаных листов при раскрое в зависимости от режимов правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации на основе компьютерного моделирования процесса в среде конечно-элементного анализа.

## 5.2 Исследование механизма возникновения остаточных напряжений при правке

В самом общем виде задача правки может быть сведена к решению вопроса трехточечного изгиба полосы цилиндрическими роликами (рисунок 5.6) [268,

269]. Изгибу подвергался фрагмент полосы толщиной  $h = 4$  мм и длиной, равной шагу  $t$  между роликами 1 и 3 нижнего ряда. На торцах полосы были зафиксированы от перемещений по горизонтали и вертикали точки в середине ее толщины. Перемещение верхнего ролика 2 вниз составляло 5 мм.

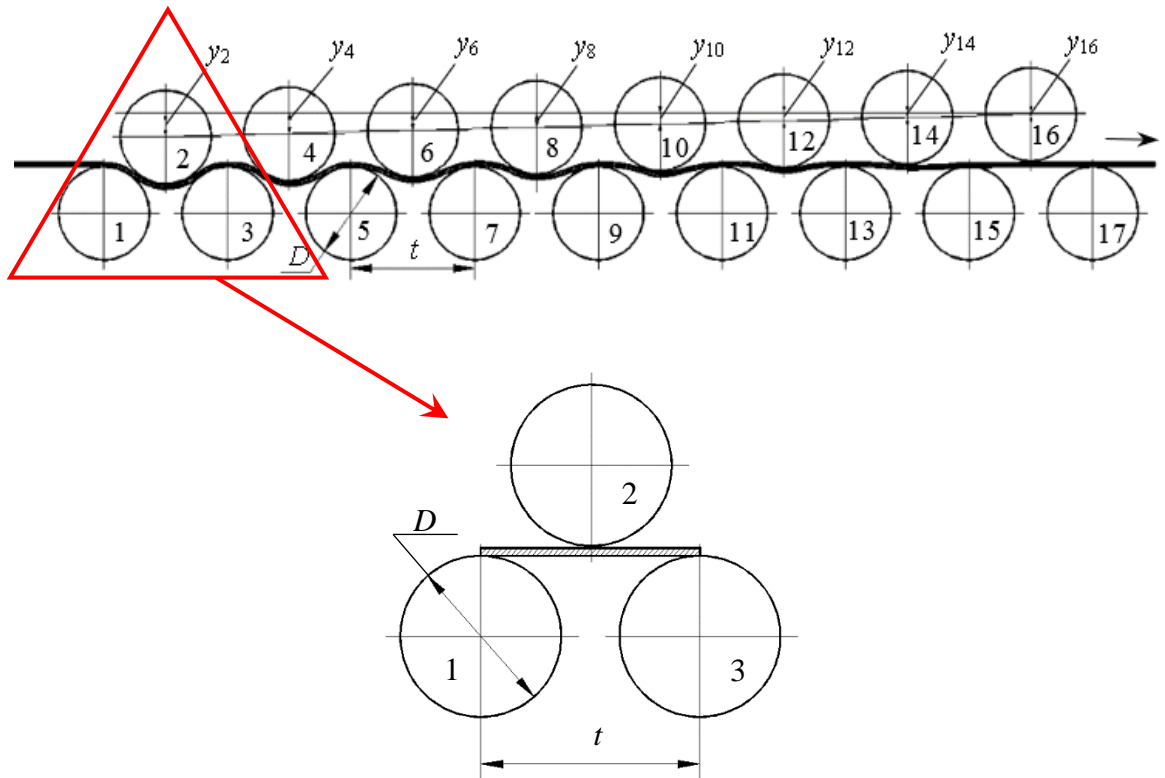


Рисунок 5.6 – Схема к моделированию изгиба полосы в трех роликах

Результаты моделирования (рисунок 5.7) показали, что при изгибе полосы при крайнем нижнем положении верхнего ролика (график 1) наружные слои металла подвергнуты упругопластическому деформированию, причем продольные напряжения в верхнем слое сжимающие, а в нижнем – растягивающие. В средней части наблюдается участок с упругими деформациями.

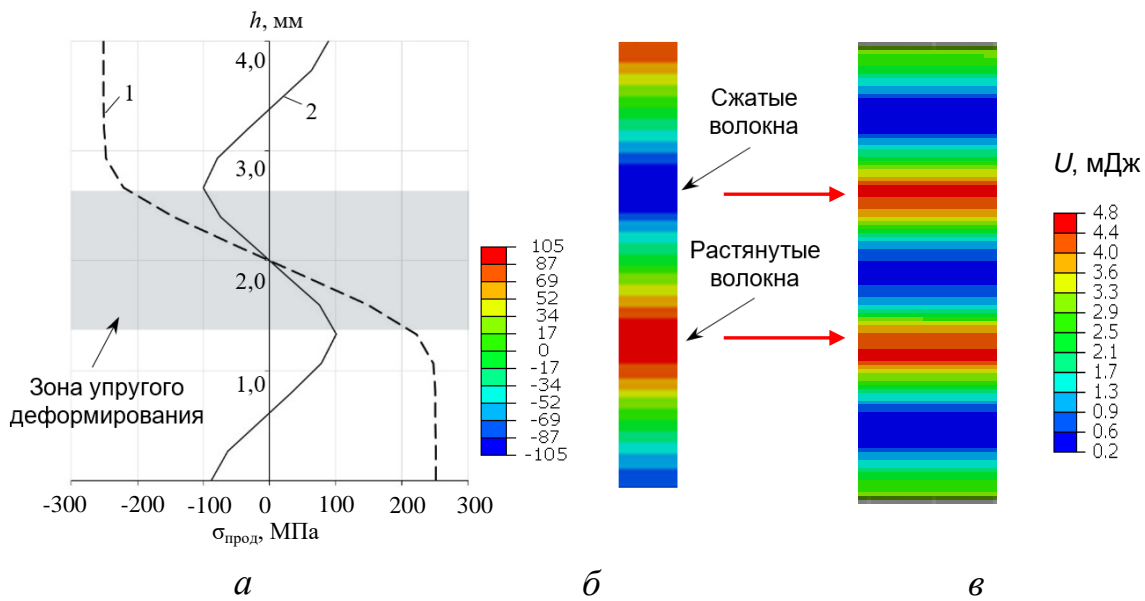


Рисунок 5.7 – Графики изменения продольных напряжений по толщине полосы: 1 – под нагрузкой; 2 – после упругой разгрузки (а) с фрагментом поля напряжений после упругой разгрузки (б) и распределение потенциальной энергии по толщине полосы после разгрузки (в)

При снятии внешнего воздействия происходит упругая разгрузка материала полосы, сопровождающаяся релаксацией напряжений в приповерхностных областях проката (график 2) с областью «стесненных» упругих напряжений в центральной части сечения полосы. Поскольку необратимые пластические деформации локализованы в приповерхностных слоях проката, то при разгрузке эти слои препятствуют высвобождению накопленной потенциальной энергии упругой деформации, что подтверждает распределение потенциальной энергии после разгрузки, представленное на рисунке 5.7, в. Максимальные значения соответствуют слоям, располагающимся на высоте от 1,1 до 1,4 мм от поверхности, что соответствует зонам сжатых и растянутых волокон, показанных на рисунке 5.7, б. Наличие стесненной потенциальной энергии приводит к

возникновению остаточных напряжений. После снятия внешней нагрузки происходит перераспределение внутренних напряжений. В верхней части полосы формируются остаточные растягивающие напряжения, в нижней – сжимающие (рисунок 5.7, а), эти напряжения уравниваются упругими напряжениями центральной части полосы.

По результатам моделирования был построен график изменения потенциальной энергии  $U$ , полученной суммированием всех значений по толщине полосы, в зависимости от условного времени процесса  $\tau$  (рисунок 5.8).

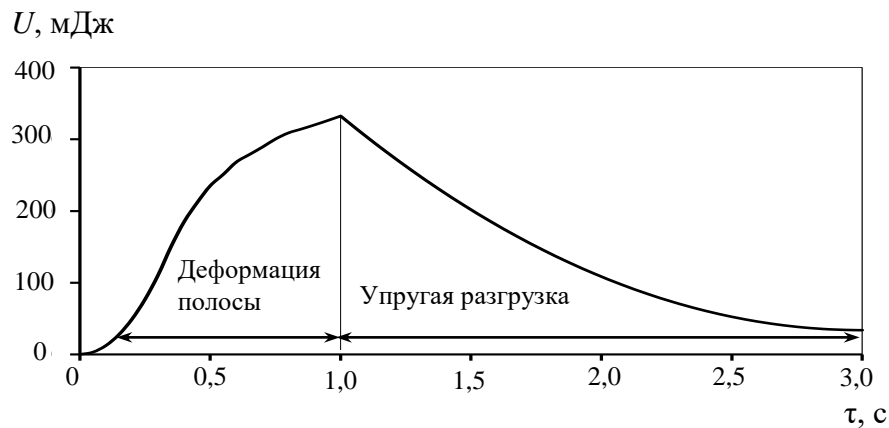


Рисунок 5.8 – Изменение потенциальной энергии в зависимости от времени процесса

При нагружении происходит накопление потенциальной 333 мДж, при выходе из контакта она расходуется на восстановление первоначального недеформированного состояния. При этом наблюдается не полное высвобождение накопленной потенциальной энергии – остаточная энергия составляет 10 % от максимального уровня. Остаточная потенциальная энергия является частью потенциальной энергии, которая не высвободилась и не превратилась в кинетическую из-за пластических деформаций, локализованных в поверхностных слоях металла, являющихся препятствием по высвобождению этой энергии. Эта «стесненная» потенциальная энергия при дальнейшей обработке, например при

резке листа лазером или плазмой, может высвобождаться и вызывать отклонения от плоскостности получаемых деталей.

Все изложенное позволило сделать вывод, что механизм возникновения остаточных напряжений при правке обусловлен величиной пластической деформации и неоднородностью распределения упругих и пластических деформаций по толщине.

### **5.3 Исследование напряженно-деформированного состояния полос при правке**

Исследование выполнено при правке горячекатаной полосы толщиной 3 мм в 17-роликовой правильной машине (рисунок 5.9) со скоростью  $v = 1$  м/с для варианта перемещений верхних роликов  $y_2 = 6$  мм и  $y_{16} = 3$  мм, диаметры роликов  $D = 70$  мм и шаг роликов  $t = 77$  мм. Марки стали двух категорий прочности – S235MC и S355MC рассматривались в качестве материала полосы [270–272].

Фрагмент распределений продольных напряжений по толщине горячекатаной полосы из стали S235MC при ее прохождении между тремя последними роликами представлен на рисунке 5.9. Видно, что под последним верхним роликом № 16 верхние волокна полосы сжимаются, а нижние – растягиваются.

Для сопоставления напряженного состояния полос из сталей различной категории прочности были построены графики распределений продольных напряжений в поперечном сечении полосы (рисунок 5.10) на выходе из РПМ в контакте с роликом № 16 – (а) и после упругой разгрузки – (б). Упругая разгрузка материала полосы после правки приводит к снижению и перераспределению внутренних напряжений. После упругой разгрузки они уменьшаются в 1,5 раза, а с ростом прочностных характеристик полосы увеличивается величина отклонения напряжений. Также можно констатировать отсутствие смещения нейтральной



линии по толщине полосы при правке, в середине толщины полосы продольные напряжения равны нулю, как при правке, так и при упругой разгрузке.

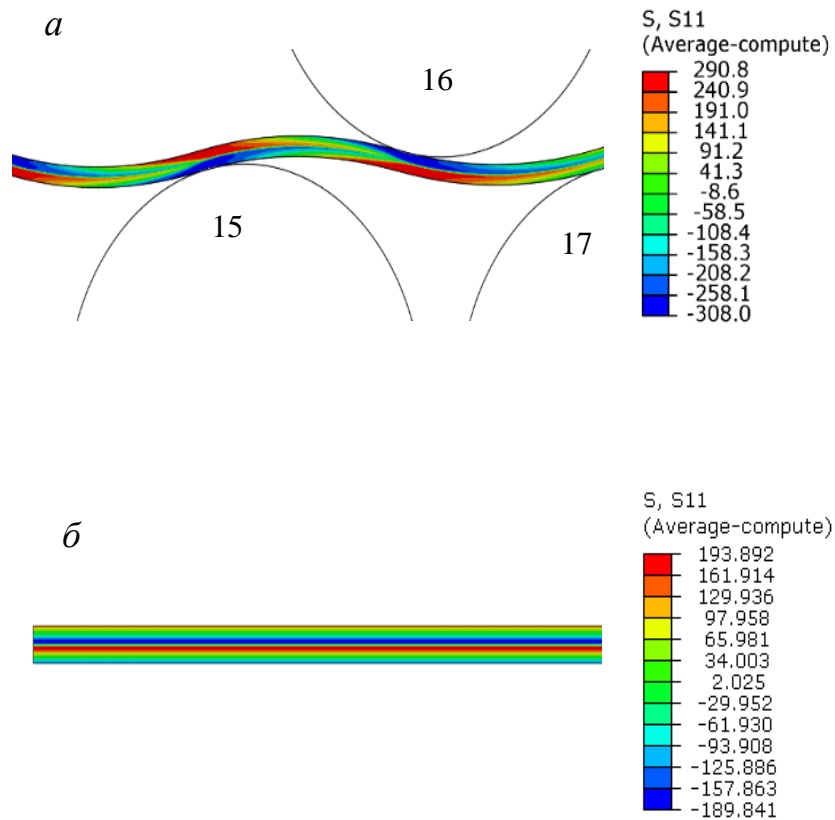


Рисунок 5.9 – Распределение продольных напряжений по толщине полосы из марки стали S235MC: *а* – на выходе РПМ; *б* – после упругой разгрузки

Распределение напряжений после правки, что подтверждается многовариантным моделированием процесса в различных РПМ, характеризуется тем, что на верхней поверхности листа остаются растягивающие продольные остаточные напряжения, на нижней – сжимающие, в середине по толщине они

равны нулю, в остальных частях сечения значения напряжений противоположны по знаку.

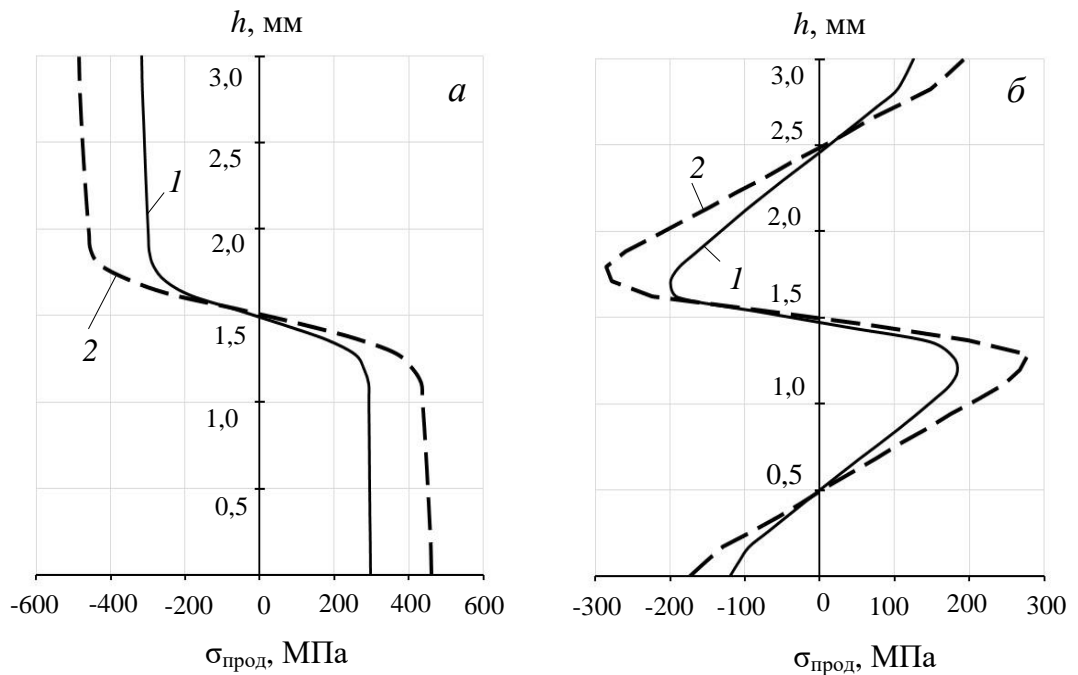


Рисунок 5.10 – Распределения продольных напряжений по толщине полосы из сталей 1 – S235MC; 2 – S355MC: а – под роликом № 16; б – после правки с упругой разгрузкой

Для устранения дефектов неплоскостности и эффективного снижения остаточных напряжений процесс правки должен обеспечивать высокий коэффициент проникновения пластической деформации – формула (1.10).

Для оценки пластификации или процента толщины полосы, достигшего условного предела текучести материала полосы  $\sigma_{0,2}$ , были построены графики изменения продольной пластической деформации  $\varepsilon$  (рисунок 5.11). Оба графика иллюстрируют изменение деформации верхней точки на поверхности полосы за время правки  $\tau$ . Цифрами от 2 до 16 обозначены контакты с роликами. Отрицательные пиковые значения пластических продольных деформаций верхнего слоя полосы соответствуют сжимающим в контакте с верхними

роликами, а положительные пиковые значения продольных деформаций – растягивающим напряжениям в контакте с нижними роликами. На деформацию не оказывают влияния крайние нижние ролики № 1 и № 17. Из графиков видно, что при правке более прочной полосы из марки стали S355MC сжимающие и растягивающие деформации примерно равны, а для марки стали S235MC положительные деформации больше отрицательных. Разница в деформациях обусловлена лишь различием диаграмм знакопеременного деформирования – при циклическом упрочнении-разупрочнении более мягкой стали S235MC, в сравнении с S355MC, происходит большее упрочнение стали S235MC при сжатии, а при растяжении она лучше разупрочняется.

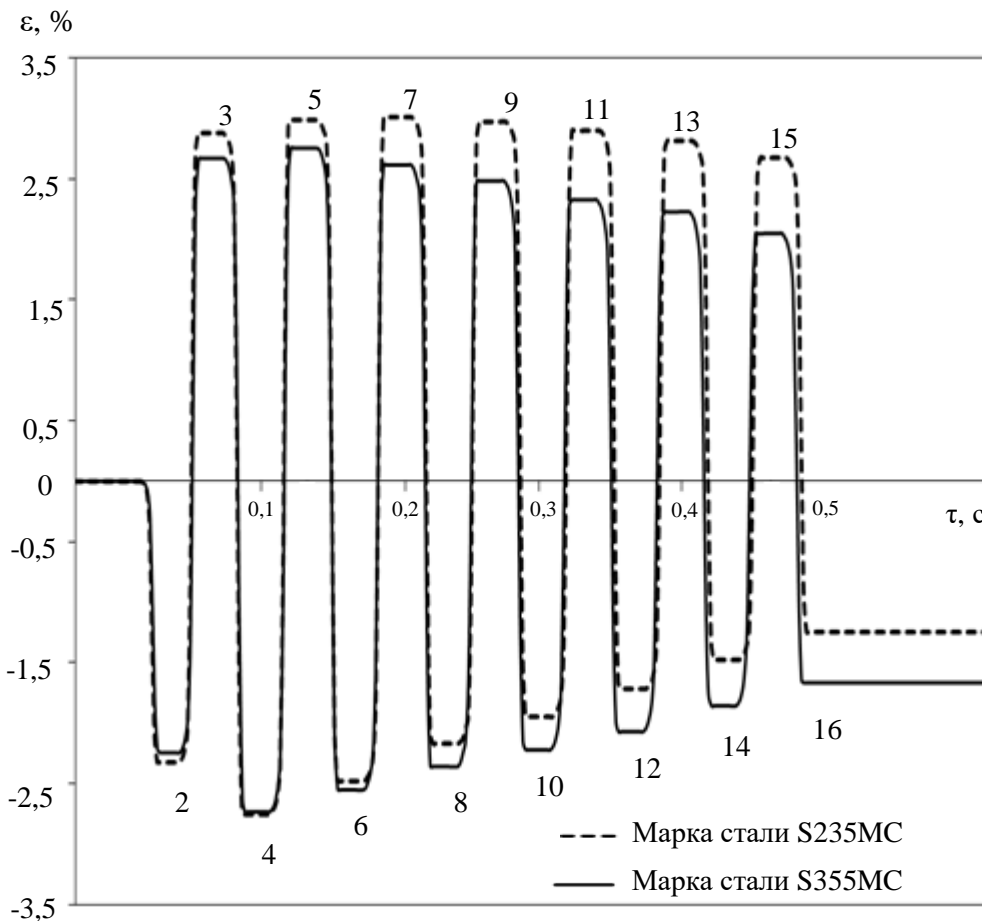


Рисунок 5.11 – Относительные продольные пластические деформации верхнего поверхностного волокна при правке

В контакте с роликами № 5 и № 7 при правке полосы из марки стали S235MC фиксируются максимальные деформации  $\varepsilon_{\max}$ , равные 3,02 %, в контакте с роликом № 5 максимальные деформации отмечаются при правке полосы из марки стали S355MC ( $\varepsilon_{\max} = 2,75$  %).

Анализ результатов моделирования продольных деформаций позволил предложить новую формулу оценки коэффициента проникновения пластической деформации по толщине полосы при правке:

$$k_{pl} = \left( 1 - \frac{\varepsilon_{0,2}}{\varepsilon_{\max}} \right) \cdot 100 \%, \quad (5.2)$$

где  $\varepsilon_{0,2}$  – относительная деформация, соответствующая условному пределу текучести материала полосы;  $\varepsilon_{\max}$  – максимальная относительная деформация полосы при правке, определяемая на основе моделирования.

В этом случае при правке полосы из марки стали S235MC уровень пластификации в начале процесса составил  $k_{pl} = 93,4$  %, а полосы из марки стали S355MC –  $k_{pl} = 92,7$  %. При правке в последующих роликах, начиная с ролика № 8, наблюдается уменьшение деформации полосы. При этом в контакте с верхним последним роликом № 16 деформирование верхних волокон  $\varepsilon_k$  составляет 1,24 % и 1,67 % соответственно для сталей S235MC и S355MC.

Полученные результаты показали, что одинаковые параметры процесса правки полос разных категорий прочности приводят к разным значениям относительных продольных деформаций и различным отклонениям напряжений по толщине.

Для оценки потенциальной энергии были построены графики ее изменения в зависимости от времени процесса (рисунок 5.12). Цифрами от 2 до 16 обозначены контакты с роликами. Рост потенциальной энергии наблюдается в контакте с роликами, а ее уменьшение – при выходе полосы из контакта с роликами. При одних и тех же параметрах правки возрастает потенциальная энергия с ростом прочности полосы. Из графиков видно, что после правки в

прокате из марки стали S355MC остается накопленная потенциальная энергия 0,52 Дж, что в 1,8 раза больше, чем после правки полосы из стали S235MC.

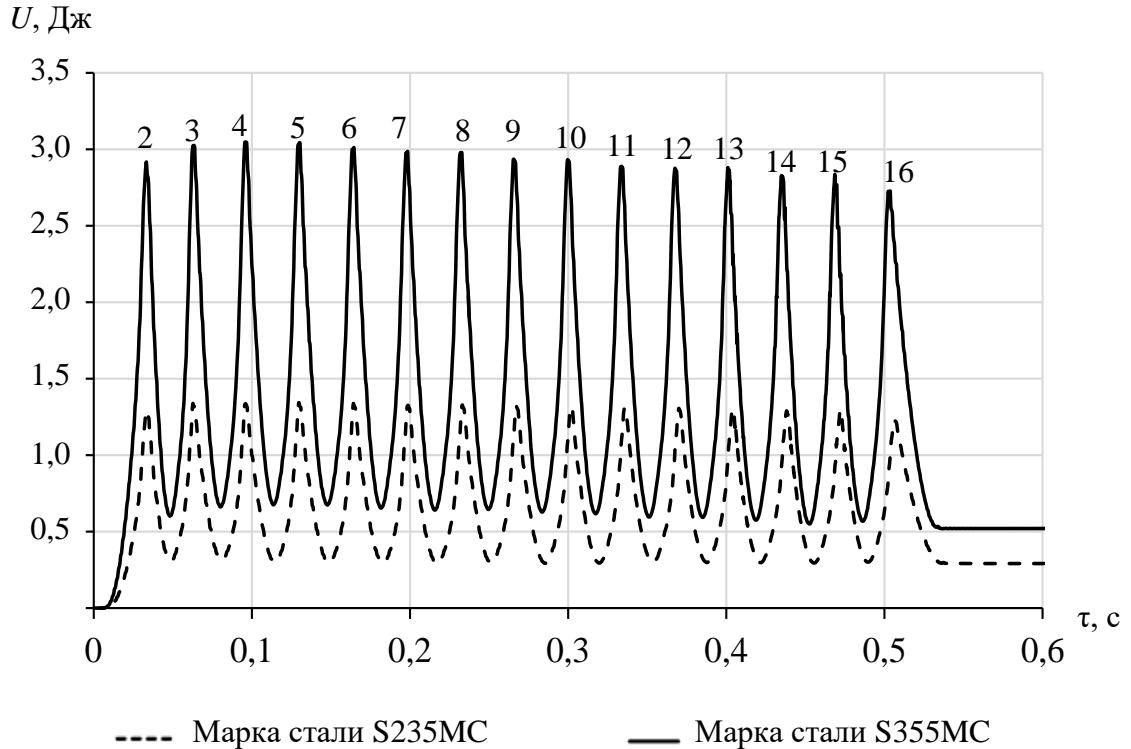


Рисунок 5.12 – Изменение потенциальной энергии при правке

Исследование процесса правки на основе моделирования позволило ввести новые показатели, влияющие на плоскостность листов при раскросе высокотехнологичными методами:

- уровень остаточных продольных напряжений по толщине листа  $\sigma_{\text{прод}}$ , МПа;
- коэффициент проникновения пластической деформации по толщине полосы  $k_{pl}$ , %, характеризующий процент толщины, достигший предела текучести;
- относительные пластические деформации при правке в начале процесса  $\varepsilon_{\text{н}}$  и в конце  $\varepsilon_{\text{к}}$ , %;

– остаточная потенциальная энергия правки  $U$ , Дж.

## **5.4 Исследование влияния параметров правки знакопеременным изгибом на неоднородность распределения деформаций и напряжений по толщине горячекатаных полос**

### 5.4.1 Влияние технологических параметров правки

Раскрытие механизма возникновения остаточных напряжений показало, что чем больше проработка металла по толщине в начале процесса правки на РПМ, тем меньше в полосе аккумулируется невысвобожденной потенциальной энергии упругой деформации и меньше уровень остаточных напряжений. Для установления закономерностей влияния технологических параметров правки на неоднородность распределения деформаций и напряжений по толщине металла и обеспечения сохранения плоскостности стальной листовой продукции после обработки высокотехнологичными методами была выполнена серия численных экспериментов [273]. Исследовалось влияние величины  $\Delta$ , характеризующей наклон верхней кассеты роликов, на коэффициент проникновения пластической деформации по толщине стальных полос и относительную деформацию полосы при правке.

Результаты расчета коэффициента проникновения пластической деформации  $k_{pl}$  при правке горячекатаных полос толщиной 3 мм из марок сталей 3 и 09Г2С в 15- и 17-роликовых правильных машинах с вариантами наклона верхней кассеты  $\Delta$  в диапазоне от 1,5 мм до 7 мм при скорости правки 1 м/с (рисунок 5.13) показали, что с ростом числа роликов и снижением предела текучести материала при одних и тех же параметрах правки уровень пластификации в 17-роликовой РПМ выше в сравнении с 15-роликовой.

С увеличением наклона верхней кассеты уровень пластификации по толщине полосы может возрастать до 89–91 % в 15-роликовой машине и до 91–93

% в 17-роликовой машине. Увеличение значений перемещений роликов на 2 мм при одинаковых значениях наклона верхней кассеты приводит к росту уровня пластификации на 25 % при  $\Delta = 1,5$  мм, как в 15-роликовой, так и 17-роликовой машинах, на 14 % и 9 % соответственно в 15- и 17-роликовых при  $\Delta = 3$  мм и менее 5 % отмечается разница в уровне пластификации полос при  $\Delta = 5$  мм.

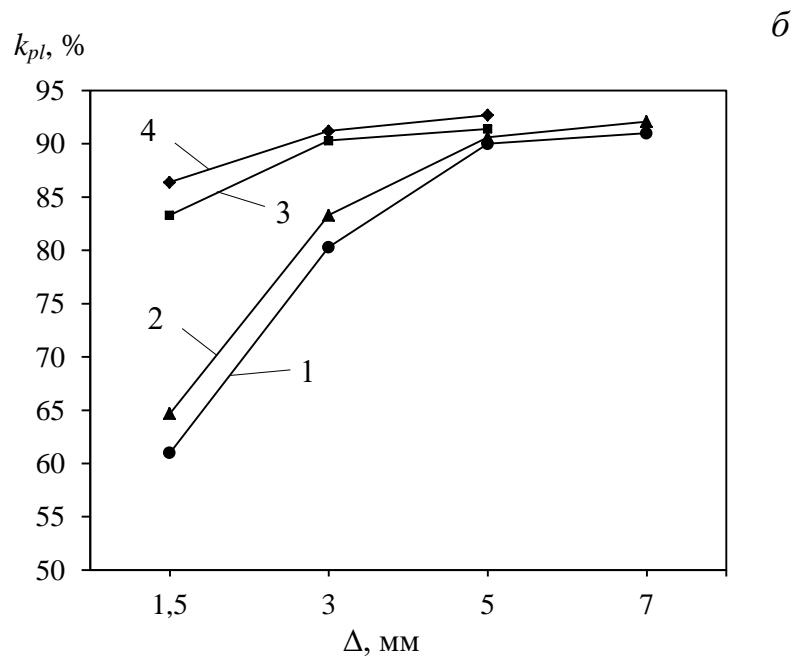
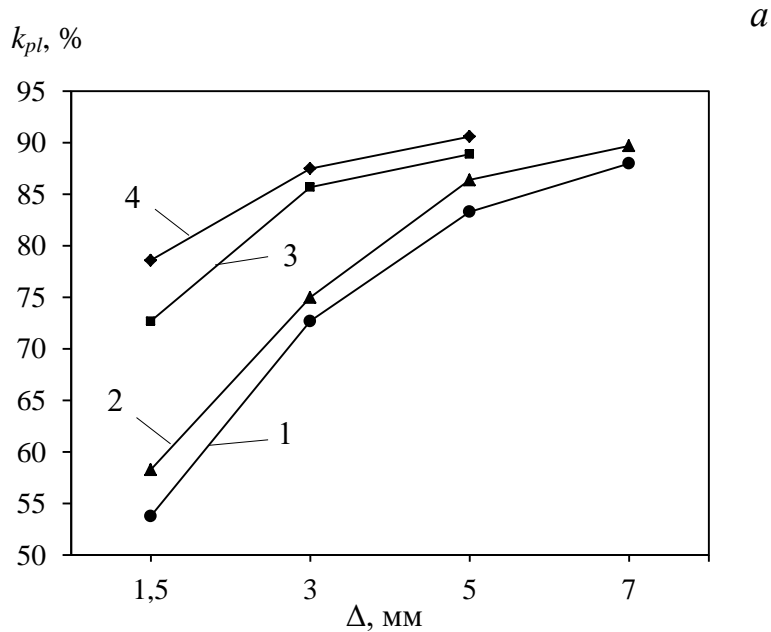


Рисунок 5.13 – Уровень пластификации полосы из марок сталей:

1 и 3 – 09Г2С; 2 и 4 – сталь 3 при правке в 15-роликовой (а) и

17-роликовой (*б*) машинах в зависимости от наклона верхней кассеты и перемещения вниз последнего верхнего ролика: 1 и 2 – 0 мм; 3 и 4 – 2 мм

Все это позволило сделать вывод о возможности поиска величины  $\Delta$ , характеризующей наклон верхней кассеты, обеспечивающей высокий уровень пластификации металла (90 % и выше) в начале процесса правки без значительного увеличения значений перекрытий роликов. Значения перекрытий роликов верхнего и нижнего ряда ограничивается мощностью привода роликовых правильных машин.

Изучение закономерностей изменения относительных продольных пластических деформаций  $\epsilon$  и остаточных напряжений в горячекатаных листах в конце правки на РПМ при одинаковых перемещениях первого верхнего ролика ( $y_2 = \text{const}$ ) в зависимости от перемещения верхнего последнего ролика выполнено на основе моделирования знакопеременного деформирования в 17-роликовой правильной машине.

В таблице 5.4 приведены данные режимов правки полос толщиной  $h = 3$  мм из марки стали 09Г2С.

Таблица 5.4 – Значения перемещений роликов вниз в верхней кассете 17-роликовой машины и результаты моделирования

Номер режима	Перемещения роликов, мм		$\Delta$ , мм	Относительная деформация полосы при правке		$\sigma_{\text{max}}$ , МПа	$U$ , Дж
	$y_2$	$y_{16}$		в начале $\epsilon_n$ , %	в конце $\epsilon_k$ , %		
1	5,5	0	5,5	2,5	0,02	146	0,15
2		0,3	5,2		0,26	148	0,18
3		0,5	5,0		0,39	215	0,35
4		1,0	4,5		0,71	261	0,48
5		2,0	3,5		1,34	279	0,52



У всех режимов одинаковое значение перемещения первого верхнего ролика № 2 –  $y_2 = 5,5$  мм, но разные значения перемещения последнего верхнего ролика № 16 – от 0 до 2 мм, а значит и величина, характеризующая наклон верхней кассеты  $\Delta$ , – от 3,5 мм до 5,5 мм. По результатам моделирования были построены графики изменения относительных продольных пластических деформаций  $\varepsilon$  (рисунок 5.14). Во всех вариантах максимальная относительная деформация полосы отмечалась под третьим роликом и составляла 2,5 % с коэффициентом пластификации  $k_{pl} = 92$  %.

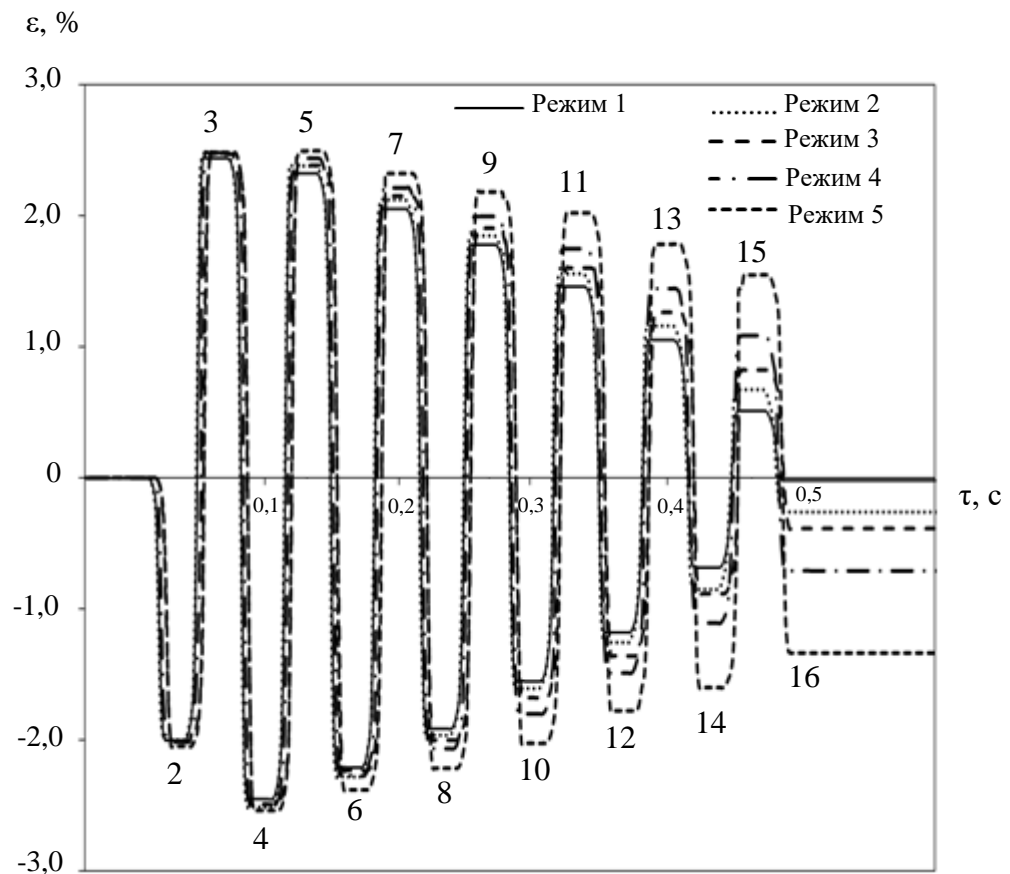


Рисунок 5.14 – Графики относительных продольных пластических деформаций верхнего поверхностного слоя полосы при правке по режимам таблицы 5.4

При правке по режиму 1 отсутствует пластическое деформирование полосы под последним верхним роликом № 16, а режимы правки № 4 и № 5 характеризуются в 2–5 раза большими значениями пластических деформаций в последних трех роликах РПМ в сравнении с режимами 2 и 3.

На рисунок 5.15 представлены результаты моделирования остаточных напряжений по толщине проката после правки.

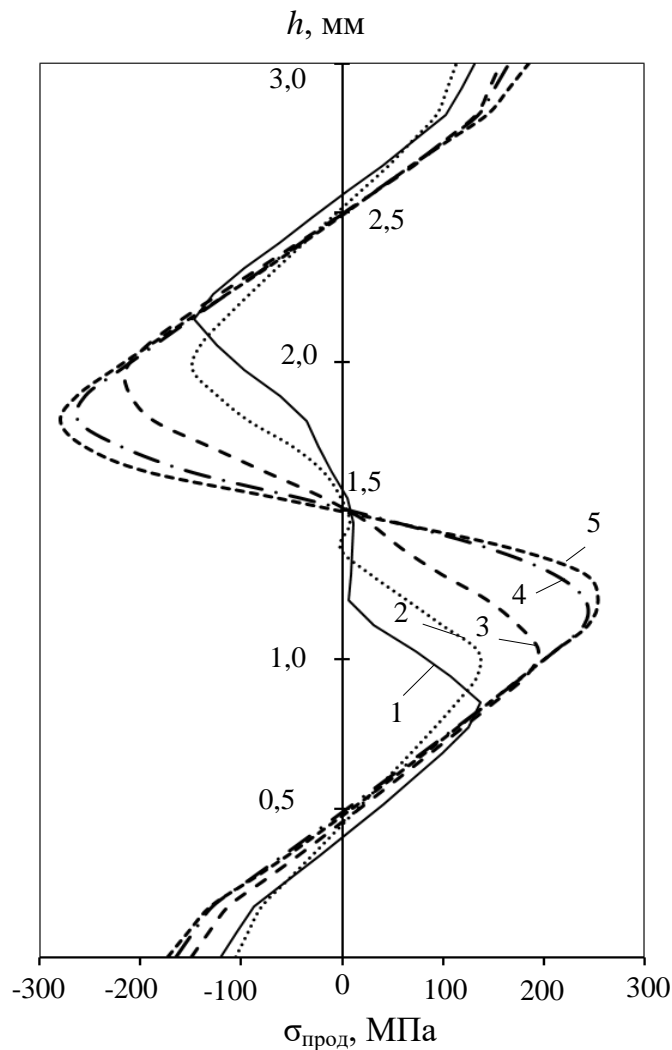


Рисунок 5.15 – Графики распределения остаточных напряжений по толщине полосы при перемещении последнего верхнего ролика вниз на величину:  
1 – 0 мм; 2 – 0,3 мм; 3 – 0,5 мм; 4 – 1 мм; 5 – 2 мм

Из графиков видно, что режимы 3–5 характеризуются высокой релаксацией напряжений в приповерхностных областях проката и формированием в средней части толщины высокого уровня напряжений. Напряжения при правке по режимам 3–5 почти в 1,5–2 раза больше в сравнении с режимами 1 и 2. Минимальные значения накопленной потенциальной энергии деформации после правки (таблица 5.4) характерны для режимов 1 и 2, что существенно меньше в сравнении с результатами, полученными при правке по режимам 3–5.

Полученные результаты позволили сформулировать вывод, что минимизация значения перекрытия в последних трех роликах обеспечивает постепенное и плавное уменьшение деформации полосы при ее изгибе при правке и позволяет снижать остаточные напряжения по толщине и накопленную потенциальную энергию деформации. При этом необходимо учитывать особенности работы роликовых правильных машин. Так, практика работы РПМ в линиях агрегатов поперечной резки № 3 и № 4 цеха отделки металла № 2 ПАО «Северсталь» показала, что отсутствие деформации в последних трех роликах может приводить к соударению переднего конца полосы с рольгангом при выпуске ее из РПМ и возникновению аварийной ситуации. Для исключения этого необходимо задавать перекрытие в последних трех роликах, компенсируя изгиб полосы на выходе. В этом случае из всех рассмотренных режимов может быть рекомендован режим 2 таблицы 5.4 с  $y_{16} = 0,3$  мм на выходе.

#### 5.4.2 Влияние конструктивных параметров роликовых правильных машин

Характер деформации металла при правке и распределение внутренних остаточных напряжений по толщине листа и, как следствие, отклонение по требованиям качества получаемых деталей при раскрое листов высокотехнологичными методами, определяется, в том числе, и влиянием конструктивных параметров РПМ. Исследование влияния диаметра рабочих

роликов  $D$ , их шага  $t$  и количества  $n$  выполнено для 6-ти вариантов конструкции РПМ (таблица 5.5).

Таблица 5.5 – Конструктивные параметры РПМ, принятые при моделировании

Номер варианта	$D$ , мм	$t$ , мм	$n$
1	110	121	13
2	80	88	15
3	70	77	15
4	70	77	17
5	70	77	19
6	50	55	19

Для всех вариантов, согласно практике и рекомендациям технической литературы [85, 193–195, 274], принято, что значение шага роликов  $t = 1,1D$ . Конструктивные параметры вариантов 1, 2 и 4 соответствуют реальным параметрам 13-, 15- и 17-роликовых правильных машин, эксплуатируемым в линиях агрегатов поперечной резки цеха отделки металла № 2 ПАО «Северсталь». Для оценки влияния числа роликов на результат правки предусмотрены варианты 3–5 с одинаковыми значениями  $D$  и  $t$ . Вариант 6 введен для оценки влияния уменьшения  $D$  и  $t$  и сравнения с вариантом 5.

Всем вариантам соответствует одинаковая величина  $\Delta$ , характеризующая наклон верхней кассеты, равная 5 мм. Значение вертикальных перемещений первого верхнего ролика во всех случаях составляет  $y_2 = 5$  мм, последнего верхнего ролика –  $y_{n-1} = 0,5$  мм. Рассматривалась правка полос из марки стали S355MC толщиной  $h = 4$  мм со скоростью  $v = 1$  м/с.

Результаты моделирования остаточных продольных напряжений по толщине металла после правки (рисунок 5.16) показали, что максимальные напряжения в

поверхностных верхних и нижних волокнах отмечаются после правки с минимальным числом роликов и наибольшим диаметром роликов. С увеличением числа роликов и уменьшением их диаметра снижаются напряжения в приповерхностных слоях и одновременно формируется более однородный профиль напряжений по всей толщине с минимальным перепадом остаточных напряжений сверху, снизу и остальной части сечения.

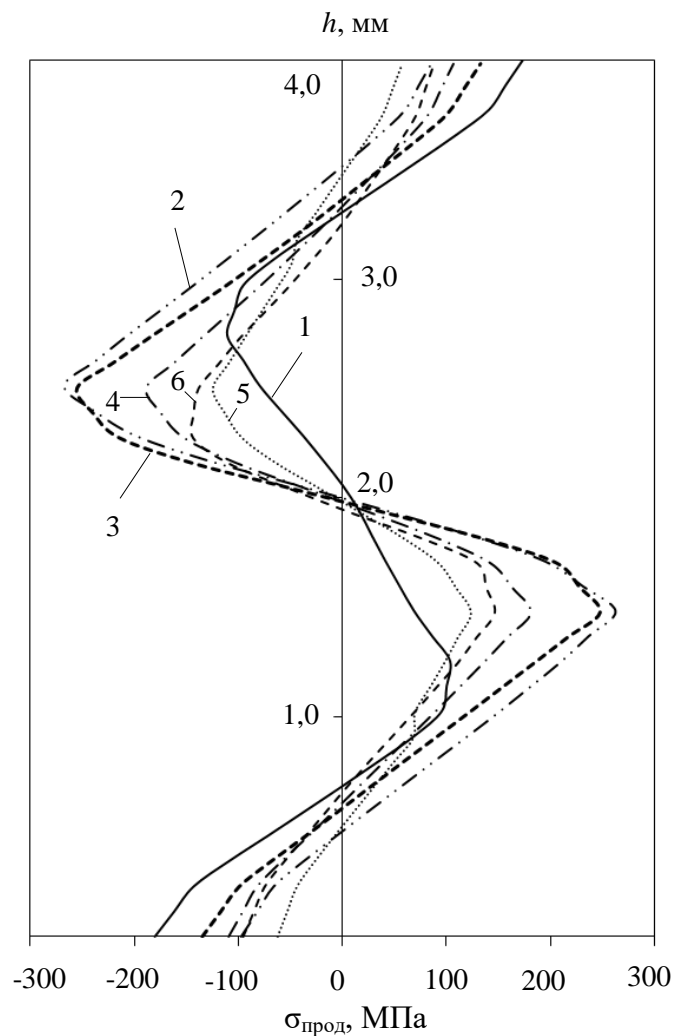


Рисунок 5.16 – Графики распределения остаточных продольных напряжений по толщине металла после правки в 6-ти вариантах конструкции РПМ

Сравнение результатов моделирования вариантов 3–5 при увеличении числа роликов  $n$  без изменения  $D$  и  $t$  показывает существенное влияние  $n$  на снижение отклонений остаточных напряжений, как на поверхности, так и по толщине полосы.

Полученные показатели правки (таблица 5.6) вариантов 3–5 также свидетельствуют в пользу варианта 5 с числом роликов при правке 19, для него характерны максимальная пластификация на входе, минимальная деформация по толщине на выходе и наименьшие значения остаточных продольных напряжений и потенциальной энергии.

Таблица 5.6 – Показатели правки

Номер варианта	$k_{pl}$ , %	$\epsilon_n$ , %	$\epsilon_k$ , %	$\sigma_{\text{прод max}}$ , МПа	$U$ , мДж
1	81,98	1,39	0,139	173,6	331,2
2	87,72	2,04	0,427	267,4	553,29
3	90,12	2,53	0,32	255,0	571,03
4	91,50	2,94	0,166	188,5	504,99
5	92,84	3,49	0,00813	124,4	459,66
6	95,08	5,09	0,359	146,5	326,09

Также из таблицы 5.6 видно, что при одних и тех же параметрах процесса правки, с сохранением соотношения  $t = 1,1D$ , уменьшение диаметров роликов приводит к росту уровня пластификации полосы по толщине. Варианту 6 с наименьшим диаметром роликов  $D = 50$  мм соответствует максимальное значение пластификации полосы  $k_{pl} = 95$  %. Стоит отметить, что показатели правки  $\epsilon_k$ ,  $\sigma_{\text{прод}}$  и  $U$  для варианта конструкции роликовой правильной машины 6 можно существенно улучшить, выбрав режим правки с меньшим значением перемещения первого верхнего ролика.

## 5.5 Оценка влияния исходной неплоскостности горячекатаных полос на показатели правки

Реализация 3D-моделирования процесса правки на роликовых правильных машинах, изложенная в работах [275–278], позволила учесть влияние различной исходной формы полосы – плоской, имеющей короб в середине и имеющей волну у боковых кромок. Высота исходной волны и короба варьировалась в диапазоне 10–20 мм, а длина задавалась равной 400 мм. После пропуски через РПМ плоская полоса сохранила плоскостность, а у полос, имевших волнистость и коробоватость, высота неплоскостности уменьшилась вплоть до 4 мм, что соответствует требованиям мировых стандартов. При этом распределение продольных растягивающих и сжимающих напряжений по толщине и ширине полосы во всех вариантах оказалось существенно неравномерным.

Для оценки влияния на новые показатели правки исходной формы полосы выполнено моделирование процесса правки полосы с исходной неплоскостностью в виде волны высотой 14 мм и длиной 200 мм. Учитывая полученные результаты в работах [276, 277], а также возможность разделения листового проката на полосы по ширине, предложенного в работах [215–217], исходную полосу с краевой волной было решено разделить на полосы по ширине. Моделирование правки выполнено для двух полосок – крайней, имеющей неплоскостность, и средней плоской полоски. Рассматривалась правка горячекатаной полосы толщиной 3 мм в 17-роликовой правильной машине (рисунок 5.1) со скоростью  $v = 1$  м/с для варианта перемещений верхних роликов  $y_2 = 6$  мм и  $y_{16} = 3$  мм, диаметры роликов  $D = 80$  мм и шаг роликов  $t = 89$  мм. Марка стали полосы – S235MC.

Настройка конечно-элементной модели при правке полоски, имеющей форму волны, представлена на рисунке 5.17 [278].

На рисунке 5.18 показаны графики изменения относительных продольных пластических деформаций верхнего поверхностного волокна при правке: график

*A* получен при правке плоской формы полосы на входе, график *B* – при правке полосы с исходной волнистостью.

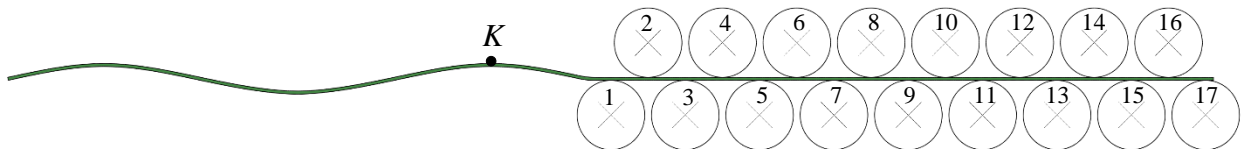


Рисунок 5.17 – Настройка модели при правке полосы с исходной  
ВОЛНИСТОСТЬЮ

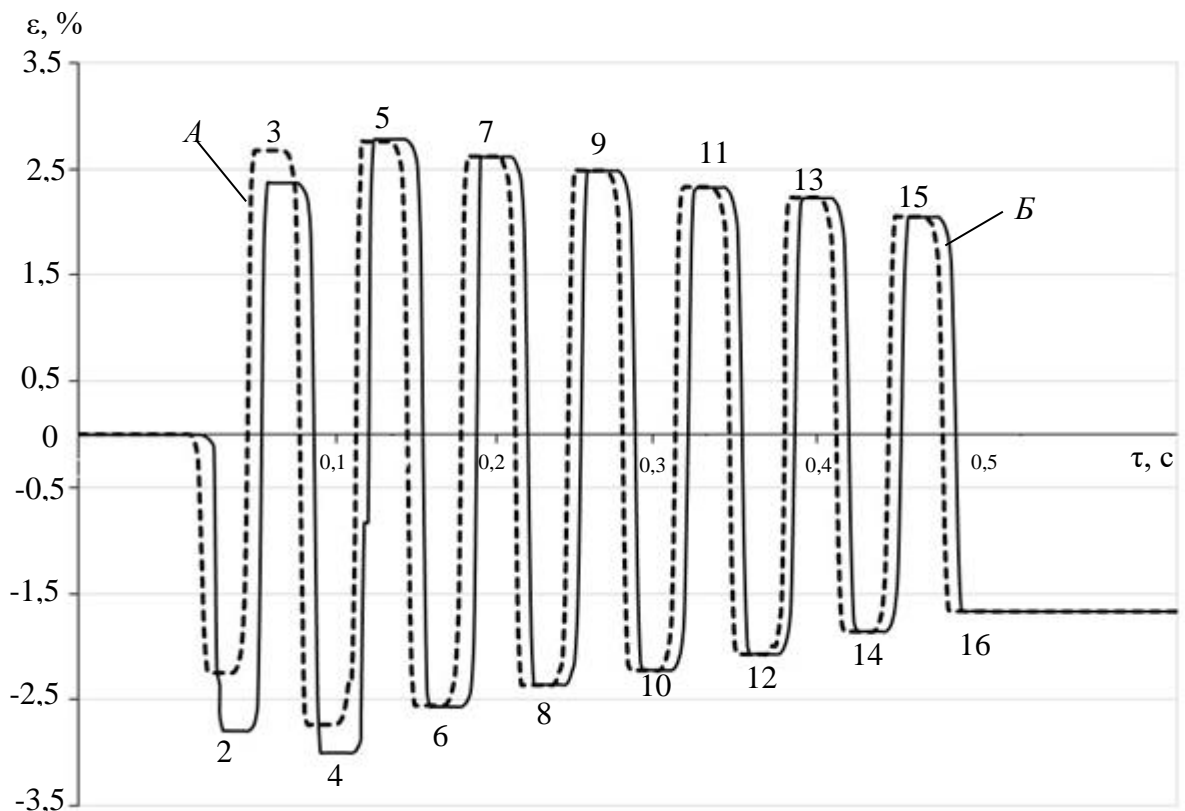


Рисунок 5.18 – Графики остаточных продольных деформаций  
верхнего поверхностного волокна при правке:

*A* – плоская форма полосы на входе,  
*B* – полоса с исходной волнистостью



График *A* был получен в п. 5.3 при правке полосы из марки стали S235MC. График *B* иллюстрируют изменение деформации точки *K*, ее местоположение показано на рисунке 5.17. Видно, что вначале процесса правки у графиков *A* и *B* отмечается различная деформация полосы в контактах с роликами № 2–№ 4, далее, после контактов с роликами № 5 и № 6 происходит выравнивание значений деформаций. Из распределений продольных напряжений по толщине листа после правки (рисунок 5.19) видно, что благодаря высокой пластификации полосы в начале процесса правки, отсутствует существенное влияние исходной неплоскостности полосы на этот показатель правки. Аналогичные результаты получены и для показателя  $U$  – накопленной потенциальной энергии после правки.

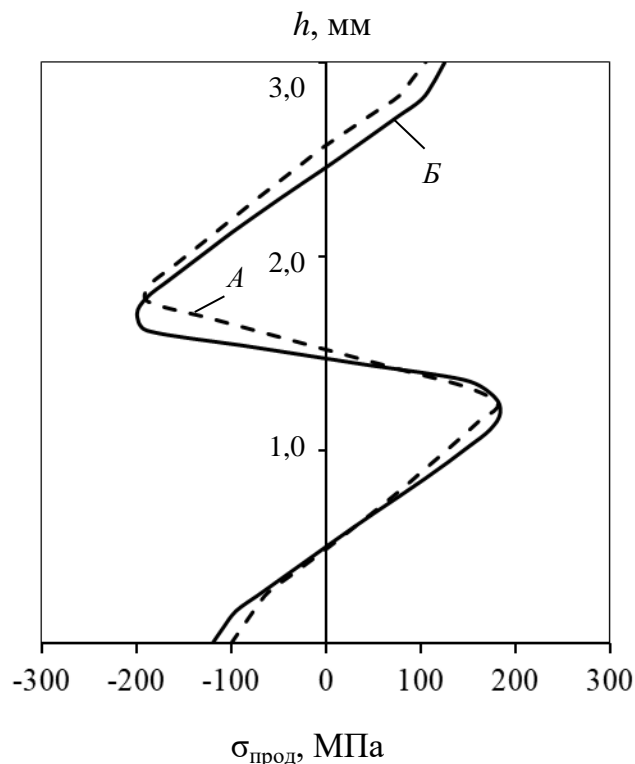


Рисунок 5.19 – Графики распределения продольных напряжений по толщине полосы после правки:

- A* – плоская форма полосы на входе,
- B* – полоса с исходной волнистостью

Из-за высокой пластификации полосы в начале процесса правки все закономерности распределений исследуемых показателей правки наблюдаются и при знакопеременной деформации полосы с неплоскостностью.

### **5.6 Разработка и реализация методики выбора режима правки на роликовых правильных машинах для получения проката для высокотехнологичной резки**

Развитие теории упругопластического изгиба на многороликовой машине в условиях знакопеременного деформирования позволило выявить закономерности между параметрами правки, формируемыми остаточными напряжениями и потенциальной энергией в листах после правки, влияющими на отклонение от плоскостности листов при высокотехнологичной резке. Установлен эффект положительного влияния максимального уровня пластических деформаций вначале правки с минимальным их уровнем на выходе на уменьшение значений остаточных напряжений, потенциальной энергии в листах после правки и отклонений от плоскостности листов при высокотехнологичной резке. Для его практического внедрения была разработана методика выбора режима правки на РПМ, устраняющего исходное неоднородное напряженное состояние горячекатаной полосы и дефекты неплоскостности с обеспечением минимального уровня остаточных напряжений в готовом прокате.

При разработке методики выбора режима правки были использованы результаты конечно-элементного моделирования процесса правки на РПМ, подтвержденные экспериментальными данными, полученными при правке и последующей резке листов. Последовательность методики включает три этапа и проиллюстрирована на рисунке 5.20 [279].

На первом этапе производится сбор и анализ исходных данных, включая параметры роликовой правильной машины, требования к листовому горячекатаному прокату.

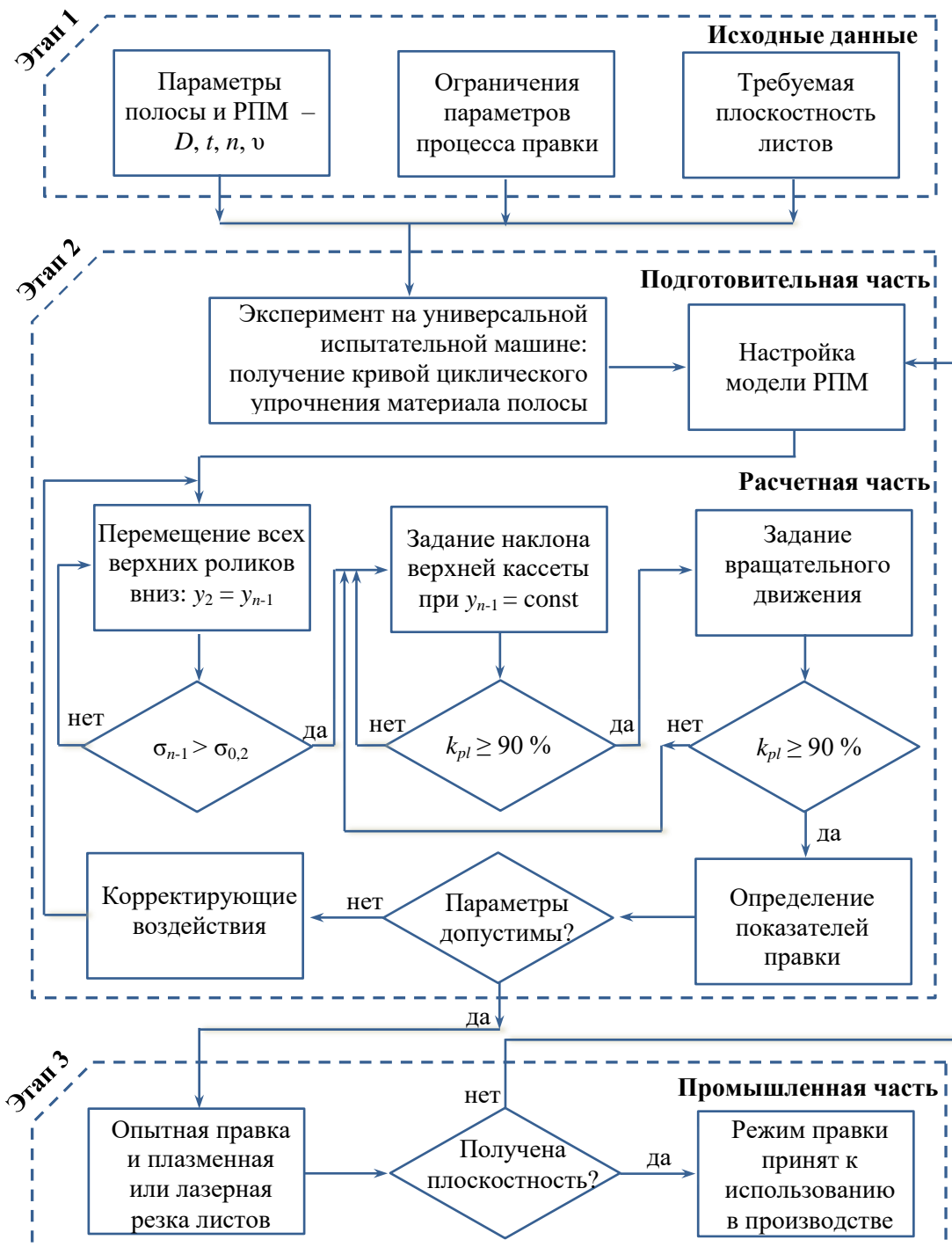


Рисунок 5.20 – Схема реализации методики выбора режима правки

Основными параметрами РПМ являются число роликов  $n$ , их диаметр  $D$ , шаг роликов  $t$  и скорость правки  $v$ . Ограничениями могут быть значения показателей правки, диапазоны перекрытий роликов или энергосиловые параметры правки. На ряде современных РПМ в процессе правки не фиксируются усилия, действующие на рабочие ролики, а используется защита двигателей от перегрузки при увеличении значений перекрытий роликов. Основными параметрами горячекатаного проката являются геометрические размеры, химический состав и механические свойства.

На втором этапе в подготовительной части первоначально определяются свойства материала полосы в условиях циклической знакопеременной деформации на универсальной испытательной машине и осуществляется настройка процесса моделирования в системе конечно-элементного анализа с размещением полосы между верхними и нижними роликами.

В расчетной части второго этапа на основе многовариантного моделирования процесса правки предложено вначале выполнять перемещение одновременно всех верхних роликов вниз до появления в поверхностных слоях полосы под последним верхним роликом  $n-1$  напряжений  $\sigma_{n-1}$ , превышающих предел текучести материала полосы  $\sigma_T$ . Численными экспериментами определено, что все верхние ролики должны перемещаться вниз на величину, не превышающую 15 % от толщины полосы. Далее рассматриваются варианты перемещения первого верхнего ролика  $y_2$  с шагом 1 мм при неподвижном последнем верхнем ролике ( $y_{n-1} = \text{const}$ ) для поиска коэффициента проникновения пластической деформации по толщине  $k_{pl} = 90$  %. Перемещение  $i$ -го верхнего ролика определяется из уравнения (5.1), а  $k_{pl}$  – по формуле (5.2). При задании вращательного движения роликов из-за смещения контактов роликов и полосы изменяется уровень ее деформации: при  $k_{pl} < 90$  % потребуется возврат на стадию увеличения значения наклона верхней кассеты до получения режима правки, обеспечивающего  $k_{pl} \geq 90$  %. Для полученного режима определяют показатели

правки: уровень остаточных напряжений по толщине, относительную пластическую деформацию и остаточную потенциальную энергию.

Эффект от использования расчетной части состоит в снижении числа опытных правок полос в промышленных условиях с отбором листов и их порезкой на установках лазерной или плазменной резки.

Третий этап методики включает промышленное опробование с опытной правкой полос на роликовой правильной машине по разработанному режиму, отбором листов, порезкой их на машинах плазменной или лазерной резки на продольные полосы шириной 100 мм и определением величины фактического изгиба каждой полосы. Результаты промышленной части могут потребовать принятия решения о корректировке технологии.

Реализация методики рассматривалась для технологических процессов правки полос разной толщины в 13-, 15- и 17- роликовых правильных машинах, установленных в агрегатах поперечной резки № 3 и № 4 ПАО «Северсталь».

Поиск режима правки полосы толщиной 4 мм из марки стали S355MC со скоростью правки 1 м/с на 17-роликовой РПМ с диаметрами роликов 70 мм и шагом 77 мм показал, что перемещение всей верхней кассеты роликов вниз параллельно нижней кассете на величину  $y_2 = y_{16} = 0,4$  мм приводит к появлению напряжений в поверхностных слоях полосы под последним верхним роликом РПМ, превышающих условный предел текучести материала полосы (рисунок 5.21).

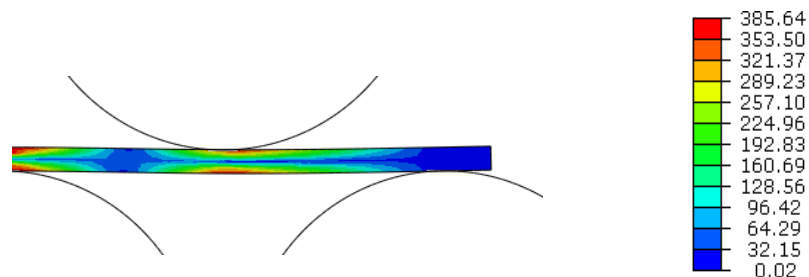


Рисунок 5.21 – Распределение продольных напряжений по толщине полосы при перемещении  $y_2 = y_{16} = 0,4$  мм

В дальнейшем в соответствии с методикой проводилась оценка влияния наклона верхней кассеты при неподвижном последнем верхнем ролике РПМ. При  $y_2 = 1$  мм и  $y_{16} = 0,4$  мм отмечалась недостаточная пластификация полосы в начале правки –  $k_{pl} = \left(1 - \frac{0,2}{1,42}\right) \cdot 100 \% = 85,9 \%$  (рисунок 5.22). Уровень коэффициента проникновения пластической деформации по толщине более 90 % был получен при перемещении первого верхнего ролика вниз на 1,8 мм ( $\varepsilon_n = 2,36 \%$ ).

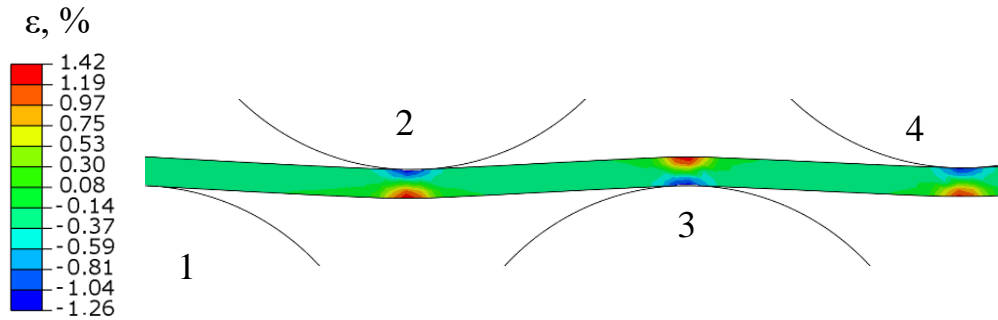


Рисунок 5.22 – Распределение относительных деформаций по толщине полосы при ее прохождении через первые четыре ролика ( $y_2 = 1$  мм и  $y_{16} = 0,4$  мм)

На стадии задания вращательного движения роликов было отмечено снижение значений продольных пластических деформаций и уровня пластификации полосы до 78,9 %:  $k_{pl} = \left(1 - \frac{0,2}{0,95}\right) \cdot 100 \% = 78,9 \%$  (рисунок 5.23, а).

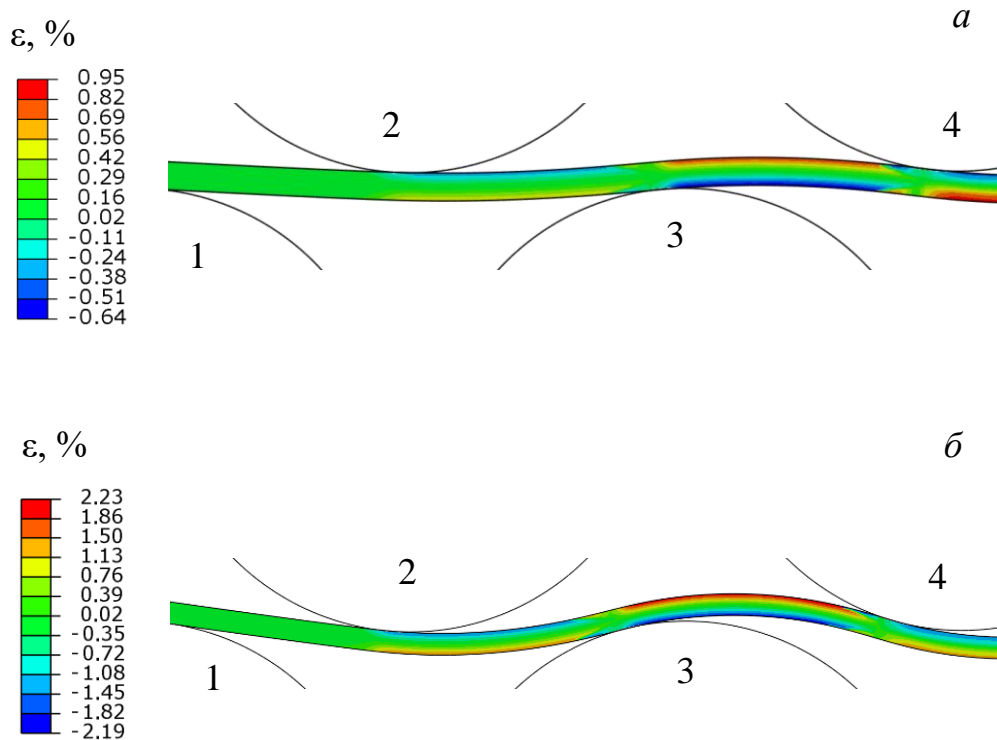


Рисунок 5.23 – Распределение относительных деформаций по толщине полосы при задании вращения роликов:

$a - y_2 = 1,8$  мм и  $y_{16} = 0,4$  мм;  $b - y_2 = 4,5$  мм и  $y_{16} = 0,4$  мм

Для выполнения условия  $k_{pl} \geq 90$  % при задании скорости правки за несколько вычислительных итераций установлено значение перемещения первого верхнего ролика  $y_2 = 4,5$  мм. Коэффициент проникновения пластической деформации по толщине во время процесса получился равным 91 % при  $\varepsilon_n = 2,23$  % (рисунок 5.23, б). Следует отметить, что до начала вращения в случае  $y_2 = 4,5$  мм и  $y_{16} = 0,4$  мм  $k_{pl}$  составлял 96,8 %.

Таким образом, в рамках выполнения расчетной части разработанной методики был сделан вывод о влиянии вращательного движения роликов на уровень пластификации полосы – при задании вращательного движения роликов уровень пластификации полосы уменьшается.

Для режима  $y_2 = 4,5$  мм и  $y_{16} = 0,4$  мм показатели правки составили следующие значения: уровень остаточных напряжений по толщине не превысил 80 МПа, уровень остаточной потенциальной энергии – 0,26 Дж.

Аналогично был выполнен поиск режимов правки полос из марки стали S355MC толщиной 8 мм на 15-роликовой машине с диаметрами роликов 80 мм и шагом 88 мм и толщиной 10 мм на 13-роликовой правильной машине с диаметрами роликов 110 мм и шагом 121 мм. Промышленное опробование разработанных режимов правки выполнено с отбором листов шириной 1500 мм и длиной 3000 мм и их порезкой на продольные полосы шириной 100 мм по описанной выше методике (п. 5.1) на машине плазменной резки SatroniK LS3000 и определением величины фактического изгиба каждой полосы.

Настройки РПМ, полученные по результатам моделирования, а также результаты оценки плоскостности листов после плазменной резки представлены в таблица 5.7 и 5.8. После правки неплоскостность всех отобранных листов не превышала 5 мм на 1 м длины, а после плазменной резки у листов, прошедших правку по режимам 1–3, не было полосок с отклонением от плоскостности более 5 мм. Для сравнения в эти таблицы добавлены результаты моделирования режимов правки, принятых в производстве – режимы 4 и 5.

Таблица 5.7 – Режимы правки полос из марки стали S355MC

№ режима	Число роликов $n$	Диаметр роликов $D$ , мм	Толщина полос $h$ , мм	Перемещения роликов, мм		$\Delta = y_2 - y_{n-1}$ , мм
				$y_2$	$y_{n-1}$	
1	17	70	4	4,5	0,4	3,51
2	15	80	8	6,5	1,0	5,5
3	13	110	10	8,0	1,3	6,7
4	17	70	3	4,5	3,0	1,5
5				5,0	2,0	3



Таблица 5.8 – Результаты моделирования и измерений отклонений полосок после плазменной резки

№ листа	$h$ , мм	$k_{pl}$ , %	$\varepsilon_n$ , %	$\varepsilon_k$ , %	$\sigma_{max}$ , МПа	$U$ , мДж	Число полосок, имеющих отклонения более 5 мм	Максимальное отклонение полосок, мм
1	4	91,0	2,2	0,2	85	260	-	1
2	8	93,3	3,0	0,36	125	750	-	1
3	10	90,9	2,2	0,54	140	1000	-	2
4	3	85,5	1,4	0,74	294	324	8	40
5		87,6	1,6	0,66	284	290	1	35

Из таблицы 5.8 видно, что в разработанных по методике режимах 1–3 высокая пластификация полосы в начале правки и наименьшая деформация в конце правки обеспечивает снижение остаточных продольных напряжений по толщине и исключает отклонение полосок от плоскостности после резки, превышающих 2 мм в сравнении с режимами 4 и 5, принятыми в производстве. Результаты исследований позволили рекомендовать к использованию на производстве разработанные режимы правки полос из марки стали S355MC.

Выполненный комплекс теоретических и промышленных исследований показал существенное влияние пластификации полосы при правке в условиях знакопеременного деформирования на отклонение от плоскостности листового проката при высокотехнологичной обработке. Для окончательной оценки влияния технологических и конструктивных параметров на закономерности изменения пластификации полосы была выполнена постановка дополнительной серии вычислительных экспериментов для исследования дальнейшего влияния наклона верхней кассеты РПМ, диаметра, шага и числа роликов из диапазона параметров, указанных при описании модели в п. 5.1.

Данные обширного вычислительного эксперимента были обработаны и получена регрессионная зависимость коэффициента проникновения пластической деформации по толщине полосы от основных параметров процесса правки [280]:

$$k_{pl} = 31,96 + 26,92 \frac{n}{n_б} + 6,26 \frac{\Delta}{\Delta_б} + 3,27 \frac{h}{h_б} + 0,37 \frac{t}{t_б} - 2,02 \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_{0,2_б}}, \quad (5.3)$$

где  $n$  – число роликов;  $\Delta$  – разница перемещений по вертикали первого и последнего роликов верхней кассеты, мм;  $h$  – толщина полосы, мм;  $t$  – шаг роликов, мм;  $\sigma_{0,2}$  – условный предел текучести полосы, МПа.

Параметры, входящие в уравнение (5.3) с индексом «б» – базисные минимальные значения соответствующих параметров. Коэффициент детерминации  $R^2 = 0,85$  и полученное расчетное значение критерия Фишера  $F = 8,2$  больше табличного, равного 2,5, свидетельствуют об адекватности модели.

Анализ зависимости показал, что параметрами, влияющими на  $k_{pl}$  в большей степени, являются число роликов и величина наклона верхней кассеты. Увеличение числа роликов без изменения диаметра и шага роликов при одном и том же наклоне верхней кассеты приводит к росту пластификации полосы. В этом случае при правке полосы в 19-роликовой РПМ интенсивность пластификации в сравнении с 13-роликовой возрастает не менее чем на 15 %. Кроме того, модель позволят прогнозировать пластификацию полос различной толщины при правке на одной РПМ, с ростом толщины полосы, например, от 3 мм до 6 мм при одинаковом значении  $\Delta$  коэффициент проникновения пластической деформации по толщине полосы увеличивается в среднем на 3 %. Учитывая взаимосвязь формул (5.2) и (5.3), можно прогнозировать и максимальную относительную деформацию поверхности полосы при правке.

Использование модели прогнозирования пластификации полосы позволило разработать рекомендации по дальнейшему совершенствованию технологии правки и модернизации действующих линий поперечной резки металла, установленных в цехе отделки металла № 2 ПАО «Северсталь». Были разработаны рекомендации по настройке роликовых правильных машин,

позволяющие увеличить воздействие на форму проката и получать горячекатаные листы, пригодные для высокотехнологичной резки, а также предложено для правки сортамента толщиной 3–4 мм установить роликовые правильные машины с диаметром роликов 70–50 мм и их числом не менее 19.

### **Выводы по главе 5**

1. Представлено численное описание процесса формоизменения горячекатаных полос при правке в условиях циклической знакопеременной деформации с применением системы конечно-элементного анализа. Адекватность результатов моделирования подтверждена сравнением с опубликованными экспериментальными данными зарубежных авторов, расхождение результатов находится в диапазоне 1,2–10 %.

2. Промышленным экспериментом подтверждено, что наименьшие отклонения полосок от плоскостности после порезки, как плазмой, так и лазером, имеют листы, прошедшие правку по режимам, которым при моделировании соответствуют минимальные отклонения напряжений по толщине.

3. Раскрыт и описан механизм возникновения остаточных напряжений при правке в условиях циклической знакопеременной деформации, обусловленный величиной пластической деформации и неоднородностью распределения деформаций по толщине при правке. Установлено, что в центральной части сечения полосы формируется область «стесненных» упругих напряжений, препятствием по высвобождению обратимой потенциальной энергии которых становятся приповерхностные слои с необратимой пластической деформацией. Показано, что чем меньше накопленной энергии пластических деформаций аккумулировано по толщине полосы после правки, тем меньше отклонения от плоскостности листов при высокотехнологичной резке.

4. Моделированием установлено, что после правки в различных РПМ на верхней поверхности листа остаются растягивающие продольные остаточные

напряжения, на нижней – сжимающие, в середине по толщине они равны нулю, в остальных частях сечения значения напряжений противоположны по знаку.

5. Определено, что одинаковые параметры процесса правки полос разных категорий прочности приводят к разным значениям относительных продольных деформаций, различным отклонениям напряжений по толщине и остаточной потенциальной энергии. Рост прочности полосы приводит к увеличению величины отклонения напряжений, остаточной потенциальной энергии и снижению пластификации полосы.

6. Введены показатели правки в условиях знакопеременного деформирования, влияющие на плоскостность листов при раскросе высокотехнологичными методами: уровень остаточных продольных напряжений по толщине листа; коэффициент проникновения пластической деформации по толщине полосы, характеризующий процент толщины, достигший предела текучести; относительные пластические деформации при правке в начале процесса и в конце; остаточная потенциальная энергия правки.

7. Раскрыты закономерности влияния технологических и конструктивных параметров роликовых правильных машин на эффективность воздействий на полосу при правке с обеспечением сохранения плоскостности стальной листовой продукции после обработки высокотехнологичными методами:

7.1. На основе комплекса теоретических и промышленных исследований определено, что максимальный уровень пластических деформаций вначале правки с минимальным их уровнем на выходе обеспечивает уменьшение значений остаточных напряжений, потенциальной энергии в листах после правки и отклонений от плоскостности листов при высокотехнологичной резке.

7.2. Увеличение числа роликов и уменьшением их диаметра позволяет снижать напряжения в приповерхностных слоях и одновременно формировать более однородный профиль напряжений по всей толщине с минимальным перепадом остаточных напряжений сверху, снизу и остальной части сечения, обеспечивая рост пластификации полосы и уменьшение потенциальной энергии.

8. Впервые получена зависимость, описывающая влияние конструктивных параметров роликовых правильных машин, параметров процесса правки и полосы на коэффициент проникновения пластической деформации по толщине полосы и позволяющая прогнозировать максимальную относительную деформацию поверхности полосы при правке.

9. Разработана методика выбора режима правки для различных роликовых правильных машин, позволяющая определять их настройки, устраняющие исходное неоднородное напряженное состояние горячекатаных полос различных групп прочности и дефекты неплоскостности, с обеспечением минимального уровня остаточных напряжений и потенциальной энергии в готовом прокате.

## Глава 6. Разработка и внедрение решений по повышению эффективности формообразования листового проката

### 6.1 Разработка и внедрение решения по уменьшению величины смещения поверхностных дефектов от кромок раската в направлении середины ширины

Для совершенствования процесса непрерывной горячей прокатки на НШСГП 2000 ПАО «Северсталь» и уменьшения боковой обрезки широких стальных полос был выполнен анализ выхода годного в период с июля по декабрь 2010 г. в производстве холоднокатаного проката. Было установлено, что общий уровень выхода годного составляет 97,0 %, но по отдельным сортаментным группам выход годного снижается до 80,2 %. Отчасти это было связано с отсортировкой по дефекту плена: 1,14 % – для всего сортамента, 15,45 % – для *IF* стали. Наибольший уровень отсортировки по конвертерному производству на сортаменте, предназначенном для холодной прокатки, с привязкой к ширине проката (рисунок 6.1) соответствовал диапазону от 1351 мм до 1600 мм включительно.

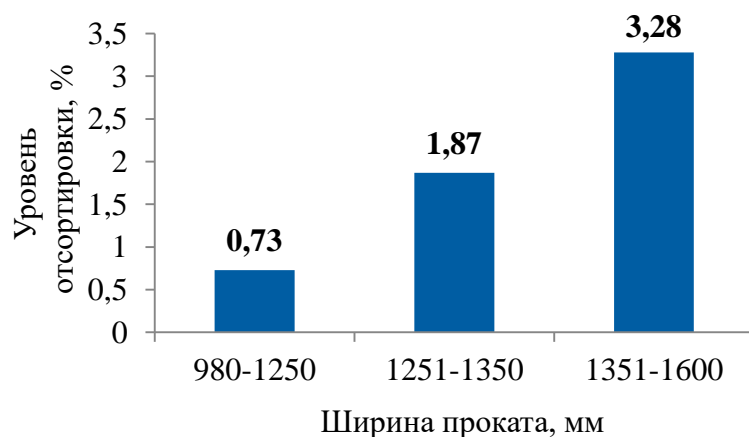


Рисунок 6.1 – Уровень отсортировки на сортаменте для производства холодного проката

Максимальный объем заказов 47,9 % при производстве полос шириной  $b = 1350\text{--}1600$  мм (рисунок 6.2) соответствует кристаллизаторам шириной 1540 мм. Этому профилеразмеру кристаллизатора соответствует и максимальный объем проката 23,3 % с суммарным обжатием в черновой группе более 50 мм по ширине при производстве на стане 2000 (рисунок 6.3). Общий объем проката с обжатием более 50 мм составил 36,7 %.

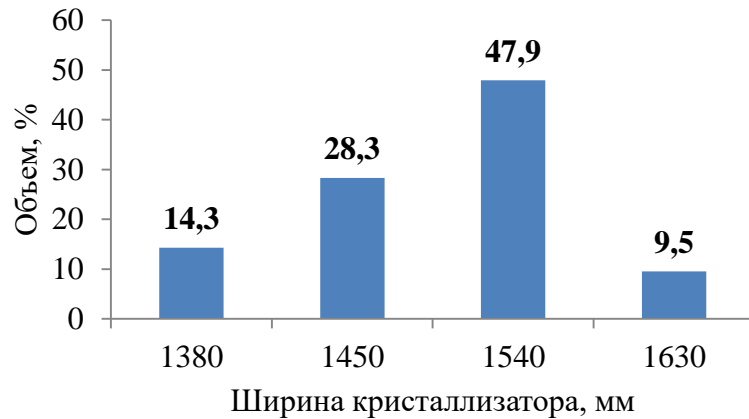


Рисунок 6.2 – Распределение объем заказов по ширине кристаллизаторов при производстве полос шириной  $b = 1350\text{--}1600$  мм

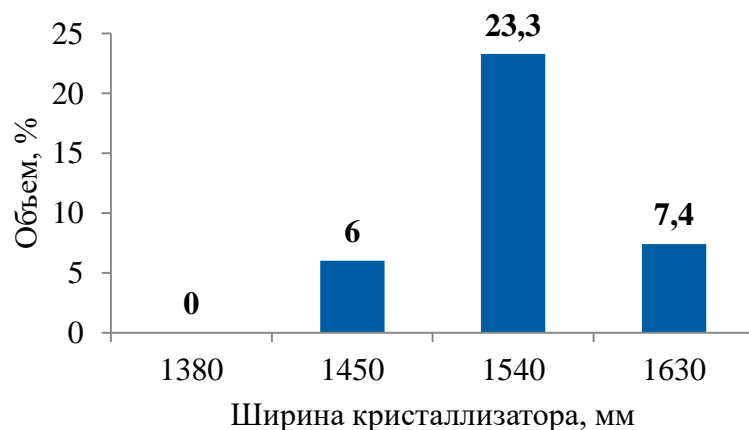


Рисунок 6.3 – Распределение объемов производства полос шириной  $b = 1350\text{--}1600$  мм с суммарным обжатием по ширине более 50 мм при разных размерах кристаллизаторов

По результатам выполненных экспериментальных исследований и численного моделирования формообразования проката при черновой прокатке на стане 2000 ПАО «Северсталь» было предложено дополнительно к существующим добавить кристаллизатор шириной 1490 мм. Использование нового кристаллизатора шириной 1490 мм позволило уменьшить объем металла с суммарным обжатием более 50 мм по ширине с 36,7 % до 13,4 % и снизить отсортировку металла, предназначенного для производства плоского проката шириной 1350–1600 мм, с 3,28 % до 1,87 %. Снижение суммарных вертикальных обжатий без превышения значений 40–50 мм дало возможность уменьшить величину затекания металла с узкой грани на широкую не менее, чем на 5 мм. Внедрение с 2011 г. в производство нового размера кристаллизатора позволило снизить общий расход металла шириной 1350–1600 мм с 1,14 % до 1,04 %.

## **6.2 Разработка и внедрение в производство новых профилировок валков**

Выполненное моделирование формообразования поперечного профиля с реализацией методики выбора профилировок валков позволило разработать и внедрить в производство новые профилировки для повышения точности формирования геометрии полосы и стойкости валков различных непрерывных широкополосных станов горячей и холодной прокатки.

*Выпукло-вогнутая профилировка рабочего вала на четырехклетевом стане холодной прокатки 2100.* При прокатке на 4-клетевом стане 2100 ПАО «Северсталь» полос шириной от 900 до 1300 мм при существующих профилировках и работе средств регулирования в середине поперечного сечения полосы отмечалась повышенная выпуклость с отклонением, превышающим 2 % от номинального значения, что являлось следствием недостаточного обжатия середины полосы и большего обжатия ее краев.



С использованием методики профилирования валков листопрокатного производства разработано и предложено новое решение по асимметричной выпукло-вогнутой профилировке рабочих валков. В этом случае выпукло-вогнутая профилировка опорных валков остается без изменения, что позволяет не расширять эксплуатационный парк валков и не повышать затраты, связанные с их перешлифовкой. По результатам обширных вычислительных экспериментов на основе учета технологических параметров процесса прокатки, данных по износу бочек валков, диапазонов осевой сдвижки и гидроизгиба и их возможностей по корректировке вытяжек по ширине была предложена универсальная профилировка рабочих валков, выполненная по зависимости (1.3) с полиномиальными коэффициентами:  $a_1 = 0,178211 \cdot 10^{-2}$ ;  $a_2 = -0,169989 \cdot 10^{-5}$ ;  $a_3 = 0,482081 \cdot 10^{-9}$  (рисунок 6.4).

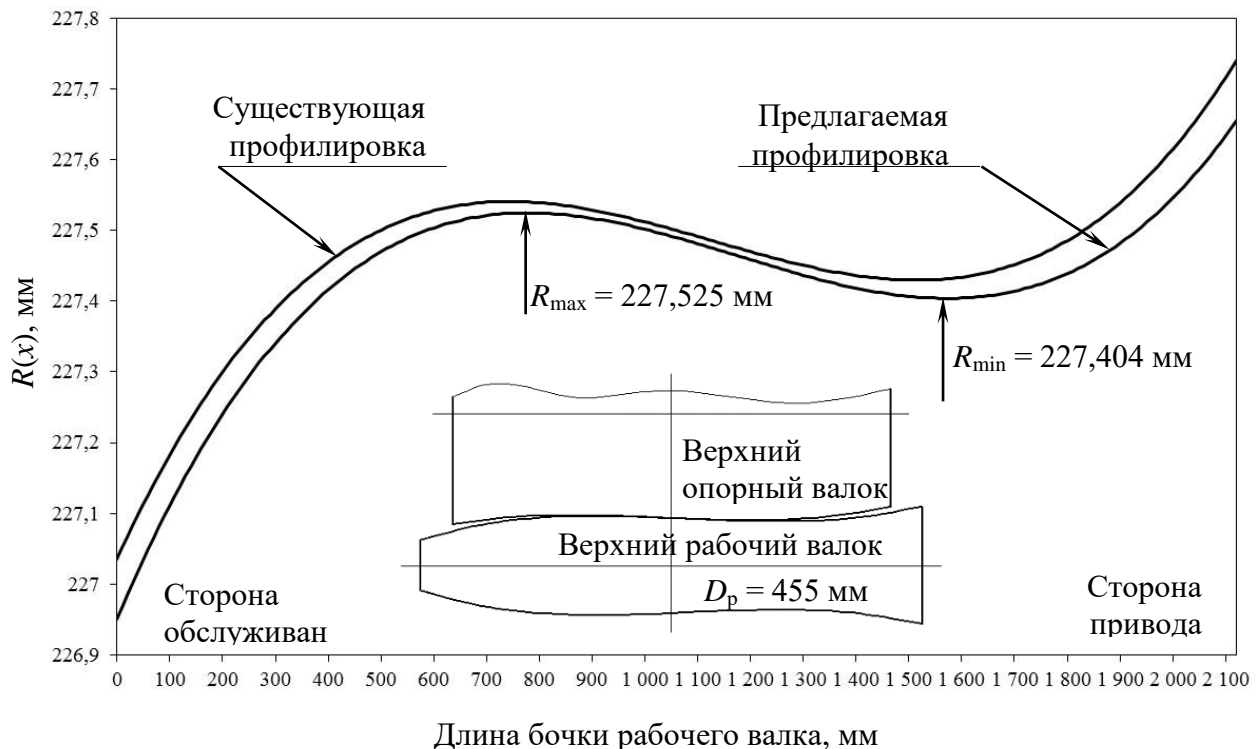


Рисунок 6.4 – Существующая и новая асимметричная выпукло-вогнутая профилировка рабочих валков

В окончательном варианте профилировки рабочего вала уменьшены диаметры со стороны обслуживания и со стороны привода на 0,17 мм, их разность  $\Delta D$  осталась прежней 1,41 мм. Радиусы вогнутости и выпуклости профилировки уменьшены на  $\Delta R_{\min} = 227,541 - 227,524 = 0,017$  мм и  $\Delta R_{\max} = 227,428 - 227,404 = 0,024$  мм соответственно. Распределение деформаций, представленные по результатам выполненных исследований (рисунок 3.24, б), показывает, что новая профилировка рабочего вала при взаимодействии с существующим профилем опорного вала приводит к незначительному, но росту деформаций, при этом обеспечивается снижение разности прогиба валковой системы на ширине полосы с 0,08 мм до 0,05 мм, то есть на 38%, следовательно, повышается воздействие на поперечное сечение профиля полосы. Влияние новой профилировки рабочего на напряженное состояние валковой системы несущественно – в этом случае снижение напряжений составило  $\sim 7$  МПа (рисунок 3.24, а).

Первоначально предлагаемая профилировка прошла тестовые испытания на модели прокатки, реализованной в программном обеспечении 4-клетевого стана. Имитационное моделирование процесса прокатки показало возможность использования разработанной выпукло-вогнутой профилировки рабочих валков на стане. В цехе подготовки валков для станов холодной прокатки ПАО «Северсталь», оснащенном современными вальцешлифовальными станками (фирма Tenova S.p.A., дивизион Pomini (Castellanza, Италия)) с возможностью высокоточной обработки валков с допуском  $\pm 0,001$  мм, была отшлифована пара рабочих валков. Промышленное испытание новой профилировки включало установку этих валков в клеть № 2 стана 2100 в августе 2018 г. с контролем их состояния, а также неплоскостности прокатываемых полос. При этом увеличения износа бочек валков и ухудшения качественных показателей проката не отмечалось. Дальнейшие промышленные испытания профилировки во всех клетях стана подтвердили правильность сделанных выводов и полученных результатов моделирования по повышению эффективности работы осевой сдвижки и гидроизгиба рабочих валков. Резервы осевой сдвижки и усилий изгиба

при новой профилировке увеличились до 20 % для всего производимого сортамента. Это позволило увеличить выход годной металлопродукции с высокими показателями качества по поперечной разнотолщинности и плоскостности холоднокатаных полос. По результатам испытаний новая профилировка была принята к использованию на стане.

*Профилировки валков пятой клетки на непрерывном широкополосном стане холодной прокатки 1700 ПАО «Северсталь».* Прокатка полос автомобильного сортамента шириной 1400–1550 мм, а также полос шириной от 1560 до 1600 мм, не предусмотренной паспортной характеристикой непрерывного пятиклетевого стана холодной прокатки 1700 ПАО «Северсталь», характеризовалась появлением светлых участков у боковых кромок [281, 282] (рисунок 6.5). Светлые прикромочные полосы имели шероховатость поверхности  $R_a = 2,2\text{--}3,0$  мкм, превышающую допустимое значение  $R_{a\text{max}} = 1,9$  мкм.

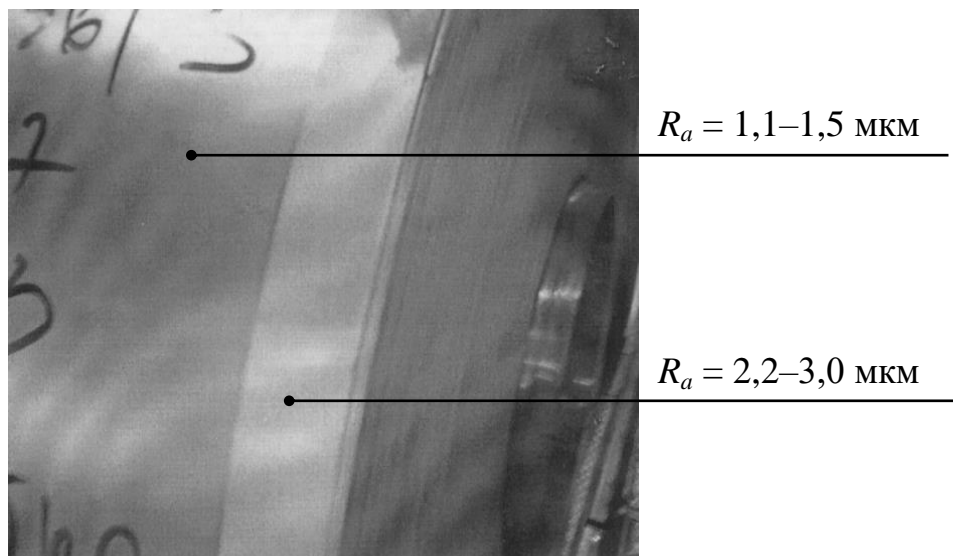


Рисунок 6.5 – Светлые прикромочные полосы на наружной поверхности рулона холоднокатаной полосы толщиной 0,7 мм и шириной 1560 мм из марки стали 08Ю

Выполненный анализ показал, что из-за конструктивных особенностей валкового узла (бочки опорных валков имеют концевые скосы 100 мм, длина бочек опорных валков  $L_{оп} = 1600$  мм меньше длины бочек рабочих валков на 100 мм) на участках скосов опорного валка давление на рабочий валок со стороны опорного меньше в сравнении с зоной бочки опорного валка между скосами. Для выявленной проблемы рассматривались два направления решения. Одно направление было связано с новым вариантом подготовки рабочих валков в клети № 5 с переменной шероховатостью по длине бочки, что требовало дополнительные эксплуатационные расходы и существенного увеличения времени подготовки валков к прокатке. Другое решение было направлено на устранение самой причины – скосов по краям бочек опорных валков клети № 5, но в этом случае потребовалось синтезировать новую систему профилировок. К новой системе профилировок валков клети № 5 предъявлялись требования по обеспечению формирования поперечного профиля полосы с выполнением условия (1.2) и особо высокой плоскостности, с отклонением от плоскостности не более 5–6 мм на 1 м длины.

Применение разработанной методики выбора профилировок валков позволило обосновать увеличение выпуклости в середине бочки опорных валков без скосов с пересчетом величины выпуклости и вогнутости профилировки рабочих валков пятой клети для всего диапазона сортамента стана. При разработке профилировок валков клети № 5 в исходных данных, помимо обеспечения требуемой поперечной разнотолщинности и исключения дефектов неплоскостности полосы, было одно дополнительное условие, связанное с возможностью реализации технологического процесса прокатки самого узкого и тонкого сортамента стана – полос шириной 990–1015 мм и толщиной 0,28 мм без контакта краев бочек верхнего и нижнего рабочих валков. Это условие состоит в том, что разность толщины полосы в середине  $h_c$  и расстояния между краями бочек верхнего и нижнего рабочих валков  $h_{кр.б}$  должна быть меньше номинальной толщины полосы  $h_{ном}$ :

$$h_c - h_{кр.б} < h_{ном}. \quad (6.1)$$

Условие обеспечения поперечной разнотолщинности  $\delta h_{поп}$  соответствовало (1.2).

Учитывая практический опыт, выпуклость опорного вала (разность диаметров в середине и у края бочки) рассматривалась в диапазоне  $\Delta D_{ш.оп} = 0,3–0,6$  мм, рабочих валков –  $\Delta D_{ш.р} = -0,1–+0,5$  мм. Согласно методике (рисунок 3.30) для каждого варианта кривую упругой деформации, определяемую на основе конечно-элементной модели, учитывающей профилировки валков, геометрически суммировали с кривой теплового профиля для определения поперечного профиля полосы с проверкой условий (1.2) и (6.1). Для режима прокатки полосы размером 0,28x1015 мм из марки стали 08пс в клетки № 5 с силой прокатки  $P = 11,3$  МН в таблице 6.1 приведены результаты проверки этих условий.

Таблица 6.1 – Условия (1.2) и (6.1) при  $\Delta D_{ш.оп} = 0,6$  мм и  $\Delta D_{ш.р} = 0,1–0,4$  мм при прокатке полосы размером 0,28x1015 мм из марки стали 08пс в клетки № 5 с силой прокатки  $P = 11,3$  МН

Проверяемые условия	$\Delta D_{ш.р}$ , мм					
	0,1	0,15	0,2	0,3	0,35	0,4
$h_c - h_{кр.б}$ , мм	0,269	0,250	0,198	0,102	0,048	-0,003
$\delta h_{поп}$ , мм	0,0625	0,0516	0,0411	0,0203	0,00917	0,00471

Как видно из таблицы 6.1, условие (6.1) выполняется уже при  $\Delta D_{ш.р} = 0,1$  мм, а условие (2.2) – при  $\Delta D_{ш.р} = 0,4$  мм. Аналогично для других позиций сортамента, прокатываемого на стане, были определены профилировки рабочих валков при разных выпуклостях опорных. Для учета исходной поперечной разнотолщинности горячекатаного проката рассматривалась возможность частичной компенсации разности между фактической выпуклостью и требуемой по условию равенства вытяжек по ширине с помощью системы гидроизгиба рабочих валков. Кроме того, рассматривалось и влияние износа выпуклости

опорных валков. В результате многовариантного моделирования была предложена новая система профилировок валков клетки № 5 (таблица 6.2). В начале кампании опорных валков без скосов при прокатке полос шириной более 1100 мм требуются рабочие валки с вогнутой профилировкой. По мере износа опорных валков вогнутость уменьшают и в конце их кампании используют рабочие валки с выпуклостью 0,2 мм.

Таблица 6.2 – Профилировки рабочих валков клетки № 5 в зависимости от ширины полосы и межперевалочной кампании валков  $\Delta D_{ш.р}$ , мм (выпуклость опорных валков  $\Delta D_{ш.оп} = 0,6$  мм)

Ширина полосы, мм	Менее 1100	1100–1280	Свыше 1280
Начало кампании опорных валков	+0,1	–0,05	–0,1
Конец кампании опорных валков	+0,3	+0,2	+0,2

Промышленные испытания новой системы профилировок клетки № 5 с оценкой влияния на шероховатость холоднокатаных полос производились в течение трех месяцев.

За этот период в клетки отработали четыре межперевалочные кампании опорных валков. Нарботка за кампанию, в зависимости от качества материала валков и сложности сортамента, составила от 30 тыс. т до 50 тыс. т. В конце кампании первоначальная выпуклость бочек опорных валков уменьшалась за счет износа до 0–0,15 мм. При этом после установки в клеть № 5 опорных валков с новой профилировкой при прокатке отсутствовали светлые полосы вблизи кромок полос шириной свыше 1400 мм. От начала и до конца кампании опорных валков показатель  $R_a$  по всей ширине полос находился в диапазоне 1,5–1,8 мкм, разница значений  $R_a$  в средней части и вблизи кромок не превышала 0,2–0,23 мкм,

следовательно, широкий листовой прокат автомобильного сортамента стал полностью удовлетворять по шероховатости техническим условиям автомобильных заводов. В части влияния на формоизменение проката в период испытаний отсутствовало увеличение отсортировки металла по неплоскостности. На основании результатов промышленного опробования выпуклые профилировки опорных валков без скосов измененные выпуклости (вогнутости) рабочих валков для клетки № 5 пятиклетевого стана 1700 были приняты к постоянному использованию в производстве.

*Профилировки рабочих валков чистовой группы стана 2000 и исполнение скоса на краю бочки опорных валков.* Еще одним результатом применения разработанной методики стало внедрение на стане горячей прокатки 2000 ПАО «Северсталь» скорректированных вогнутых профилировок валков чистовой группы, обеспечивающих выполнение жестких требований к поперечному профилю горячекатаного подката для холоднокатаных полос автомобильного сортамента – возможности получения поперечной выпуклости горячекатаного подката, не превышающей 1 % от средней толщины полосы.

Значения профилировочной вогнутости рабочих валков чистовых клеток стана 2000 не были привязаны к конкретным маркам сталей, ширинам и толщинам прокатываемых полос, следовательно, они являлись эмпирическими, усредненными для всего сортамента стана. Исходя из этого, корректировка профилировок была выполнена усредненной, чтобы не увеличивать число перевалок и перешлифовок валков.

Значения профилировок рабочих валков чистовой группы стана 2000, нормированные существующей технологической инструкцией и рекомендуемые значения откорректированных вогнутостей рабочих валков, приведены в таблице 6.3 (все профилировки вогнутые). Сопоставление данных табл. 2.3 показывает, что вогнутости рабочих валков в клетях № 6–9 были уменьшены на 0,05 мм, а в остальных клетях на 0,02 мм, т.е. на 10–13 % по сравнению с существующей технологией.

Таблица 6.3 – Значения вогнутости в середине бочки рабочих валков чистовых клетей стана 2000

№ клетки	6	7	8	9	10	11	12
Величина вогнутости по существующей технологии, мм	0,5	0,4	0,3	0,25	0,2	0,2 0,15	0,2 0,15
Рекомендуемая величина вогнутости, мм	0,45	0,35	0,25	0,2	0,18	0,18 0,13	0,18 0,13

Указанные мероприятия, совместно с корректировкой межклетевых удельных натяжений в чистовой группе клетей стана 2000, связанной с увеличением их до диапазона 10–15 % от условного предела текучести материала полосы, позволили снизить значение поперечной разнотолщинности горячекатаных полос толщиной 2,0–5,0 мм, из которых прокатывают полосы автомобильного сортамента толщиной 0,6–2,0 мм, с 0,04–0,1 мм до 0,02–0,06 мм без ухудшения их плоскостности.

Кроме того, на основе моделирования напряженного состояния опорных валков системы кварто стана 2000 и соблюдения условия совпадения ширины прокатываемых полос, доля которых наибольшая в сортаменте широкополосного стана горячей прокатки 2000 ПАО «Северсталь», с длиной контакта рабочего и опорного валков, разработаны и внедрены рекомендации по шлифовке опорных валков чистовой группы с длиной скосов  $l_{\text{ск}} = 300$  мм и глубиной  $h_{\text{ск}}$  до 1 мм (рисунок 6.6).

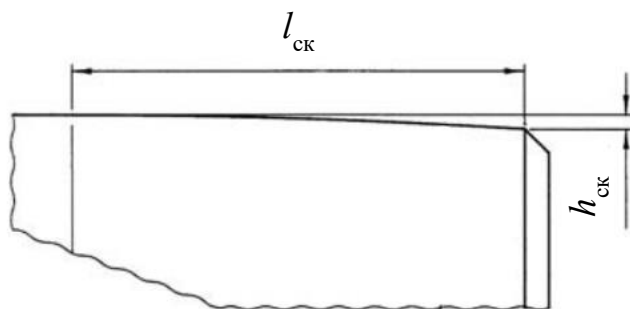


Рисунок 6.6 – Исполнение скоса на краю бочки опорного валка



Учитывая, что на непрерывном широкополосном стане 2000 в среднем разница между начальной шириной сляба и шириной полосы, составляет 50 мм, для снижения напряжений в начале скосов при шлифовке опорных валков черновой группы предложено увеличить длину скосов  $l_{ск}$  до 350 мм, глубину скосов оставив, как и при шлифовке валков для чистовой группы стана.

### **6.3 Апробирование и внедрение решений рациональной эксплуатации валков, определяющих процесс формообразования широких стальных полос при прокатке**

#### **6.3.1 Апробирование и внедрение новых требований к эксплуатации опорных валков непрерывного широкополосного стана горячей прокатки**

Практическая реализация разработанного методологического подхода, базирующегося на концепции учета разной интенсивности работы опорных валков по клетям непрерывного стана, позволила опробовать и внедрить в условиях непрерывного широкополосного стана горячей прокатки 2000 новые требования к эксплуатации опорных валков, а также изменить параметры составления графика прокатки, направленные на увеличение производительности стана и наработки рабочего слоя валков, а также на снижение их расхода.

Анализ работы парка опорных валков за период с января 2020 г. по март 2021 г. включал измерение твердости и износа бочек после прокатных кампаний, определение по актуальным данным со стана параметров интенсивности работы по клетям стана (таблица 4.1), объем полос разной ширины за прокатную кампанию (таблица 4.2) и комплексного коэффициента съема металла  $k_i$  для каждой  $i$ -ой клетки стана и его составляющих по формулам (4.9)–(4.10). На рисунке 6.7 проиллюстрирована динамика изменения комплексного коэффициента съема  $k$  22-х прокатных кампаний по клетям стана.

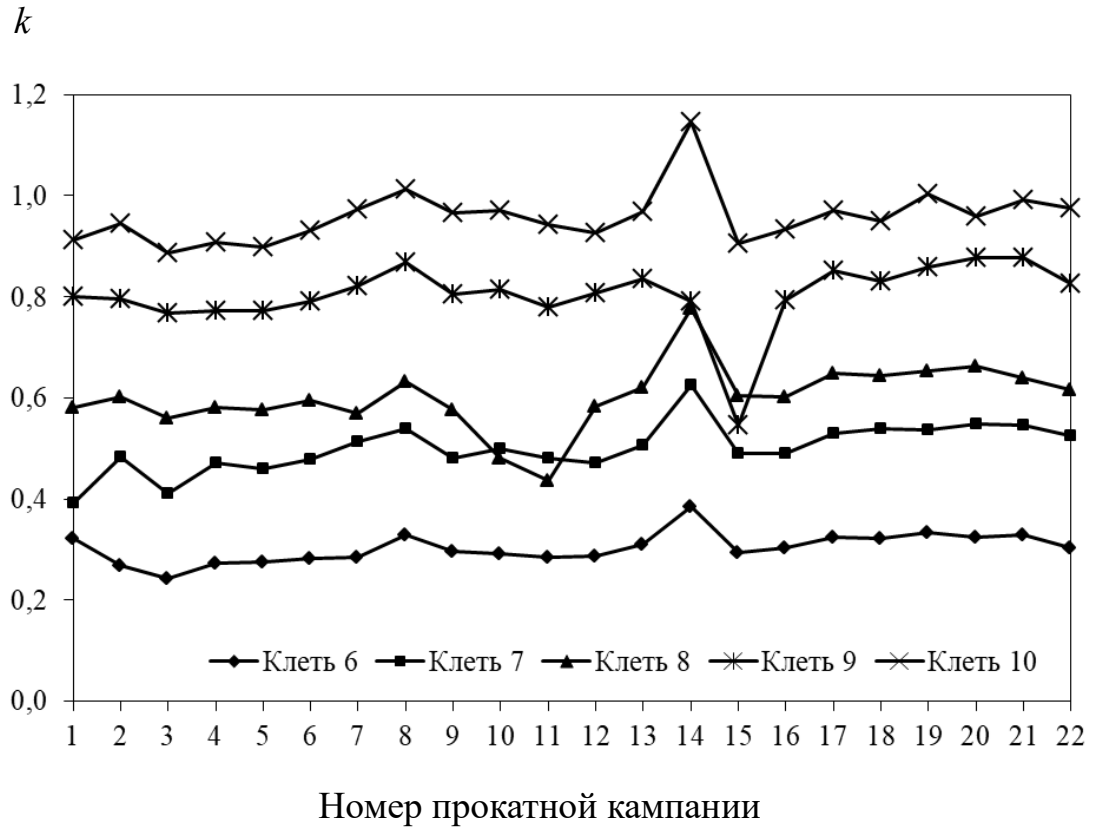


Рисунок 6.7 – Динамика изменения комплексного коэффициента  $k$  22-х прокатных кампаний по клетям стана

Из рисунка 6.7 видно, что от кампании к кампании происходят колебания значений коэффициента дифференцированного съема. Снижение значения  $k$  в отдельных клетях, например в клетях № 8 в 11-ой кампании, в клетях № 9 в 15-ой кампании объясняется ограничением их работы в этот период, а рост  $k$  в 14-ой кампании по клетям стана вызван ограничением работы в ней базовой клетки № 11. Все это показало целесообразность использования при назначении съема при шлифовке рассчитанного текущего актуального значения коэффициента съема за кампанию.

С июня 2020 г. осуществлялось опробование дифференцированного съема при шлифовке двух валков чистовой группы. Выполненные 14-ть установок

валков в клетки чистовой группы с последующим дифференцированным съемом и контролем упрочнения и износа бочек показали, что дифференцированный съем не приводит к росту износа и обеспечивает снижение значения твердости бочки после шлифовки.

По результатам опробования величины съема при шлифовке, учитывающей интенсивность работы опорного валка в клетки стана, и алгоритмов определения упрочнения и износа бочки опорных валков (рисунки 4.17 и 4.20) разработан и с марта 2021 г. внедрен такой программный инструмент, как онлайн-приложение, позволяющий оперативно обрабатывать информацию об эксплуатации опорных валков чистовой группы. Онлайн-приложение за выбранный период выдает результаты обработки прокатной кампании участку подготовки валков производства плоского проката листопрокатного цеха № 2 ПАО «Северсталь» (рисунок 6.8) – значения коэффициентов съема по клетям и значения самих съемов при перешлифовке валков.

Дифференцированный коэффициент съема валков

18.02.2021 00:00 - 04.03.2021 23:59

№ клетки	Плановый коэффициент дифф. съема	Расчетный коэффициент по километражу	Расчетный коэффициент по числу нагрузок	Плановый съем при шлифовке, мм
6	0.3	0.3081	0.3256	1.0643
7	0.5	0.5174	0.5355	1.7504
8	0.6	0.6082	0.5872	1.9194
9	0.8	0.8503	0.8337	2.7251
10	0.9	0.9973	0.9781	3.1971
11	1	0	0	3.2686
12	1	0	0	3.2686

Общий вес 261490.0867 тн.

Рисунок 6.8 – Результаты расчета коэффициентов дифференцированного съема в онлайн-приложении информационно-вычислительного центра

Результаты моделирования и оценка практических параметров работы опорных валков черновой группы стана показали, что использование дифференцированного съема, основанного на учете многоциклового нагружения,

для черновой группы стана будет являться нерациональным. Средние значения данных 10-ти кампаний при  $Q_{cp} = 520$  тыс. т составили:  $N_2 = 19\,500$ ,  $L_{п2} = 380$  км;  $N_3 = 30\,333$ ,  $L_{п3} = 610$  км;  $N_4 = 51\,333$ ,  $L_{п4} = 1105$  км;  $N_5 = 72\,500$ ,  $L_{п5} = 1450$  км. Такое нагружение является незначительной цикловой нагрузкой, поэтому после эксплуатации валков в черновой группе предложено выполнять минимально возможный съем, устраняя износ и дефекты поверхности.

Для реализации решения по увеличению объема кампаний опорных валков была выполнена оценка параметров состояния их поверхностного слоя с учетом глубины расположения максимальных напряжений (рисунок 4.7, б) по клетям стана, величины дифференцированного съема и оставшейся глубины слоя (мм) с суммарной наработкой.

В таблице 6.4 приведены сводные результаты расчета наработки опорных валков в км прокатанных полос и циклах нагружения по всем клетям стана при тоннажах кампаний от 250 тыс. т до 400 тыс. т. Величина съема при шлифовке определяется по формулам (4.11) и (4.12). Коэффициенты съема по клетям приняты равными  $k_{12} = k_{11} = 1$ ;  $k_{10} = 0,9$ ;  $k_9 = 0,8$ ;  $k_8 = 0,6$ ;  $k_7 = 0,5$ ;  $k_6 = 0,3$ . Анализ данных этой таблицы позволяет сделать следующий вывод о возможных ограничениях при эксплуатации опорных валков с дифференцированным съемом в зависимости от клетки стана: при увеличении объема прокатных кампаний (выше 300 тыс. т) для исключения наработки рабочего слоя более 19 тыс. км или более  $4 \cdot 10^6$  циклов нагружения следует не допускать повторной установки валков в клетки № 11 и / или № 12, валки после работы в этих клетях рекомендуется установить в клетки № 6–8.

Результаты выполненных исследований позволили сформулировать окончательное решение по допустимому объему кампании опорных валков с практическими рекомендациями, направленными на увеличение производительности стана 2000 и снижение расхода опорных валков. Суть практических рекомендаций заключается в следующем:

Таблица 6.4 – Результаты расчета наработки валков (км) и оставшейся глубины слоя с наработкой (мм) по всем клетям стана при разных тоннажах кампаний с дифференцированной величиной съема

Тоннаж, тыс. т	Первая установка в клеть					Вторая установка в клеть	
	Наработка слоя $L_{n1}$ , км / $N \cdot 10^6$	Величина съема на радиус, мм	Радиальный износ (зона Б), мм	Глубина максимальных напряжений с учетом износа, мм	Оставшаяся глубина слоя с наработкой $L_{n1}$ , мм	Наработка слоя $L_{n2}$ , км / $N \cdot 10^6$	Оставшаяся глубина слоя с наработкой $L_{n2}$ , мм
<b>Клеть № 12</b>							
250	7600 / 1,6	1,56	0,23	4,23	2,67	15200 / 3,2	1,11
300	9100 / 1,91	1,88	0,30	4,30	2,43	18200 / 3,82	0,55
350	10700 / 2,25	2,19	0,37	4,37	2,18	21400 / 4,5	0,00
400	12200 / 2,56	2,50	0,44	4,44	1,94	24400 / 5,12	-0,56
<b>Клеть № 11</b>							
250	7000 / 1,45	1,56	0,23	4,43	2,87	14000 / 2,9	1,30
300	8400 / 1,76	1,88	0,31	4,51	2,63	16800 / 3,52	0,76
350	9800 / 2,04	2,19	0,39	4,59	2,40	19600 / 4,08	0,21
400	11200 / 2,33	2,50	0,47	4,67	2,17	22400 / 4,66	-0,33
<b>Клеть № 10</b>							
250	6000 / 1,24	1,48	0,16	4,56	3,08	12000 / 2,48	1,59
300	7200 / 1,48	1,78	0,22	4,62	2,84	14400 / 2,96	1,06
350	8300 / 1,73	2,08	0,28	4,68	2,60	16600 / 2,46	0,53
400	9500 / 1,98	2,38	0,34	4,74	2,37	19000 / 3,96	-0,01
<b>Клеть № 9</b>							
250	4400 / 0,94	1,25	0,22	4,92	3,67	8800 / 1,88	2,42
300	5300 / 1,12	1,50	0,27	4,97	3,47	10600 / 2,24	1,97
350	6200 / 1,31	1,75	0,31	5,01	3,26	12400 / 2,62	1,51
400	7100 / 1,5	2,00	0,36	5,06	3,06	14200 / 1,5	1,06
<b>Клеть № 8</b>							
250	3200 / 0,67	0,94	0,19	4,89	3,95	6400 / 1,34	3,02
300	3800 / 0,81	1,13	0,24	4,94	3,82	7600 / 1,62	2,69
350	4500 / 0,94	1,31	0,29	4,99	3,68	9000 / 1,88	2,37
400	5100 / 1,08	1,50	0,34	5,04	3,54	10200 / 2,16	2,04
<b>Клеть № 7</b>							
250	2200 / 0,45	0,78	0,20	5,60	4,82	4400 / 0,9	4,04
300	2600 / 0,55	0,94	0,24	5,64	4,71	5200 / 1,1	3,77
350	3000 / 0,64	1,09	0,29	5,69	4,60	6000 / 1,28	3,50
400	3450 / 0,73	1,25	0,33	5,73	4,48	6900 / 1,46	3,23
<b>Клеть № 6</b>							
250	1330 / 0,27	0,47	0,13	5,43	4,96	2660 / 0,54	4,49
300	1600 / 0,33	0,56	0,21	5,51	4,94	3200 / 0,66	4,38
350	1840 / 0,38	0,66	0,28	5,58	4,92	3680 / 0,76	4,27
400	2100 / 0,44	0,75	0,36	5,66	4,91	4200 / 0,88	4,16

*1 рекомендация.* В чистовой группе клетей наработка на опорных валках между перевалками может быть увеличена на 50 тыс. т – с 300 тыс. т до 350 тыс. т, что соответствует прокатке ~10 700 км полосы в клети № 12. Упрочнение бочки в последних клетях стана не превысит 8 *HSD*, износ не превысит 0,12-0,16 мм на радиус. В этом случае можно сохранить существующую величину съема [168] – три установки опорного валка с перешлифовками 2 мм и четвертая установка с дальнейшим профилактическим съемом, обеспечивающим 1 мм рабочего слоя на 80 000 т, прокатанных на валке. При этом рекомендуется исключать два раза подряд установку валков, как в клеть № 12, так и в № 11. После установок в клети № 11 и № 12 рекомендуется установить валки в клети № 6–№ 8.

В этом случае только для чистовой группы клетей можно уменьшить количество перевалок валков в год на 6-ть – с 26-ти перевалок до 20-ти, что позволит увеличить объем производства на стане в год не менее чем на 50 тыс. т, а также снизить производственные затраты, связанные с эксплуатацией валков.

В черновой группе клетей, с точки зрения многоциклового нагружения, можно существенно увеличить тоннажность кампаний опорных валков – с 550 тыс. т до 800–900 тыс. т, что соответствует длине прокатываемого раската в 2240-2520 км в клети № 5 в сравнении с существующей периодичностью перевалки 550 тыс. т при прокатке ~ 1540 км. При этом важно исключить при длительной кампании возникновение дефектов поверхности из-за попадания в межвалковый контакт, например частиц окалины, продуктов износа валков и др. Учитывая, что предел выносливости материала рабочего слоя опорного валка 980 МПа, а продолжительность стадии многоциклового усталости соответствует прокатке 19 тыс. км проката и километраж опорных валков черновой группы при прокатке 900 тыс. т не превысит 2600 км, то многоцикловая усталость не будет являться определяющей. Поэтому при наличии после прокатки дефектов поверхности, выполняемый съем должен обеспечить выведение дефектов и составлять не менее 1 мм рабочего слоя на 80 000 прокатанных на валке тонн, что позволит удалить

слои, испытывавшие максимальные напряжения при прокатке. При отсутствии дефектов поверхности можно назначить съём чуть меньше – 6–8 мм на диаметр.

*2 рекомендация.* Осуществлять подготовку опорных валков к эксплуатации с выполнением дифференцированного съема по клетям чистовой группы с использованием разработанного программного инструмента, позволяющего рассчитать коэффициенты съема по клетям стана за кампанию опорных валков на основе данных из системы контроля производства в зависимости от прокатанного километража / циклической нагрузки. Это позволит увеличить наработку рабочего слоя опорного валка не менее чем на 10 % без увеличения степени наклепа и износа бочки, а также обеспечит снижение расхода опорных валков. Экономия рабочего слоя за одну кампанию в среднем по всем валкам чистовой группы составит 16,4 мм (27 %), за 20-ть кампаний – 330 мм.

Использование дифференцированного съема, основанного на учете многоциклового нагружения, для черновой группы будет являться непродуктивным.

*3 рекомендация.* Реализация и внедрение подготовки опорных валков к эксплуатации с выполнением дифференцированного съема по клетям чистовой группы позволит увеличить массу прокатанного металла между перевалками до 400 тыс. т, что соответствует прокатке ~12 200 км полосы в клетки № 12. Поскольку упрочнение бочки опорного валка в последних клетях стана возрастет и несколько превысит 8 HSD, только дифференцированный съём позволит своевременно удалять слои со значительной нагрузкой, соответствующей наработке свыше 19 тыс. км.

При всех изложенных рекомендациях обязательным является строгий контроль твердости после прокатки и шлифовки опорных валков, что и так в настоящее время выполняется на стане.

На основании выполненного комплексного исследования были внесены и внедрены предложения по изменению требований к эксплуатации валков и особенностей эксплуатации опорных валков стана, а также по изменению

требований к составлению графика прокатки в соответствующие технологические инструкции стана 2000.

### 6.3.2 Реализация мероприятий по рациональной эксплуатации рабочих валков непрерывного стана холодной прокатки

Для повышения эффективности технологического процесса непрерывной холодной прокатки на 4-клетовом стане 2100 ПАО «Северсталь» помимо разработки и внедрения новой асимметричной выпукло-вогнутой профилировки рабочего валка рассматривался вопрос снижения расхода рабочих валков. На стане применяются цельнокованные рабочие валки с содержанием хрома в валковой стали 3–5 %, с постоянной твердостью по всей глубине рабочего слоя 89–92 *HSD* и минимальным разбросом твердости по длине бочки, равным 1–2 *HSD*.

Контроль количества снимаемого металла при шлифовках, а также числа перевалок валков дает возможность оценить расход валков и выявить резервы повышения производительности станов холодной прокатки. После реконструкции, в первый год эксплуатации стана в 2017 г., фиксировалось значительное число повреждений бочек рабочих валков, а также отмечался значительный расход валков [283]. На рисунке 6.9 представлено распределение перевалок рабочих валков за 2017 г. по клетям стана 2100. Видно, что больше всего перевалок в клетке № 1 – 1408 перевалок, из них 56 % было выполнено по дефектам поверхности, включая надав, отпечаток, порез, оков, навар, отслоение, а также из-за пробуксовки и перегрева.

Для сравнения на 5-клетевом стане 1700 (рисунок 6.10) в первой клетке было проведено 949 перевалок, из них только 35 % было связано с пробуксовкой и перегревом валков. Большое число перевалок в клетке № 5 стана 1700 связано с необходимостью формирования шероховатости поверхности полосы и требуемого профиля в условиях отсутствия осевой сдвижки.





Рисунок 6.9 – Число перевалок рабочих валков за 2017 год  
4-клетевого стана 2100

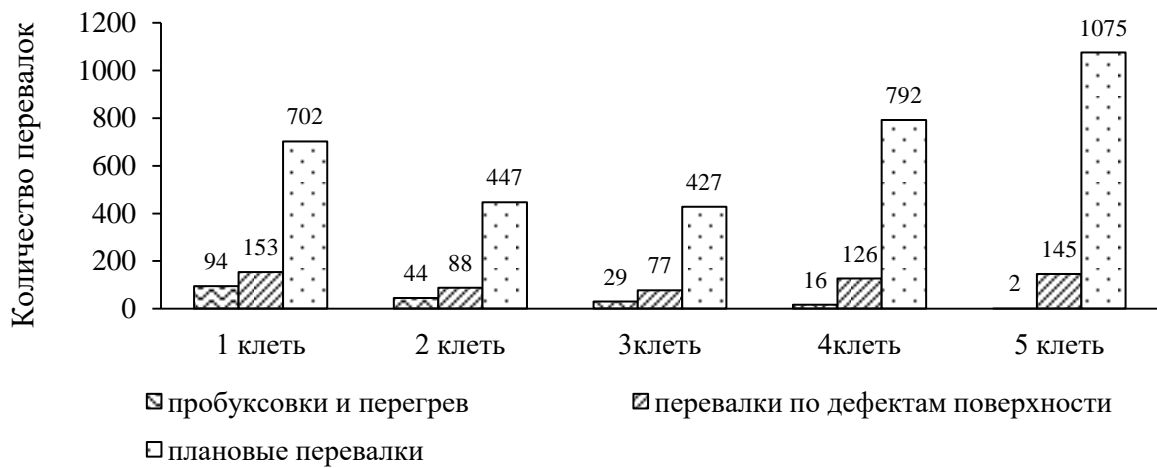


Рисунок 6.10 – Число перевалок рабочих валков за 2017 год  
5-клетевого стана 1700

Анализ за 2017 г. величины среднего съема металла с рабочих валков при одной шлифовке показал, что на 4-клетевом стане он на 30 % выше, чем на 5-клетевом и составляет 0,92 мм, когда на 5-клетевом стане он равен 0,65 мм. Аналогичная ситуация была и по расходу валков – на 4-клетевом стане – 0,624 кг/т, 5-клетевом – 0,44 кг/т.

Для повышения стойкости и снижения расхода валков 4-клетевого стана в 2018 году было реализовано ряд мер [280]:

а) снижение на 6 % доли тонкого проката толщиной менее 0,65 мм с одновременным увеличением сортамента толщиной от 0,65 мм включительно и выше;

б) применение только хромированных валков в клетях № 1 и № 2;

в) внедрение новой выпукло-вогнутой профилировки рабочих валков (рис. 1.42);

в) усовершенствование системы охлаждения стана, поскольку при шлифовках рабочих валков клетей № 1–№ 3 фиксировался их перегрев.

Использование, начиная с августа 2018 г., новой профилировки рабочих валков при регулировании профиля полосы шириной от 980 мм до 1100 мм позволило уменьшить диапазон осевой сдвижки в 1,2 раза с большим обжатием в середине профиля полосы и меньшим обжатием кромок. Это дало возможность снизить местные контактные давления между валками и полосой на участках боковых кромок, а также риски появления порезов.

Усовершенствование системы охлаждения 4-клетевого стана включало изменение конструкции коллекторов на входе клетей № 1–№ 3 с однорядных на двухрядные с возможностью подачи эмульсии не только в очаг деформации, но и на бочку валка (рисунок 6.11). Кроме того, была внедрена позонная подача эмульсии в зависимости от ширины прокатываемой полосы: *I* – центральная секция для прокатки полос шириной до 1280 мм включительно; *II* – зоны, активизируемые при прокатке металла шириной свыше 1280 мм до 1600 мм; *III* – крайние зоны, включаемые при прокатке полос свыше 1600 мм.

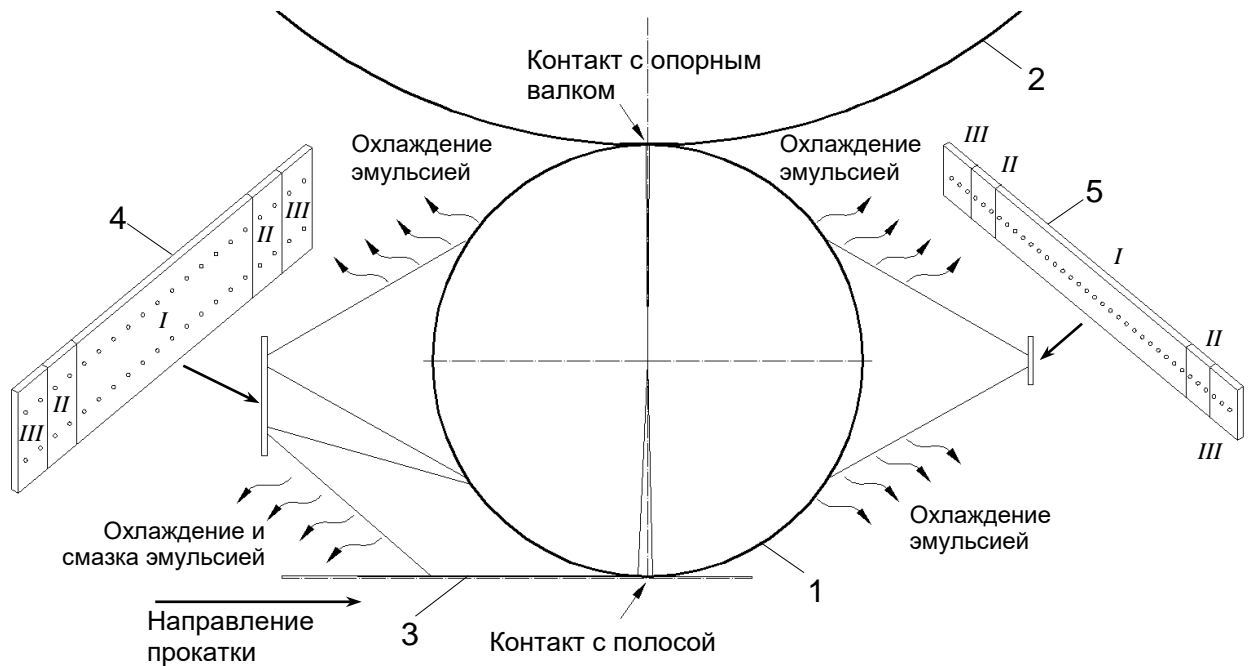


Рисунок 6.11 – Схема тепловых граничных условий рабочего валка:

- 1 – рабочий валок; 2 – опорный валок; 3 – полоса;  
4, 5 – входной и выходной коллекторы

Как отмечается в литературе [14, 95, 116, 144], двустороннее охлаждение необходимо применять при тяжелых условиях работы валков, что подтвердилось практически на 4-клетевом стане. Также выполненная замена форсунок с увеличением их расхода во всех коллекторах клеток № 1-3 позволила повысить подачу эмульсии на 230 м<sup>3</sup>/час в каждой клетке. Плотность облива или удельный расход эмульсии на бочку рабочего валка со стороны входного коллектора составил не менее 170 м<sup>3</sup>/ (ч·м<sup>2</sup>), согласно формуле [14, 116]

$$V_{\Delta L} = \frac{Q_3}{D_p \cdot \Delta L \cdot 10^6}, \quad (6.2)$$

где  $Q_3$  – расход эмульсии, м<sup>3</sup>/ч;  $D_p$  – диаметр бочки рабочего валка, мм;  $\Delta L$  – длина зоны охлаждения валка, мм.

По данным теоретических и экспериментальных исследований конвективного теплообмена валков с эмульсией для обеспечения эффективного отвода тепла от валков значение  $V_{\Delta L}$  должно находиться в диапазоне 170–200 м<sup>3</sup>/(ч·м<sup>2</sup>), что обеспечивает высокий коэффициент теплоотдачи от валков к эмульсии, равный  $\alpha = 2200$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Дальнейшее увеличение плотности облива приводит лишь к бесполезному расходованию энергии, и рост  $\alpha$  практически прекращается. Следовательно, при полной работоспособности всех форсунок входных и выходных коллекторов, при давлении эмульсии на выходе из форсунок не менее 5 бар стал обеспечиваться высокоэффективный отвод тепла от валков.

Помимо анализа работы системы охлаждения был выполнен промышленный эксперимент по выявлению влияния величины расхода эмульсии на уровень температуры поверхности рабочих валков в конце их кампании. Рассматривалась прокатка восьми рулонов из марки стали 08пс профилеразмером 2,3→0,66×1260 мм. Измерения температуры рабочих валков в середине бочки проводились в клетях № 1–№ 3 после прокатки 4-го, 6-го и 8-го рулонов с помощью переносной тепловизионной камеры (таблица 6.5) и фиксировались режимы прокатки в системе контроля данных.

Таблица 6.5 – Характеристика и температура рабочих валков

№ клетки	Диаметр валков $D_p$ (верхних / нижних), мм	Наработка валков за кампанию, т	Температура валков (верхних / нижних), °С		
			После прокатки рулона № 4	После прокатки рулона № 6	После прокатки рулона № 8
1	458 / 457	1815	75 / 75	73 / 74	68 / 69
2	465 / 464	1815	71 / 72	69 / 70	72 / 71
3	475 / 473	1048	72 / 71	70 / 67	71 / 69

Частные относительные обжатия в клетях № 1, № 2 и № 3 при прокатке восьми рулонов были равны соответственно 40 %, 34 % и 25 %. При прокатке рулонов № 5 и № 6 расход в клетях был снижен на 16–17 %. Расход и температура эмульсии  $t_3$  при прокатке сварного шва и установившегося процесса прокатки рулонов № 4, № 6 и № 8 представлены в таблице 6.6.

Таблица 6.6 – Расход и температура эмульсии (в числителе приводятся данные при прокатке сварного шва, в знаменателе – установившегося процесса прокатки)

№ рулона	Скорость прокатки полосы $v_4$ , м/с	Расход эмульсии на клеть, $m^3/ч$				$t_3$ при подаче, °С
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	
4	<u>3,3</u>	<u>246</u>	<u>215</u>	<u>235</u>	<u>180</u>	57,0
	15	283	246	272	192	
6	<u>2,8</u>	<u>195</u>	<u>172</u>	<u>188</u>	<u>189</u>	57,9
	15,6	227	200	219	195	
8	<u>2,8</u>	<u>241</u>	<u>210</u>	<u>230</u>	<u>182</u>	57,5
	14,6	283	247	273	190	

Примечание: во время разгона и торможения расход можно считать таким же, как при установившемся процессе.

В результате промышленного эксперимента установлено, что в моменты разгона и торможения расход эмульсии в клетях такой же, как и при установившемся процессе, при прокатке шва скорость снижается в 4,5–5 раз, а расход в клетях № 1–№ 3 снижается менее чем на 15 %. При прокатке одного рулона время, затрачиваемое на разгон и торможение, в среднем составляло 95–105 с, а установившегося процесса – 165–168 с.

Сразу после вывалки валков из клетей измерения показали, что максимальная температура в середине бочки валков клетки № 1 составила 44 °С; клетки № 2 – 55 °С; клетки № 3 – 35 °С. Более высокую температуру поверхности

рабочих валков клетки № 2 можно связать со снижением расхода эмульсии в клетки № 2 примерно на 30 м<sup>3</sup>/час по сравнению с клетями № 1 и № 3.

Выполненный промышленный эксперимент также подтвердил, что на стане после усовершенствования системы охлаждения обеспечивается отвод тепла от валков без их перегрева в конце кампании рабочих валков. Дополнительно было исследовано температурное состояние рабочего валка при холодной прокатке методом конечных элементов [285], было получено соответствие результатов моделирования с данными измерений температуры поверхности рабочих валков стана холодной прокатки в промышленных условиях.

Одновременно с повышением стойкости рабочих валков 4-клевого стана в 2018 г. рассматривалось решение вопроса по снижению их расхода на основе определения оптимальной величины съема металла при шлифовке. При шлифовке рабочих валков на вальцешлифовальных станках одновременно осуществляется вихретоковой контроль с проверкой равномерности структуры валка, при этом можно различать такие дефекты, как трещины и вмятины (изменение структуры). Был выполнен сравнительный анализ глубины залегания дефекта, определяемой при вихретоковом контроле, и фактическом съеме металла при шлифовке более 600 валков. На рисунке 6.12 в качестве примера приведены результаты сравнения для 176 валков. Рассматривались дефекты порез, надав, отпечаток, пробуксовка, перегрев, риски с глубиной залегания менее 0,3 мм.

Фактический съем металла на радиус при шлифовании составлял 0,44–0,65 мм с превышением величины съема металла над глубиной дефекта на 0,2–0,5 мм. На основе этого сопоставления было предложено уменьшить съемы на рабочих валках до 0,35 мм на радиус при глубине поверхностных дефектов до 0,20 мм по показаниям вихретокового контроля. Шлифование валков с дефектами глубиной более 0,2 мм осталось по старой схеме, включая съем металла 0,5 мм на радиус. Обработка валков с дефектами навар и оков также осталась по установленной схеме – обдирка, вихретоковый и ультразвуковой контроль, полное выведение дефекта. Разность значений среднего фактического съема металла с рабочих

валков и средней глубины показаний вихретокового контроля составила 0,21 мм, до испытаний эта разность составляла 0,37 мм.

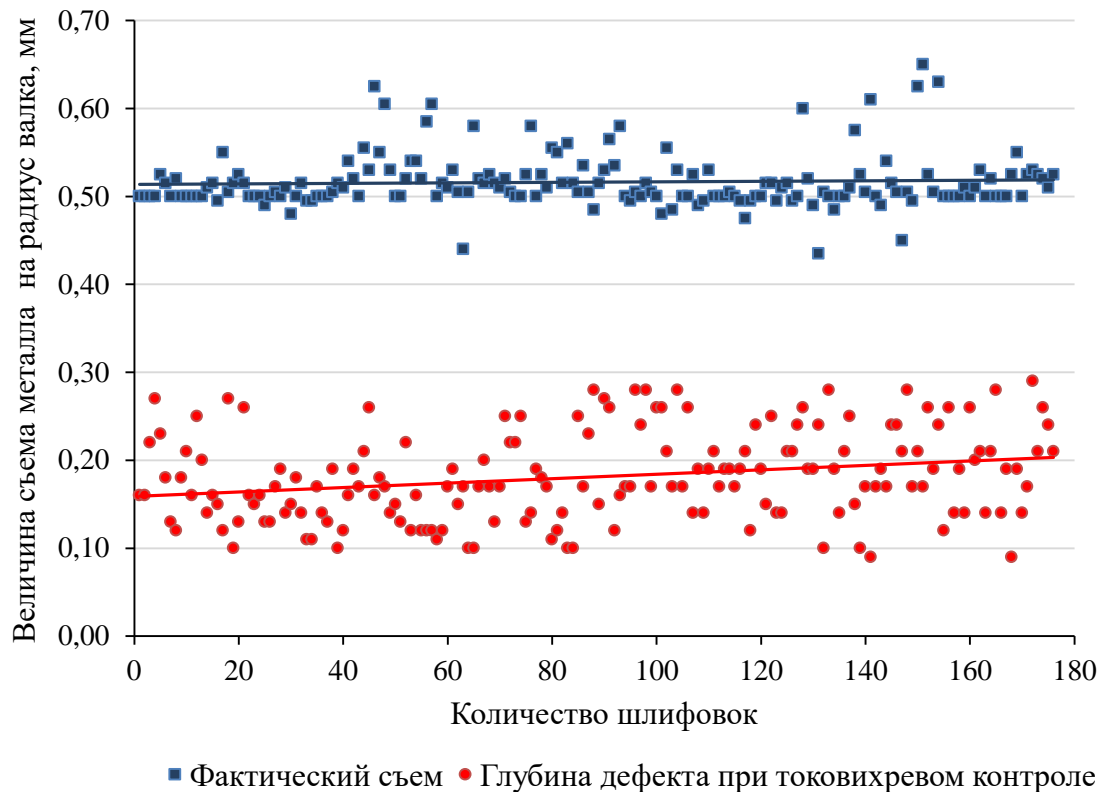


Рисунок 6.12 – Распределения величины фактического съема при шлифовке рабочих валков и глубины дефекта при вихретоковом контроле

За три месяца испытаний на стане по уменьшению количества снимаемого металла при шлифовании не было роста поверхностных дефектов рабочих валков и увеличения числа их перешлифовок, вихретоковый контроль валков не диагностировал никаких отклонений, также не было аварийных выходов из строя рабочих валков. При этом величина среднего съема металла с рабочих валков при шлифовке всех валков уменьшилась с 0,92 мм до 0,65 мм на диаметр.

В окончательном варианте применяется дифференцированный подход к величине съема металла на рабочих валках при шлифовке – при дефектах

поверхности глубиной до 0,20 мм по показаниям вихретокового контроля выполняется съем 0,3 мм на радиус, а при дефектах с глубиной от 0,21 до 0,30 мм съем составляет 0,35 мм.

Это позволило совместно с изменением схемы охлаждения рабочих валков увеличить продолжительность кампании рабочих валков, снизить повреждаемость бочек валков, а также уменьшить аварийность на стане. Расход рабочих валков 4-клетевого стана снизился на 42 % с 0,624 кг/т до 0,365 кг/т, среднее количество шлифовок рабочих валков в месяц уменьшилось с 504 до 463 шлифовок.

Оценка эффективности работы рабочих валков была выполнена по результатам анализа эксплуатационных показателей списанных валков за два года (2017 г. и 2018 г.) после реконструкции стана (таблица 6.7). Видно, что второй год эксплуатации после внедрения разработок, в сравнении с первым, характеризуется меньшим на 13 % числом аварийных отказов рабочих валков, снижением в 2 раза среднего съема металла на одну установку валка, увеличением среднего ресурса валков до списания в 1,4 раза, повышением эффективности использования закаленного слоя валков на 18 % и ростом на 20 % среднего количества установок валка в клеть.

Таблица 6.7 – Показатели эффективности использования рабочих валков 4-клетевого стана 2100

№	Наименование показателя	Период сравнения	
		Первый год	Второй год
1	Доля валков, списанных по износу, %	7	21
2	Доля валков, списанных по оковам, наварам, трещинам, отслоениям, %	92	79
3	Эффективность использования закаленного слоя валков (т/мм)	1316	1604



Продолжение таблицы 6.7

№	Наименование показателя	Период сравнения	
		Первый год	Второй год
4	Среднее количество установок валка в клеть	34	43
5	Средняя наработка рабочих валков до списания (т/валок)	44014	61760
6	Средний съем на одну установку валка в клеть, мм	2,03	1,0
7	Средняя наработка рабочих валков за одну кампанию (т/валок)	1275	1447
8	Суммарный съем металла со списанных валков, мм	5510	4701
9	Вес снятого при шлифовках металла, кг*	347 130	296 163

\*Вес одного миллиметра рабочего слоя – 63 кг

Сравнение параметров работы рабочих валков стана 2100 за два года позволило сделать вывод о положительной динамике улучшения всех показателей. Реализация мероприятий по повышению стойкости валков 4-клетевого стана позволила увеличить продолжительность их кампании, снизить повреждаемость бочек валков, а также уменьшить аварийность на стане.

#### **6.4 Разработка и внедрение технологических режимов правки горячекатаного листового проката, предназначенного для дальнейшей высокотехнологичной резки**

Установленные закономерности и принципы получения проката на роликовых правильных машинах, интегрированные в методику поиска технологических режимов правки, позволили разработать режимы знакопеременного деформирования горячекатаных полос из марок сталей различной категории прочности, пригодных для высокотехнологичной обработки.

Разработанные режимы правки полос в 13- и 17-роликовых правильных машинах, установленных в линии АПР-4, и 15-роликовой машины линии АПР-3 цеха отделки металла № 2 ПАО «Северсталь» представлены в таблице 6.8. Для всех режимов получено, что коэффициент пластификации при правке составляет 91–93 %, максимальная относительная деформация 2,2–3,0 %.

Таблица 6.8 – Режимы правки горячекатаных полос из конструкционных марок сталей

№ режима	$h$ , мм	Марка стали	Перемещения верхних роликов, мм								$k_{pl}$ , %	$\varepsilon_H$ , %	$\varepsilon_K$ , %
			$y_2$	$y_4$	$y_6$	$y_8$	$y_{10}$	$y_{12}$	$y_{14}$	$y_{16}$			
1	4	S355	4,5	3,9	3,3	2,7	2,2	1,6	1,0	0,4	91	2,2	0,2
2	6	S355	6,9	5,9	4,8	3,8	2,8	1,7	0,7	-	91	2,2	0,36
3	8	S235	6,2	5,3	4,4	3,5	2,6	1,7	0,8		91	2,2	0,41
4	8	S355	6,5	5,6	4,7	3,8	2,8	1,9	1,0	-	93	3,0	0,51
5	8	S500	7,5	5,5	4,8	3,9	3,0	2,2	1,3	-	93	2,7	0,67
6	8	S700	9,1	7,5	6,0	4,6	3,1	1,6	-	-	92	2,4	0,66
7	9	S355	7,0	6,0	5,1	4,1	3,1	2,2	1,2		93	2,7	0,62
8	10	S355	8,0	6,7	5,3	4,0	2,6	1,3	-	-	91	2,2	0,54
9	12	S355	7,3	6,1	5,0	3,8	2,7	1,5	-	-	92	2,5	0,62
10	12	S700	8,2	6,9	5,6	4,4	3,1	1,8	-	-	91	2,3	0,75
11	14	S355	6,8	5,8	4,7	3,7	2,6	1,6	-	-	92	2,4	0,66
12	16	S355	6,6	5,7	4,7	3,8	2,8	1,9	-	-	92	2,4	0,79

На рисунке 6.13 в качестве примера представлены результаты определения показателей правки полосы толщиной 4 мм из марки стали S355MC в 17-роликовой правильной машине по разработанному режиму ( $y_2 = 4,5$  мм и  $y_{16} = 0,4$  мм, скорость правки 1 м/с). Пластификация полосы составила  $k_{pl} = 91$  %, относительные пластические деформации при правке на входе  $\varepsilon_H = 2,2$  %, на выходе  $\varepsilon_K = 0,2$  %. После правки остаточные продольные напряжения в листе не превышают 80 МПа, а остаточная энергия – 0,26 Дж.

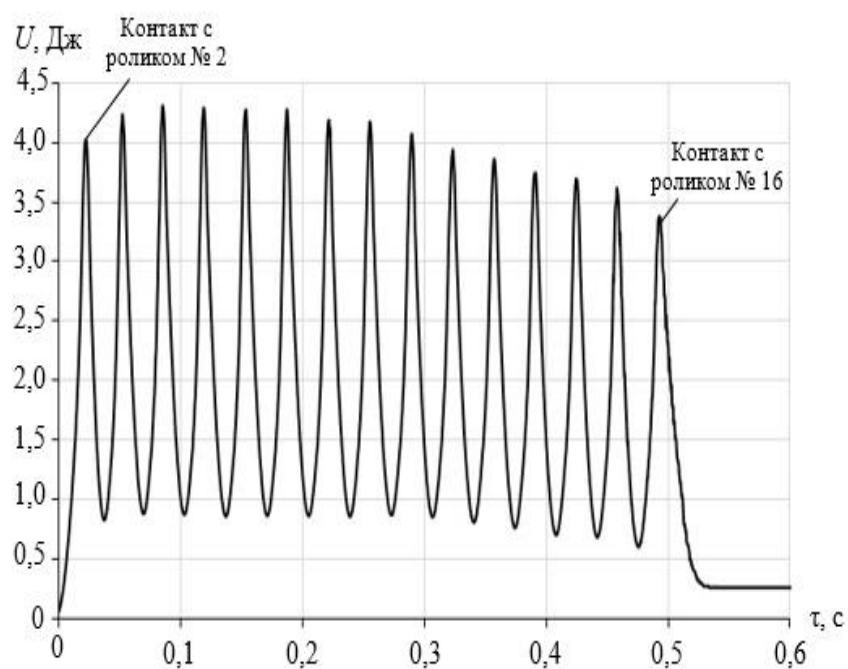
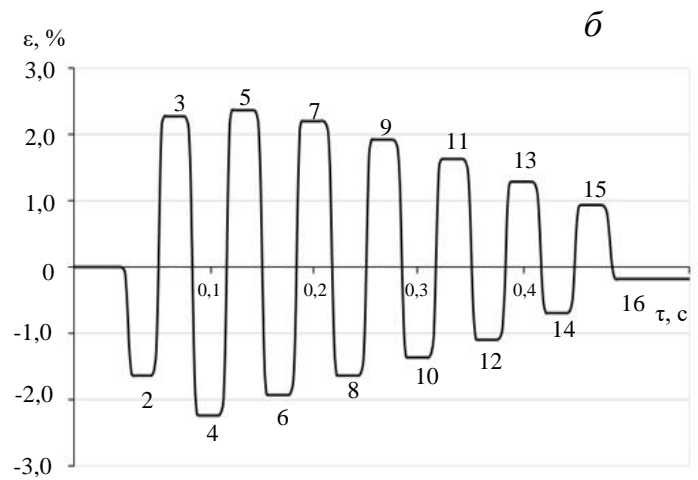
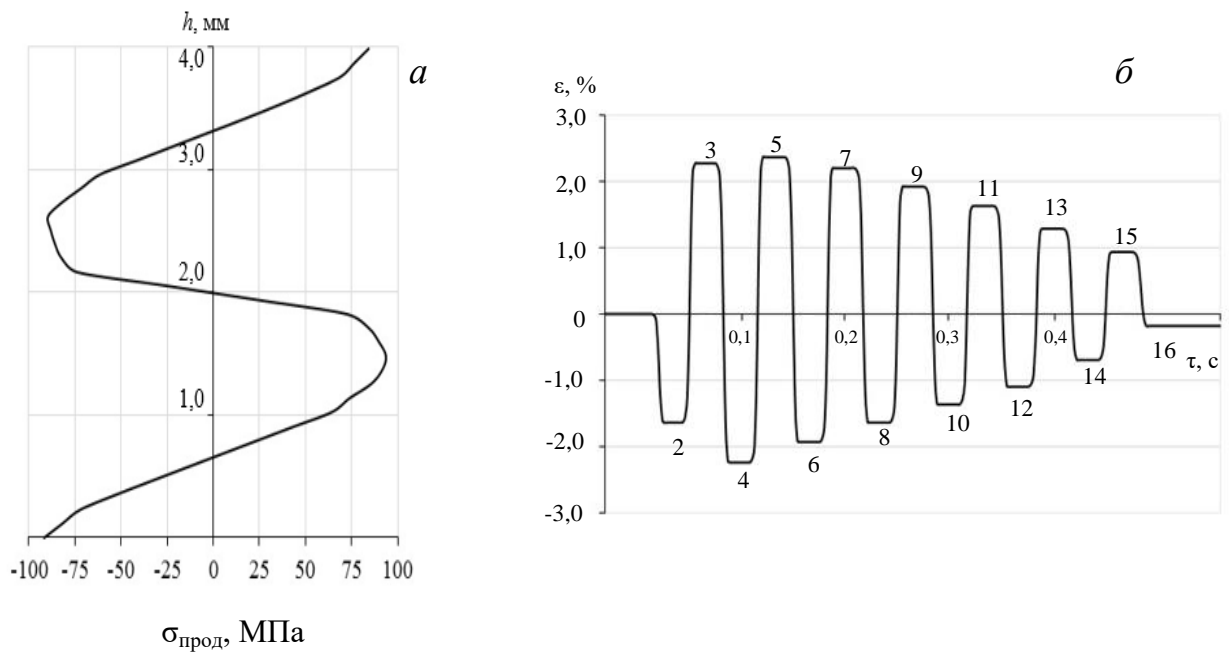


Рисунок 6.13 – Результаты определения показателей правки полосы толщиной 4 мм: *a* – распределение продольных напряжений после правки; *б* – относительные продольные пластические деформации верхнего поверхностного волокна (цифрами от 2 до 16 обозначены номера роликов); *в* – изменение потенциальной энергии деформации

Так же были определены показатели правки для всех настроек роликовых правильных машин (таблица 6.8). Графики продольных пластических деформаций всех режимов характеризовались плавным убыванием при правке, а графики остаточных напряжений – уравновешенным распределением по толщине.

Дополнительно были выполнены промышленные исследования по влиянию неплоскостности полос после горячей прокатки, измеренной системой Sipro (рисунок 6.14), на последующую правку и плазменную резку. Система Sipro установлена после клетки № 12 непрерывного широкополосного стана 2000 ПАО «Северсталь». Принцип измерения формы полосы основан на ослаблении интенсивности рентгеновского излучения при прохождении через измеряемый материал [286].

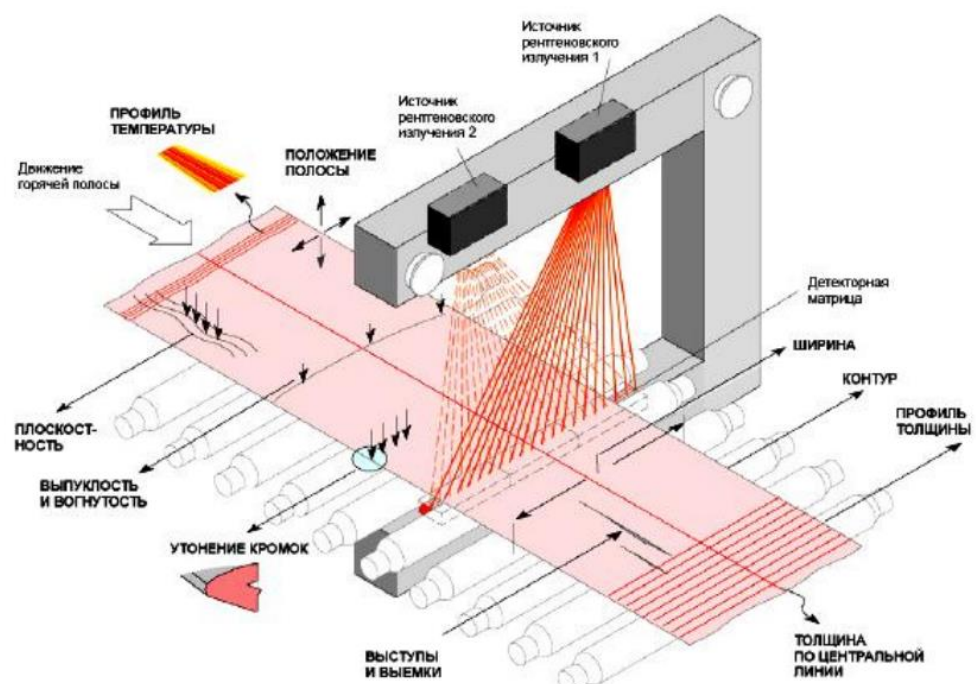


Рисунок 6.14 – Измерение профиля и формы горячекатаной полосы

При измерении профиля и формы используются два источника рентгеновского излучения, располагаемые над полосой, и ряд детекторов, расположенных под полосой и воспринимающих рентгеновское излучение после прохождения через полосу. По уменьшению интенсивности излучения с помощью калибровочной характеристики определяют толщину измеряемого материала. Калибровочной характеристикой является номинальная толщина полосы. Два источника излучения с возможностью быстрого переключения их в противофазе позволяют получить стереоскопическое изображение формы полосы (рисунок 6.15).

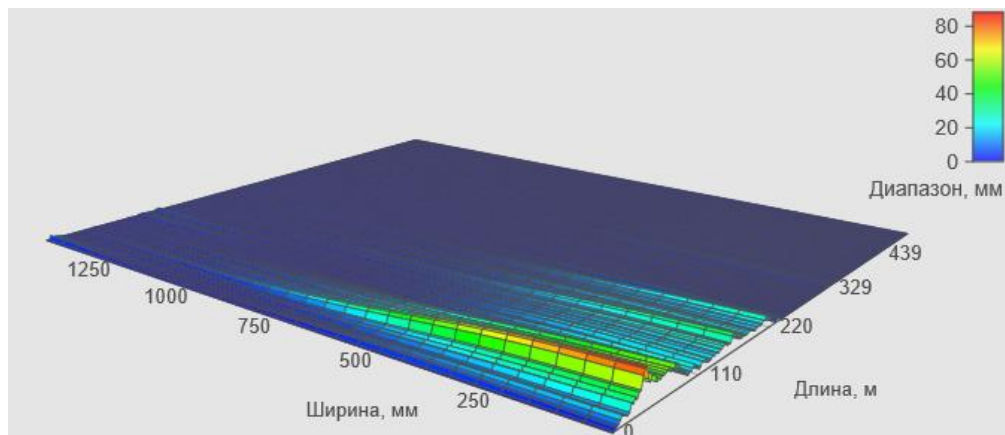


Рисунок 6.15 – Стереоскопическое изображение формы полосы толщиной 4 мм и шириной 1500 мм, полученная из системы Sipro

Особенность измерения системы Sipro состоит в следующем. При движении головного участка полосы до моталки измерение происходит без натяжения. При нестабильном движении переднего участка полосы могут фиксироваться существенные отклонения формы от плоскостности. На рисунке 6.15 это проиллюстрировано – имеются отклонения от плоскостности со стороны привода. После заправки полосы в моталку с появлением натяжения процесс измерения формы стабилизируется.

Выполненные эксперименты по порезке плазмой и лазером горячекатаных листов, а также проведение дополнительных экспериментов по порезке листов разной толщины с фиксацией и анализом данных по неплоскостности системы Sipro, позволили сформулировать вывод, что прокат, предназначенный для высокотехнологичной резки, должен иметь среднее значения отклонений от плоскостности, рассчитанное системой Sipro, на участке измерений без натяжения – до 10 мм, на остальной части с натяжением – до 2 мм. В противном случае перед правкой следует доработать рулоны на дополнительном перемоточном агрегате, имеющем роликовые правильные машины для снижения неплоскостности.

По полученным режимам таблицы 6.8 в мае – июле 2019 г. выполнялась опытная правка полос шириной 1500 мм. От каждого рулона отбирались листы на расстоянии 60–90 м от начала рулона, на контрольной плите измерялась высота неплоскостности каждого листа. Порезка листов на продольные полосы шириной 100 мм осуществлялась на машине плазменной резки SatroniK LS3000 и фиксировалась величина фактического изгиба каждой полосы. Высота неплоскостности всех отобранных листов не превышала 1–3 мм. Диапазоны отклонений полосок после порезки плазмой представлены в таблице 6.9.

Результаты выполненных экспериментов показали, что предложенные режимы правки обеспечивают высокую плоскостность отобранных листов не только после правки, но и после раскроя листов на машине плазменной резки. В случае резки полос толщиной 4–8 мм отклонение полосок не превысило 4 мм, а при правке полос от 9 мм и больше – отклонения не превышали 5 мм. На рисунке 6.16 показан результат раскроя листа толщиной 4 мм и шириной 1500 мм на полосы на установке плазменной резки. Отклонения полосок в этом случае не превысили 1 мм.

Выполненный комплекс теоретических и промышленных исследований позволил определить технологические режимы правки горячекатаных полос, для получения листового проката, пригодного для лазерной резки, и достигать существенного улучшения плоскостности стальных листов.

Таблица 6.9 – Результаты измерения отклонений полосок после порезки плазмой

№ режима	Толщина полос $h$ , мм	Марка стали	Количество отобранных листов	Отклонения полосок после порезки плазмой, мм
1	4	S355	3	0-2
2	6	S355	3	0-3
3	8	S235	3	0-3
4	8	S355	3	0-2
5	8	S500	2	0-4
6	8	S700	3	0-4
7	9	S355	1	0-5
8	10	S355	3	0-2
9	12	S355	6	0-4
10	12	S700	4	0-3
11	14	S355	2	0-4
12	16	S355	3	0-5

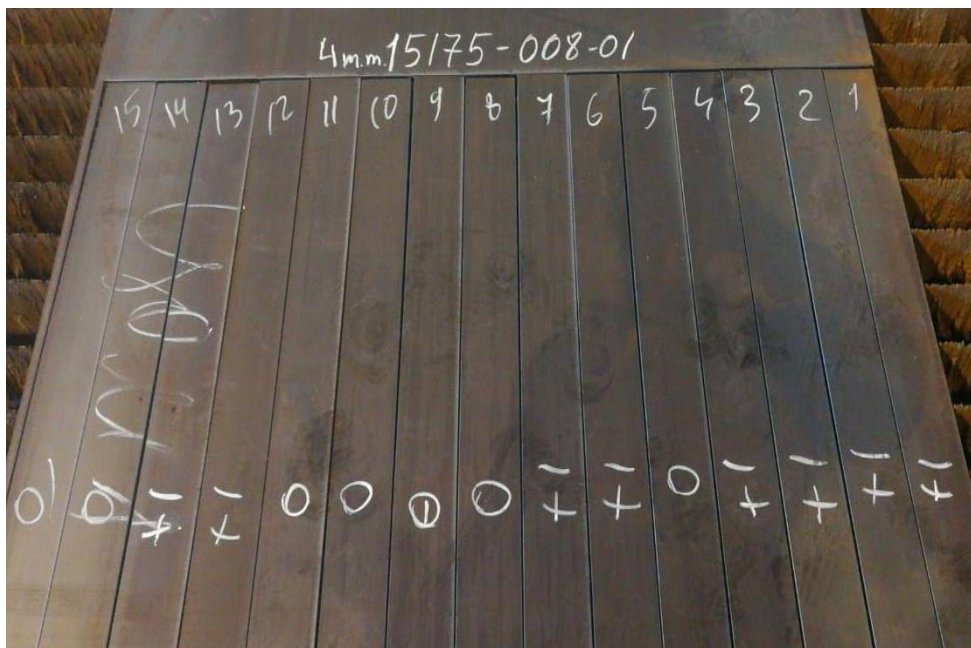


Рисунок 6.16 – Результаты порезки листа толщиной 4 мм и шириной 1500 мм на установке плазменной резки после предложенного режима правки

## Выводы по главе 6

1. Для снижения расхода металла при горячей прокатке на непрерывном широкополосном стане 2000 предложено и внедрено технологическое решение по вводу дополнительного размера кристаллизатора шириной 1490 мм при производстве заготовок для стана. Снижение суммарных вертикальных обжатий при прокатке полос шириной 1350–1600 мм, являющихся подкатом для холодной прокатки, без превышения значений 40–50 мм, обеспечило уменьшение величины затекания металла с узкой грани на широкую. Получен эффект по снижению общего расхода металла шириной 1350–1600 мм с 1,14% до 1,04%.

2. На основе методики профилирования валков листопрокатного производства разработаны и внедрены новые профилировки валков широкополосных станов горячей и холодной прокатки, обеспечивающие:

2.1. На четырехклетевом стане холодной прокатки 2100 снижение поперечной разнотолщинности холоднокатаных полос до значения не более 2 % от номинальной толщины.

2.2. На пятиклетевом стане холодной прокатки 1700 устранение на листах автомобильного сортамента шириной свыше 1400 мм светлых прикромочных полос и получение равномерной шероховатости поверхности полосы.

2.3. На непрерывном широкополосном стане горячей прокатки 2000 выполнение жестких требований к поперечному профилю подката для холоднокатаных полос автомобильного сортамента и повышение стойкости концевых участков бочки опорных валков.

3. Апробированы и внедрены решения по рациональной эксплуатации валков и повышению эффективности технологических процессов непрерывной широкополосной прокатки:

3.1. В условиях непрерывного широкополосного стана горячей прокатки 2000 на основе реализации подхода к оценке параметров состояния поверхностного рабочего слоя опорного валка в клетке непрерывного стана



разработаны и внедрены новые требования к эксплуатации опорных валков и к составлению графика прокатки. Требования направлены на увеличение наработки рабочего слоя опорных валков, снижение их расхода и на повышение производительности стана.

Разработан и программно реализован способ определения величины дифференцированного съема рабочего слоя опорного валка по клетям стана по актуальным данным за прокатную кампанию. Экономия рабочего слоя за одну кампанию в среднем по всем валкам чистовой группы составляет не менее 27 %. Увеличение объема производства на стане составит не менее чем на 50 тыс. т в год, а также снизятся производственные затраты, связанные с эксплуатацией валков.

3.2. На непрерывном широкополосном стане холодной прокатки 2100 на основе анализа эксплуатационных показателей работы рабочих валков разработаны, опробованы и внедрены технические и технологические меры по повышению стойкости рабочих валков и снижению их расхода. Подтверждена их эффективность и целесообразность. Показано, что обеспечивается уменьшение числа аварийных отказов рабочих валков на 13 %, увеличивается средний ресурс валков до списания в 1,4 раза, повышается эффективность использования закаленного слоя валков на 18 % и рост на 20 % среднего количества установок рабочего валка в клеть. Дифференцированный подход к величине съема металла на рабочих валках при шлифовке, учитывающий глубину залегания дефекта при вихретоковом контроле, обеспечивает экономию рабочего слоя при шлифовке всех валков до 30 %.

4. Разработаны и внедрены режимы формоизменения горячекатаного листового проката при правке разнообразного сортамента на различных роликовых машинах. Режимы характеризуются наибольшим уровнем пластических деформаций вначале правки с минимальным уровнем деформаций на выходе и обеспечивают минимальное отклонение от плоскостности листов при высокотехнологичной резке.

5. Промышленная реализация разработанных технических и технологических решений по повышению эффективности формообразования широкого стального листового проката и снижению расхода металла и прокатных валков обеспечивает суммарный экономический эффект более 26 млн руб. в год.

## Заключение

На основании теоретических и экспериментальных исследований раскрыты новые закономерности формообразования листового проката на этапах производства от прокатки сляба до правки горячекатаного стального листового проката, получен комплекс технических и технологических решений по повышению качественных показателей широкой стальной листовой продукции, стойкости деформирующего рабочего инструмента и экономии материальных ресурсов.

По результатам проведенных исследований, полученным техническим и технологическим решениям сделаны следующие выводы:

1. Представлены общие закономерности перехода металла с боковых граней на широкие при прокатке сляба в черновой группе непрерывного стана горячей прокатки, полученные на основе промышленных исследований и численного моделирования. Установлено, что переход металла с узкой грани на широкую уменьшается при снижении суммарного обжатия в первых трех горизонтальных проходах, использовании профилировок вертикальных валков всех клеток, обеспечивающих получение вогнутой боковой грани раската при прокатке, выполнении скосов на слябе и не зависит от распределения вертикальных обжатий по клетям черновой группы. Моделированием и опытно-промышленной прокаткой показано, что уменьшение суммарного обжатия до 10 % в первых трех горизонтальных проходах приводит к уменьшению затекания металла с ребра на широкую грань до 20 % после прокатки в черновой группе стана. Выполнение на боковых ребрах сляба равносторонних скосов размером, равным разнице между начальной шириной сляба и требуемой шириной полосы, ограничивает переход металла с узкой грани на широкую. Показано, что выполнение на слябе скосов размером 50 мм позволяет снизить при прокатке не менее чем в 2 раза величину перехода металла с узкой грани на широкую.

2. Разработана новая методика выбора профилировок валков, интегрирующая моделирование поперечного профиля листового проката и оценку напряженного состояния валковых систем прокатных станов. Моделирование формообразование профиля листового проката отличается от известных методов применением пространственной конечно-элементной модели валковой системы и непрерывным описанием профиля бочки и включает геометрическое суммирование кривых упругих деформаций, профиля износа валков, теплового профиля с учетом исходной неплоскостности проката и возможностей регулирующих воздействий осевой сдвижки рабочих валков и их гидравлического изгиба. Обосновано, что применение пространственной конечно-элементной модели валковой системы с непрерывным описанием профиля бочки при нахождении упругих деформаций валков обеспечивает точность определения профиля со средней погрешностью, не превышающей 8,5 %.

Установлены закономерности влияния профилировок валковых систем, средств регулирования на формирование поперечного профиля прокатываемых полос и стойкость валков. Показано, что в валковой системе с асимметричными выпукло-вогнутыми профилировками валков имеется резерв регулирования поперечного профиля полосы за счет корректировки выпуклости и вогнутости профилировки рабочего валка. Уменьшение радиусов выпуклости и вогнутости профилировки на 2,5 % приводит к уменьшению прогиба бочки рабочего валка на ширине полосы до 40 %, дальнейшее уменьшение радиусов приводит к росту прогиба, в том числе и на ширине полосы, без существенного увеличения напряжений в валках.

Для повышения стойкости опорных валков и уменьшения в межвалковом контакте опасных пиковых значений напряжений валковых систем с выпуклыми, вогнутыми и цилиндрическими профилировками предложен новый способ профилирования бочки опорного валка. Способ заключается в выполнении профиля бочки опорного валка выпуклым в виде трех участков параболических

кривых, имеющих в сопряжениях общие касательные, при этом крайние кривые плавно сопрягаются с торцом бочки.

3. Разработан новый научный подход к анализу и оценке параметров состояния рабочего слоя опорных валков, основанный на учете разной интенсивности работы валков по клетям непрерывного стана и включающий определение за кампанию числа контактов с рабочим валком или длины прокатанной полосы, величины межвалковой нагрузки, приращения твердости бочек, износа и величины съема после прокатной кампании. Практически доказано, что применение такого подхода позволяет решать вопросы обоснованного увеличения прокатной кампании опорных валков, снижения расхода и увеличения их стойкости.

Установлен новый критерий оценки рабочего слоя опорного валка – деформационное упрочнение его бочки после прокатки по клетям непрерывного стана. На основе обработки результатов численного эксперимента получена зависимость, описывающая влияние длины прокатанных полос и межвалковой нагрузки на приращение твердости бочки. Показано соответствие результатов численного и промышленного экспериментов.

На основе разработанного подхода создан новый способ эксплуатации опорных валков непрерывного стана горячей прокатки с дифференцированной величиной съема при перешлифовке валков. Величина съема определяется по актуальным данным со стана за прокатную кампанию в зависимости от интенсивности работы опорного валка в клетях. Применение способа позволяет снижать расход валков в 1,2 раза и гарантированно увеличивать наработку рабочего слоя опорного валка не менее чем на 10 % без увеличения степени наклепа и износа бочки.

4. Представлено развитие теории упругопластического изгиба при правке на многороликовых машинах на основе комплекса теоретических и экспериментальных исследований, направленных на расширение возможностей воздействия на листовую прокат при его производстве для сохранения высокой

плоскостности при раскросе по сложному контуру на установках лазерной или плазменной резки. Определены показатели процесса правки, влияющие на плоскостность листов при раскросе высокотехнологичными методами: коэффициент проникновения пластической деформации по толщине листового проката, относительная пластическая деформация полосы при правке на входе и выходе, уровень остаточных продольных напряжений по толщине листа, остаточная потенциальная энергия.

Раскрыт и описан механизм возникновения остаточных напряжений при правке в условиях циклической знакопеременной деформации, обусловленный величиной пластической деформации и неоднородностью распределения деформаций по толщине при правке. Установлено, что в центральной части сечения полосы формируется область «стесненных» упругих напряжений, препятствием по высвобождению обратимой потенциальной энергии которых становятся приповерхностные слои с необратимой пластической деформацией. Показано, что чем меньше накопленной энергии деформации аккумулировано по толщине полосы после правки, тем меньше отклонения от плоскостности листов при высокотехнологичной резке.

Установлено, что коэффициент проникновения пластической деформации по толщине листового проката не менее 90 % в начале правки с минимальным уровнем на выходе обеспечивает уменьшение значений остаточных напряжений, потенциальной энергии в листах после правки и отклонений от плоскостности листов при лазерной или плазменной резке. Впервые получена зависимость изменения коэффициента проникновения пластической деформации по толщине полосы от конструктивных параметров роликовых правильных машин и параметров процесса правки.

Разработана методика выбора режима правки для различных роликовых правильных машин, позволяющая определять их настройки, устраняющие исходное неоднородное напряженное состояние горячекатаных полос различных групп прочности и дефекты неплоскостности, с обеспечением минимального

уровня остаточных напряжений и потенциальной энергии в готовом прокате, пригодном для лазерной или плазменной резки.

5. Промышленная реализация результатов совершенствования процессов листопрокатного производства в направлении повышения эффективности их формообразования для достижения высоких показателей качества широких стальных полос и листов, повышения стойкости валков и экономии материальных ресурсов при производстве проката обеспечивает суммарный экономический эффект более 26 млн руб. в год

## Список литературы

1. Салганик В.М. Современные технологии производства листового проката // Материалы 6-й международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Уральская научно-педагогическая школа имени профессора А. Ф. Головина». – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2013. – С. 353–358.
2. Радюкевич Л.В., Мельцер В.В., Стариков А.И., Салганик В.М., Поляков М.Г., Челенко В.Ф. Интенсификация производства листовой стали на широкополосных станах. – М.: Металлургия, 1991. – 175 с.
3. Хлопонин В.Н., Полухин П.И., Погоржельский В.И., Полухин В.П. Горячая прокатка широких полос. – М.: Металлургия, 1991. – 195 с.
4. Антипин В.Г., Нестеров Д.К., Кизиев В.Г., Темников Э.М., Шульга Е.А., Орлов Е.Л., Ивашин В.И., Ланько В.В., Тришевский И.С., Хижняков Я.В. Прокатные станы: Справочник в 3-х томах. Т. 3. Листопрокатные станы и профилегибочные агрегаты. – М.: Металлургия, 1992. – 428 с.
5. Салганик В.М., Румянцев М.И. Технология производства листовой стали. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2007. – 320 с.
6. Шабалов И.П., Шафигин З.К., Муратов А.Н. Ресурсосберегающие технологии производства толстолиствого проката с повышенными потребительскими свойствами. – М.: Metallurgizdat, 2007. – 352 с.
7. Рудской А.И., Лунев В.А. Теория и технология прокатного производства. – СПб.: Наука, 2005. – 540 с.
8. Способ прокатки в вертикальных валках универсальных клетей. А.с. № 1734899, СССР, МПК В21В 1/02 – 4861726/27; заявл. 21.08.1990; опубл. 23.05.1992. Бюл. № 19. – 4 с. / Оробцев В.В., Таллер О.Е., Каретный З.П., Перельман Р.О., Кужель А.К.; заявитель и патентообладатель Донецкий научно-исследовательский институт черной металлургии.



9. Шабалов И.П. Исследование формоизменения полос при прокатке полосы с обжатиями в вертикальных и горизонтальных валках // Производство проката. – 2004. – № 7. – С. 3–13.

10. Тимошенко Л.В., Логак О.Н., Мазур В.Л. Современный способы уменьшения концевой обрезки раскатов на широкополосных станах горячей прокатки. // Бюллетень Черметинформация. – 1989. – № 3. – С. 33–45.

11. Бобров В.В., Полещук В.М., Гладуш В.Д. Оптимизация нестационарных процессов прокатки. – Киев: Техника, 1984. – 127 с.

12. Коновалов Ю.В. Справочник прокатчика. Кн. 1: Производство горячекатаных листов и полос. – М.: Теплотехника, 2008. – 640 с.

13. Салганик В.М., Румянцев М.И. Цыбров Д.С., Соловьев А.Г. Подход к выбору размеров слябов для широкополосных станов горячей прокатки // Вестник МГТУ. – 2010. – № 1. С. 38–43.

14. Гарбер Э.А. Станы холодной прокатки (теория, оборудование, технология). – М: Черметинформация; Череповец: ГОУ ВПО ЧГУ, 2004. – 416 с.

15. Кожевникова И.А. Разработка, теоретическое обоснование, исследование и внедрение эффективных технологий прокатки особо тонких стальных полос: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.05. – ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет». – Череповец, 2012. – 43 с.

16. Коновалов Ю. В. Справочник прокатчика. Кн. 2: Производство холоднокатаных листов и полос. – М.: Теплотехника, 2010. – 608 с.

17. Иводитов В.А., Трайно А.И., Вольшонок И.З., Русаков А.Д. Современные методы повышения эффективности листопрокатного производства: монография. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2013. – 288 с.

18. Гостев К.А. Оптимизация прокатных валков в целях снижения совокупной стоимости владения // Сталь. – 2021. – № 10. – С. 19–24.

19. Третьяков А.В. Валки обжимных, сортовых и листовых станов: справочник. – М.: «СП Интермет инжиниринг», 1999. – 80 с.

20. Железнов Ю.Д. Прокатка ровных листов и полос. – М.: Metallurgiya, 1971. – 200 с.

21. Григорян Г.Г., Шаталов Р.Л., Скорупский В. И. Регулирование профиля и планшетности тонких полос на широкополосном стане 2000 горячей прокатки // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической информации. – 1977. – № 22. – С. 48–49.

22. Коцарь С.Л., Бемянский А.Д., Мухин Ю.А. Технология листопрокатного производства. – М.: Metallurgiya, 1997. – 272 с.

23. Мазур В.Л., Сарьян А.М., Приходько И.Ю., Яценко А.И. Управление качеством тонколистового проката. – Киев: Техніка, 1997. – 384 с.

24. Божков А.И., Настич В.П. Плоскостность тонколистового проката. – Москва: СП «Интермет инжиниринг», 1998. – 263 с.

25. Салганик В.М., Полецков П.П. Способы и устройства регулирования профиля и формы листового проката // Новости черной металлургии России и зарубежных стран. Черная металлургия: Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2000. Вып. 11-12 (1211-1212). – Часть I. – С. 15-30.

26. Чернов П.А., Долматов А.П., Тищенко А.Д., Пименов А.Ф., Шамрин А.В., Рындин В.А. Эффективность системы управления профилем и плоскостностью на непрерывном широкополосном стане 2000 горячей прокатки // Производство проката. – 2001. – № 1. – С. 21–28.

27. Jelali M., Müller U. Advanced measurement and flatness control for hot strip mills // Revue de Métallurgie. – 2002. – Vol. 99. – No. 6. – P. 517–522.

28. Auzinger D., Djumlija G., Nijhuis T., Seilinger A., Widder M. Superior strip profile and flatness in hot-strip-mills with advanced technology packages. Emphasizing "SmartCrown" technology // METEC Congress 03: 3rd European Rolling Conference, Dusseldorf, 2003: Proceedings. – Dusseldorf: Stahlinstitut VDEh. – 2003. – P. 275–281.

29. Салганик В.М., Полецков П.П., Соловьев А.Г., Сеницкий О.В., Литяйкина Ю.Б. Повышение плоскостности широких полос на стане 2500 горячей прокатки Магнитогорского металлургического комбината в условиях

преимущественного производства узких // Черная металлургия. – 2004. – № 9. – С. 32–35.

30. Шаталов Р.Л. Обеспечение устойчивости процесса прокатки полос. // Производство проката. – 2004. – № 9. – С. 27–31.

31. Райншке Й.У., Шмид Ф., Ламп Х., Миеле М. Новая система контроля профиля и плоскостности полосы для стана горячей прокатки // Черные металлы. – 2004. – № 7-8. – С. 43–49.

32. Максимов Е.А., Шаталов Р.Л., Босхамджиев Н.Ш. Производство планшетных полос при прокатке. – М.: Теплотехник, 2008. – 336 с.

33. Настич В. П., Божков А. И., Чеглов А. Е., Дегтев С. С., Шопин И. И. Автоматизированная система управления качеством продукции листопрокатного производства // Производство проката. – 2008. – № 9. – С. 8–13.

34. Салганик В.М., Полецков П.П., Кухта Ю.Б. Алгоритмы и программный продукт «Профиль 2500» для прогнозирования и оценки профиля, плоскостности горячекатаных полос и состояния опорных валков стана 2500 горячей прокатки // Известия вузов. Черная металлургия. – 2008. – № 7. – С. 50–54.

35. Максимов Е.А., Шаталов Р.Л., Босхамджиев Н.Ш. Производство планшетных полос при прокатке. – М.: Теплотехника, 2008. – 336 с.

36. Бельский С.М. Совершенствование технологий формообразования полос и листов на основе развития теории симметричной и асимметричной горячей прокатки: автф. дис. ...д-ра техн. наук: 05.16.05. – Институт Цветметобработки. – Липецк, 2009. – 36 с.

37. Салганик В.М., Полецков П.П., Кухта Ю.Б., Егорова Л.Г. Управление качеством горячекатаного проката по профилю и плоскостности на базе использования автоматизированной системы // Вестник МГТУ (Магнитогорск). – 2010. – № 1. – С. 59–62.

38. Мазур В.Л., Ноговицын А.В. Теория и технология тонколистовой прокатки (численный анализ и технические приложения). – Днепропетровск: РВА «Дніпро-VAL», 2010. – 500 с.

39. Полецков П.П. Повышение эффективности системы воздействий в листопрокатных комплексах на поперечный профиль и плоскостность тонких стальных полос: автф. дис. ...д-ра техн. наук: 05.16.05. – МГТУ им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2011. – 36 с.

40. Lee P.J., Raudensky M., Horsky J. Development of accelerated cooling for new plate mill. // *Ironmaking and Steelmaking*. – 2013. – Vol. 40. – No. 8. – P. 598–604.

41. Гарбер Э.А., Мишнев П.А., Шалаевский Д.Л., Палигин Р.Б., Михеева И.А., Болобанова Н.Л. Моделирование и уменьшение неплоскостности полос при горячей прокатке на стадии настройки широкополосного стана // *Производство проката*. – 2014. – № 3. – С.7–13.

42. Гарбер Э. А., Мишнев П. А., Шалаевский Д. Л., Палигин В. Б., Михеева И. А., Болобанова Н. Л. Улучшение плоскостности горячекатаных полос на широкополосных станах с использованием математической модели идентификации неплоскостности по параметрам режима прокатки // *Труды Международного научно-технического конгресса «ОМД-2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии»*. – М.: НИТУ «МИСиС», 2014. – С. 61–67.

43. Cho H.H., Cho Y.G., Kim D.W., Kim S.J., Lee W.B., Han H.N. Finite element investigation for edge wave prediction in hot rolled steel during run out table cooling. // *ISIJ Int.* – 2014. – Vol. 54. – No. 7. – P. 1646–1652.

44. Синицкий О.В., Полецков П.П. Элементы современных технологических систем для обеспечения геометрии и формы листового проката // *Калибровочное бюро*. – 2015. Вып. 6. – С. 72–99.

45. Чащин В. В. Повышение эффективности горячей полосовой прокатки при использовании технологии регулируемого охлаждения рулонов // *Металлург*. – 2016. – № 6. – С. 23 – 27.

46. Мухин, Ю.А., Бельский, С.М., Шопин, И.И. Модель изменения плоскостности полосы в процессе охлаждения рулона после горячей прокатки //

Сборник научных трудов II международной научно-практической конференции «Современная металлургия нового тысячелетия». – Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2016. – С. 78–80.

47. Гарбер Э.А., Михеева И.А., Шалаевский Д.Л., Мишнев П.А., Кухтин С.А. Разработка и испытания новых методов улучшения плоскостности горячекатаных стальных широких полос // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации.– 2017. – № 3. – С. 76–82.

48. Шопин И.И. Исследование формоизменения горячекатаной стальной полосы при смотке в рулон для прогнозирования плоскостности в холодном состоянии: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05. – Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, 2018. – 238 с.

49. Li H., He A., Shao J., Yao C., Zheng J., Wang E., Zhang Z. Numerical analysis on flatness adjusting performance of hot wide strip temper mill with small-diameter work rolls // Ironmaking and Steelmaking. – 2021. – Vol. 48. – No. 5. P. 559–569.

50. Павлов И.М. Теория прокатки. – Ленинград: Ленинградский металлургический институт, 1934. – 368 с.

51. Павлов И.М. Теория прокатки и основы пластической деформации металлов. – Ленинград; Москва: ГОНТИ, Глав. ред. лит-ры по черной и цветной металлургии, 1938. – 516 с.

52. Целиков А.И. Влияние внешних зон на уширение и распределение скоростей и напряжений по ширине прокатываемой полосы // Материалы сборника статей «Прокатные станы и технология прокатки. – М.: Машгиз, 1957. – С. 5–21.

53. Гришков А.И. Некоторые вопросы теории уширения при прокатке в гладких валках // Материалы сборника статей «Прокатные станы и технология прокатки. – М.: Машгиз, 1957. – С. 106–118.

54. Аркулис Г.Э. О неравномерности деформации по длине полосы в связи с минимальной длиной жестких концов. – В книге «Обработка металлов давлением», М.: Metallurgizdat, 1952. – 320 с.

55. Мельцер В.В. Распределение уширения по высоте полосы при прокатке в условиях высокого очага деформации // Научные труды МГМИ. – Магнитогорск: МГМИ, 1955.– Вып. 8. – С. 40–44.

56. Мелешко А.М, Тимофеев А.И. Исследование деформации кромок при прокатке толстых листов // Сталь. – 1968. – № 12. – С. 58–63.

57. Мелешко А.М. Исследование деформации кромок раскатов при прокатке толстых листов // Обработка металла давлением. – М.: Metallurgiya, 1969. – С. 96–115.

58. Сафьян М.М. Прокатка широкополосной стали. – М.: Metallurgiya, 1969. – 460 с.

59. Полухин П.И., Клименко В.М., Полухин В.П. Прокатка толстых листов. – М.: Metallurgiya, 1984. – 288 с.

60. Бровман М.Я., Зеличенко Б.Ю., Герцев А.И. Усовершенствование технологии прокатки толстых листов. – М: Metallurgiya, 1969. – 252 с.

61. Шаталов Р.Л Развитие и применение теории «жестких концов» И.М. Павлова и А.И. Целикова при прокатке тонких полос // Материалы III Международной научно-технической конференции, посвященной 120-летию со дня рождения член-корреспондента АН СССР Павлова Игоря Михайловича «Павловские чтения». Москва: ИМЕТ РАН, 2021. – С. 12–25.

62. Бояршинов М.И., Мельцер В.В. Исследование эффективности регулирования ширины полосы обжатием в вертикальных валках черновых клетей непрерывного листового стана. – В книге «Теория и технология прокатки», Челябинск: Челябинское книжное издательство, 1972. – 210 с.

63. Герцев А.И., Меерович И.М. Условия деформации при прокатке раскатов в клетки с вертикальными валками листовых станов // Труды ВНИИМетмаш. – 1967. – № 18. – С. 13–17.

64. Тимошенко Л.В., Логак О.Н., Мазур В.Л. Современный способы уменьшения концевой обреза раскатов на широкополосных станах горячей прокатки // Бюллетень Черметинформация. – 1989. – № 3. – С. 33–45.

65. Медведев Г.А., Лебедев С.А., Шурыгин В.И. Определение параметров прокатки и настройки вертикальных валков НШС горячей прокатки // Труды первого конгресса прокатчиков. – М.: ОАО «Черметинформация», 1996. – С. 113–116.

66. Герцев А.И., Калинин В.П., Бернштейн И.А., Гетманец В.В. Применение вертикальных клеток в листовых и полосовых станах для уменьшения разноширинности // Сталь. – 1967. – № 9. – С. 828–831.

67. Шитов М.В. Изменения ширины сляба валками: область применения и направления развития // Калибровочное бюро. – 2014. Вып. 3. – С.91–111.

68. Салганик В.М., Песин А.М., Пустовойтов Д.О. Разработка эффективной схемы черновой прокатки низколегированных сталей // Сталь. – 2008. – № 9. – С. 50–53.

69. Polyakov A.V., Mazur I.P. Research on the Effect of Reduction Distribution in Universal Stands on the Process of Metal Transition from Sides to the Center Line of Transfer Bar // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – № 718, 012014. doi:10.1088/1757-899X/718/1/012014.

70. Дефекты стали. Справочное издание. / Под редакцией С.М. Новокщеновой, М.И. Виноград. – М.: Металлургия, 1984. – 199 с.

71. Атлас дефектов стали. Перевод с немецкого. / Под редакцией М.Л. Бернштейна. – М.: Металлургия, 1979. – 188 с.

72. Тимофеев Д.И., Чернер М.И., Сабиев М.П. Влияние пороков боковых и торцевых слябов на качество листов // Металлургия и горнорудная промышленность. – 1964. – №3. – С. 12-14.

73. Сафьян М.М., Чернер М.И. Исследование закономерностей перехода боковых граней сляба на поверхность контакта при прокатке толстых листов. – В книге: «Обработка металлов давлением», М.: Металлургия, 1967. – С. 185–194.

74. Пименов В.А., Копылов А.Ф., Глебов В.П., Кононыхин Г.Н. Влияние формы узких граней слябов и их деформации при горячей прокатке на топографию дефектов поверхности готового проката // *Металлург.* – 2014. № 9. – С. 69–71.

75. Шабалов И.П. Промышленное исследование перехода металла с боковых граней сляба на основные поверхности листа // *Производство проката.* – 2004. – № 9. – С. 3–12.

76. Салганик В.М., Песин А.М., Пустовойтов Д.О. Исследование влияния формы валков черногого окалиноломателя на возможность снижения поверхностного дефектообразования при прокатке на стане 2000 // *Материалы межрегионального сборника научных трудов «Процессы и оборудование металлургического производства».* – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2009. – С. 211–217.

77. Pesin A., Pustovoytov D. Finite element modeling of influence of roll form of vertical scale breaker on decreased formation of surface defects during roughing hot rolling // *Key Engineering Materials.* – 2016. – Vol. 685. – No. 2. – P. 181–185.

78. Даниленко А.В., Мунтин А.В., Науменко В.В., Максимов В.М. Совершенствование формы калибра эджерного валка черновой группы широкополосного стана литейно-прокатного комплекса // *Сталь.* – 2021. – № 4. – С. 18-23.

79. Kainz A., Parteder E., Zeman K. From slab corner cracks to edge-defects in hot rolled strip – experimental and numerical investigations // *Steel Research International.* – 2008. – Vol. 79. – No. 11. – P. 861–867.

80. Салганик В.М., Песин А.М., Пустовойтов Д.О. Моделирование поведения поперечных угловых трещин сляба при прокатке в горизонтальных валках // *Известия вузов. Черная металлургия.* – 2010. – № 3. – С. 22–24.

81. Песин А.М., Салганик В.М., Пустовойтов Д.О. Моделирование формоизменения поверхностных трещин непрерывнолитого сляба при черновой прокатке на широкополосном стане // *Сборник трудов Международной научно-*



практической конференции «Инженерные системы – 2010». – М.: РУДН, 2010. – С. 136–140.

82. Поляков А.В., Мазур И.П. Исследование процесса перехода металла с боковых граней сляба на верхнюю и нижнюю поверхности раската при прокатке в универсальных клетях в программном комплексе Abaqus // Вестник ЛГТУ. – 2019. – № 4. – С. 24–32

83. Поляков А.В., Шатшу Нетшутзим Р., Мазур И.П. Влияния технологических параметров прокатки в универсальных клетях на процесс смещения металла от кромок к продольной оси раската. Сообщение 1. Технологические параметры // Черные металлы. – 2020. № 8. – С. 20–24.

84. Поляков А.В., Шатшу Нетшутзим Р., Мазур И.П. Влияния технологических параметров прокатки в универсальных клетях на процесс смещения металла от кромок к продольной оси раската. Сообщение 2. Критическая точка // Черные металлы. – 2020. – № 9. – С. 45–48.

85. Целиков А.И., Полухин П.И., Гребеник В.М., Иванченко Ф.К., Тылкин М.А., Королев А.А., Лопухин В.П., Сторожик Д.А., Павленко Б.А., Целиков А.А., Елинсон И.М., Зюзин В.И. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х томах. Т. 3. Машины и агрегаты прокатных цехов. Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1988. – 432 с.

86. Целиков А.И., Смирнов В.В. Прокатные станы. – М.: Metallurgizdat, 1958. – 432 с.

87. Грудев П.И. Прогиб валков вследствие совместного сплющивания рабочих и опорных валков // Обработка металлов давлением. Вып. 2. – М.: Metallurgizdat, 1953. – С. 200–223.

88. Чепуркин С.С. Уравнение прогибов листопрокатных валков // Производство и обработка стали: Сб. науч. тр. ЖдМИ. Вып. 5. – Харьков: Metallurgizdat, 1960. – С. 346–371.

89. Коновалов Ю.В., Остапенко А.Л., Пономарев В.И. Расчет параметров листовой прокатки. Справочник. – М.: Металлургия, 1986. – 430 с.

90. Полухин П.И., Железнов Ю.Д., Полухин В.П. Тонколистовая прокатка и служба валков. – М.: Металлургия, 1967. – 388 с.
91. Боровик Л.И. Эксплуатация валков станов холодной прокатки. – М.: Металлургия, 1968. – 233 с.
92. Полухин В.П. Математическое моделирование и расчет на ЭВМ листовых прокатных станов. – М.: Металлургия, 1972. – 512 с.
93. 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.
94. Григорян Г.Г., Коцарь С.Л., Железнов Ю.Д. Учет схемы деформации при анализе формообразования в процессе листовой прокатки // Известия вузов. Черная металлургия. – 1976. – № 7. – С. 88–92.
95. Третьяков А.В., Гарбер Э.А., Давлетбаев Г.Г. Расчет и исследование прокатных валков. – М.: Металлургия, 1976. – 256 с.
96. Будакова А.А., Коновалов Ю.В., Ткалич К.Н., Качалка З.Г., Паргамонов Е.А. Профилирование валков листовых станов. – К.: Техника, 1986. – 190 с.
97. Мельцер В.В., Салганик В.М. Матричный метод расчета деформации и профилировки валков листопркатной клетки кварто: учеб. пособие. – Магнитогорск: МГМИ, 1970. – 50 с.
98. Салганик В.М., Мельцер В.В. Исследование на ЭВМ деформаций и нагрузок валковой системы кварто. – Свердловск: изд. УПИ, 1987. – 78 с.
99. Салганик В.М., Полецков П.П. Моделирование деформаций и нагрузок валковой системы кварто и повышение качества листового проката по профилю: монография. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. – 133 с.
100. Румянцев М.И., Колыбанов А.Н. Постановка задачи упрощения расчета деформации валков и профиля полосы при прокатке в клетки кварто // Калибровочное бюро: электрон. науч. журн. – 2018. – № 12. – С.18 – 21. URL: <http://passdesign.ru>

101. Бельский С.М., Мазур И.П., Лежнев С.Н., Панин Е.А. Формоизменение полосы при тонколистовой прокатке: монография. – Темиртау: КГИУ, 2016. – 161 с.

102. Болобанова Н.Л. Развитие метода конечных элементов для повышения точности моделирования упругих деформаций, профилировок валков и поперечного профиля полосы на широкополосных станах // Материалы I Международной научно-технической конференции «Научно-технический прогресс в черной металлургии – 2013». – Череповец: ЧГУ, 2013. – С. 37-43.

103. Болобанова Н.Л. Компьютерное моделирование процессов и оборудования металлургического производства. – Череповец: ЧГУ, 2014. – 91 с.

104. Восканьянц А.А. Расчет напряженно-деформированного состояния валковой системы клетки кварто 2500 // Производство проката. – 2001. – № 5. С. 35–38.

105. Бочектуева Е.Б. Численное определение напряженно-деформированного состояния в валках и усилий противоизгиба в четырехвалковой клетки прокатного стана // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2010. – № 1. – С. 45–53.

106. Zhang F., Malik A. A roll-stack contact mechanics model to predict strip profile in rolling mills with asymmetric, continuously variable crown rolls // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2018. – Vol. 140. – Is. 1: 011008.

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

108. Гарбер Э.А., Кожевникова И.А. Теория прокатки. – Череповец: ЧГУ; М.: Теплотехник, 2013. – 305 с.

109. Garber E.A., Shadrunkova I.A., Traino A.I., Yusupov V.S. Analysis of a deformation zone and the refined calculation of the forces for cold rolling of strips thinner than 0.5 mm in a continuous mill // Russian Metallurgy. – 2002. – No 4. – P. 300–315.

110. Кожевникова И.А. Сопоставление результатов энергосилового расчета процесса горячей прокатки тонких полос аналитическим методом и методом конечных элементов // Сборник докладов международной научно-технической конференции «Инновационные технологии обработки металлов давлением», посвященной 100-летию со дня рождения проф. д.т.н., академика АН КазССР, Героя Социалистического Труда П.И. Полухина. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. – С. 362–369.

111. Servin R., Arreola S.A., Calderón I., Perez A., San Miguel S.M. Effect of crown shape of rolls on the distribution of stress and elastic deformation for rolling processes // *Metals*. – 2019. – Vol. 9. – Is. 11.

112. Wang X., Li F., Li B., Dong L., Zhang B. design and application of an optimum backup roll contour configured with CVC work roll in hot strip mill // *ISIJ International*. – 2012. – Vol. 52. – No. 9. – P. 1637–1643.

113. Zhang F., Malik A.S., Yu H. High-fidelity roll profile contact modeling by simplified mixed finite element method // *Conference: ASME Manufacturing Science and Engineering Conference, 2018*. – MSEC2018-6509, V004T03A034. URL: <https://doi.org/10.1115/MSEC2018-6509>.

114. Третьяков А.В., Гарбер Э.А., Шичков А.Н., Грачев А.В. Совершенствование теплового процесса листовой прокатки. – М.: Metallurgy, 1973. – 304 с.

115. Гарбер Э.А., Шаравин М.П., Слоним Э.П., Соболенко В.П., Яковлев П.А., Соколова Л.Н., Кочкин А.В., Савоскина И.М. Четырехклетевой стан как объект управления тепловой профилировкой валков // *Материалы IV научно-технической конференции Череповецкого филиала Северо-Западного заочного политехнического института (СЗПИ)*. – Ленинград: СЗПИ, 1974. – С. 51-55.

116. Гарбер Э.А., Гончарский А.А., Шаравин М.П. Технический прогресс систем охлаждения прокатных станов. – М.: Metallurgy, 1991. – 256 с.

117. Беньковский М.А., Богоявленский К.Н., Виткин А.И., Гарбер Э.А., Голованенко С.А., Грицук Н.Ф., Жадан В.Т., Железнов Ю.Д., Зюзин В.И.,

Литовченко Н.В., Молчанов А.И., Петичев А.Н., Лопухин П.И., Сафьян М.М., Третьяков А.В. Технология прокатного производства. В 2-х книгах. Книга 2. Справочник. – М: Металлургия, 1991. – 423 с.

118. Гарбер Э.А., Хлопотин М.В. Моделирование и совершенствование теплового режима и профилировок валков широкополосных станов горячей прокатки: монография. – Череповец, изд-во ЧГУ, Москва, изд-во «Теплотехник», 2013. – 113 с.

119. Чекмарев А.П., Машковцев Р.А. Износ прокатных валков. – Харьков: Metallurgizdat, 1955. – 148 с

120. Щербаниц Э.Н., Савранский К.Н. Великий Н.И., Надутов В.Г. Износ опорных валков и изменение шлифовочного профиля рабочих валков дрессировочного стана // *Металлург.* –1971. – № 11. – С 42–43.

121. Боровик Л.И., Колпаков С.С. Расчет профилировки валков тонколистовых станов с учетом износа опорных валков// *Сталь.* – 1987. – № 12. – С. 44–47.

122. Трейгер Е.И., Комановский А.З. Повышение стойкости прокатных валков. – Киев: Техніка, 1984. – 146 с.

123. Николаев В.А. Профилирование и износостойкость листовых валков. – Киев: Техніка, 1992. – 160 с.

124. Turk R., Fajfar P., Robič R., Peruš I. Prediction of hot strip mill roll wear // *Metalurgija.* – 2002. – Vol. 41. – No 1. – P. 47–51.

125. Борисов В.И., Голубьев В.В. Исследование износа листовых валков валковых систем кварто станов горячей прокатки // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение».* – 2005. – № 4. – С. 49-62.

126. Анцупов А.В., Анцупов А.В., Анцупов В.П., Налимова М.В., Чекалин И.Ю., Слободянский М.Г. Трибодиагностика материалов опорных и рабочих валков листовых станов // *Производство проката.* – 2008. – № 4. – С. 41–44.

127. Салганик В.М., Полецков П.П., Кожушков Е.Ю., Кухта Ю.Б. Прогнозирование профиля износа опорных валков клетей чистой группы стана горячей прокатки // Производство проката. – 2008. – № 11. – С.36–39.

128. Кухта Ю.Б. Совершенствование процесса формирования поперечного профиля и плоскостности горячекатаных полос на основе моделирования работы валковой системы «кварто»: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05. – МГТУ им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2009. – 23 с.

129. Кохан Л.С., Белелюбский Б.Ф., Гузенков С.А. Абразивный износ рабочих валков прокатных станов // Технология металлов. – 2010. – № 6. – С. 5–8.

130. Платов С.И., Дема Р.Р., Ярославцев А.В., Амиров Р.Н. Математическая модель процесса изнашивания и прогнозирования срока службы рабочих валков клетки кварто при подаче смазочного материала // Производство проката. – 2012. – № 9. – С. 38–43.

131. Servin-Castañeda R., Garcia-Lara A.M., Mercado-Solis R.D., Vega-Lebrun C.A. Development of mathematical model for control wear in backup roll for hot strip mill // J. Iron Steel Res. – 2014. – Vol. 21. P. 46–51.

132. Быстров В.А., Дьяков П.К., Уманец А.Г. Условия эксплуатации и износ валков прокатного стана горячего металла // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2014. – № 5. – С. 24–29.

133. Дерябин Н.С., Никитина Н.В., Григоренко А.С., Шакиров А.А. Исследование влияния износа рабочих валков широкополосного стана горячей прокатки и их теплового профиля на поперечную и продольную разнотолщинность полос // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2020. – Т. 76. – № 9. – С. 931–936.

134. Восканьянц А.А. Автоматизированное управление процессами прокатки. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2010. – 85 с.

135. Bald W, Beisemann G, Feldmann H, Schuttet T. CVC. Continuously variable crown rolling // Iron Steel Engineer. – 1987. – No. 3. – P. 32–41.

136. Оптимизированные стратегии смещения в качестве функции ширины полосы. Патент на изобретение № 2367531, Российская Федерация, МПК В21В13/14 – 2006125728/02; заявл. 11.11.2004; опубл. 20.09.2009. Бюл. № 26. / Андреас Риттер, Рюдигер Хольц; патентообладатель «СМС ДЕМАГ АГ».

137. Салганик В.М., Виер И.В., Полецков П.П., Румянцев М.И. Развитие валковых систем CVC на основе математического моделирования для повышения качества холоднокатаного проката и стойкости валков // Труды V конгресса прокатчиков. – М.: Черметинформация. – 2004. – С. 146–151.

138. Виер И.В. Моделирование профилировки валков клеток кварто для расширения диапазона регулирования плоскостности холоднокатаных полос и повышения стойкости инструмента: автф. дис. ...кан. техн. наук: 05.16.05. – МГТУ им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2004. – 25 с.

139. Капланов В.И., Петренко А.С. Существующие профилировки прокатных валков как способ эффективного управления точностью поперечного профиля проката // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2010. – Вып. 21. – С. 41–45.

140. Жовнодий Н.Н., Мазур И.П., Астахов А.А., Шамрин А.В. Технология профилирования рабочих S-образных валков с остаточной тепловой выпуклостью // Сталь. – 2014. – № 10. – С.40–42.

141. Liu G.M., Di H.S., Chang A. Discussion on design of CVC roll contour and its equivalent crown // Journal of Northeastern University (Natural Science). – 2008. – Vol. 29. – No. 10. – P. 1443–1446.

142. Liu G.M., Li Y.G., Huang Q.X., Yang X. Axial force analysis and roll contour configuration of four-high CVC mill // Mathematical Problems in Engineering. – 2018. – Vol. 2018, 7527402.

143. Прокатная клетка с парой CVC-валков. Патент на изобретение № 2268795, Российская Федерация, МПК В21В13/14 – № 2003106400/02; заявл. 25.07.2001; опубл. 27.01.2006. Бюл. № 3. / Хартунг Х., Кламма К., Роде В., Зайдель Ю.; патентообладатель «СМС ДЕМАГ АКЦИЕНГЕЗЕЛЛЬШАФТ (DE)».

144. Гарбер Э.А. Производство проката: Справочное издание. Том 1. Книга 1. Производство холоднокатаных полос и листов (сортамент, теория, технология, оборудование). – М.: Теплотехник, 2007. – 368 с.

145. Николаев В.А. Профилирование и износостойкость листовых валков. – Киев: Техника, 1992. – 158 с.

146. Николаев В.А., Путники А.Ю. Прокатка широкополосной стали. – Киев: Освита Украины, 2009. – 268 с.

147. Полецков П.П. Разработка профилировок валков широкополосных станов горячей прокатки // *Металлург*. – 2011. – №8. – С. 57–61.

148. Робертс В. Холодная прокатка стали. – М.: Metallurgiya, 1982. – 524 с.

149. Плахтин В.Д., Тишков В.Я., Сергеев В.П. Профилирование скрещивающихся рабочих валков для прокатки полос // *Сталь*. – 2001. – № 4. – С. 42–45.

150. Гарбер Э.А., Щербаниц Э.Н., Шичков А.Н., Нагаев С.А., Масленников В.А., Титаренко И.А. Новые профилировки валков четырехклетевого и дрессировочного станов холодной прокатки // *Сталь*. – 1971. – № 5. – С. 429–432.

151. Гарбер Э.А., Хлопотин М.В., Савиных А.Ф., Кожевников А.В., Голованов А.В., Смирнов В.С. Промышленные испытания усовершенствованных профилировок рабочих валков на широкополосном стане горячей прокатки // *Производство проката*. – 2008. – № 4. – С. 18–21.

152. Способ профилирования рабочих валков полосового прокатного стана. Патент на изобретение № 2361690, Российская Федерация, МПК В21В27/02 – № 2008105240/02; заявл. 01.02.2008; опубл. 20.07.09. Бюл. № 20. / Торопов С.С., Смирнов В.С. Савиных А.Ф., Немтинов А.А., Голованов А.В., Пименова Т.В., Гарбер Э.А., Хлопотин М.В., Кожевников А.В.

153. Способ профилирования валков чистовой группы клеток кварто стана горячей прокатки полос. Патент на изобретение № 2319560, Российская Федерация, МПК В21В1/26 – №2006119136/02; заявл. 31.05.2006; опубл. 20.03.2008. Бюл. № 8. / Степанов А.А., Гейер В.В., Краев А.Д., Рагуцкий Г.А.,



Князев А.Л., Трайно А.И., Тяпаев О.В., Росляков Н.Е., Пименова Т.В.; патентообладатель Открытое акционерное общество «Северсталь».

154. Борисов В.И., Иванов В.А. Метод определения рабочих профилей валков листопркатных станов и его анализ. // Производство проката. – 2006. – № 3. – С. 2–14.

155. Салганик В.М., Полецков П.П., Кухта Ю.Б. Алгоритмы и программный продукт «Профиль 2500» для прогнозирования и оценки профиля, плоскостности горячекатаных полос и состояния опорных валков стана 2500 горячей прокатки // Известия вузов. Черная металлургия. – 2008. – № 7. – С. 50–54.

156. Полецков П.П. Алгоритм разработки универсальной профилировки валков клетки кварто тонколистовых станов // Естественные и технические науки. – 2011. – №4 (54). – С. 509–511.

157. Синнаве М., Гостев К.А., Глухов В.В., Смирнов В.С. Современные высокопроизводительные прокатные валки, особенности и перспективы эксплуатации // Сталь. – 2001. – № 8. – С. 2–8.

158. Гостев К. Основные направления повышения качества листового проката и современные требования к валкам // Сталь. – 2002. – № 2. – С. 52–53.

159. Скорохватов Н.Б., Глухов В.В., Смирнов В.С., Гостев К.А. Эксплуатация высокопрочных прокатных валков на стане 2000 // Сталь. – 2002. – № 3. – С. 88–92.

160. Скорохватов Н.Б., Глухов В.В., Смирнов В.С., Гостев К.А., Тахаутдинов Р.С., Лебедев С.А., Носов В.Л., Боровков И.В., Фиркович А.Ф. Опыт эксплуатации современных прокатных валков в условиях ОАО «Северсталь», ОАО ММК и ОАО НЛМК // Сталь. – 2004. – № 1. – С. 40–43.

161. Соколов П.Б. Эксплуатация прокатных валков ОАО «Уралмашзавод» с содержанием хрома 3–5 % // Сталь. – 2014. – № 1. – С. 35–37.

162. Гостев К. Современные валки на станах 2000 Череповецкого и Магнитогорского металлургических комбинатов // Металлург. – 2008. – № 9. – С. 52–55.

163. Хайстеркам П., Шнайдер З., Джи д-р В. Расширяя пределы возможностей материалов опорных валков // Труды XII Конгресса прокатчиков (том II). Сборник статей. – Москва: Грин Принт, 2020. – С.215–226.

164. Способ подготовки прокатных валков к работе в течение эксплуатационной кампании. Авторское свидетельство №1342549, СССР, МПК В21В 28/02; заявл. 26.05.1986; опубл. 07.10.1987. / Скобло Т.С., Рудюк С.И., Вишнякова Е.Н., Колмыков Н.В., Руднев А.Е, Панков М.И., Климанчук В.В., Лямцев В.П., Матула А.А.

165. Способ эксплуатации опорного валка. Патент на изобретение № 2113297, Российская Федерация, МПК В21В28/02 – 97111147/02; заявл. 07.07.1997; опубл. 20.06.19986. / Пименов А.Ф., Скороходов В.Н., Лисин В.С., Настич В.П., Николаев ВА., Белянский А.Д., Угаров А.А., Фридкин Е.А., Гадвцкий Ю.Л., Трайно А.И.

166. Способ эксплуатации валков листопрокатной клетки кварто. Патент на изобретение № 2184631, Российская Федерация, МПК В21В28/02 – 2000117417/02; заявл. 03.07.2000; опубл. 10.07.2002. Бюл. № 19. / Глухов В.В., Луканин Ю.В., Смирнов В.С., Григорьев А.Н., Трайно А.И., Титов В.А., Пешев А.Д.

167. Боровик Л.И., Добронравов А.И. Технология подготовки и эксплуатации валков тонколистовых станов. – М.: Металлургия, 1984. – 105 с.

168. Способ эксплуатации опорного валка. Патент на изобретение № 2374017, Российская Федерация, МПК В21В28/02 – 2007149110/02; заявл. 28.12.2007; опубл. 27.11.2009. Бюл. № 33. / Торопов С.С., Смирнов В.С., Савиных А.Ф., Трайно А.И., Русаков А.Д.

169. Способ эксплуатации опорного валка. Патент на изобретение № 2093268, Российская Федерация, МПК В21В28/02 – 96113387/02; заявл. 01.07.1996; опубл. 20.10.1997. / Ветер В.В., Белянский А.Д., Трайно А.И., Коньшин А.П.

170. Гарбер Э.А., Румянцев В.В., Спиричев А.В. Напряженное состояние опорных валков стана холодной прокатки, упрочняемых обкаткой в рабочей клетки // Производство проката. – 2000. – № 3. – С. 21–24.

171. Ефименко С.П., Трайно И.А., Гарбер Э.А., Спиричев А.В. и др. Повышение стойкости опорных валков стана холодной прокатки методом поверхностного деформационного упрочнения // Бюллетень института Черметинформация. – 1998. – № 11, 12. С. 55–58.

172. Цун А.М., Фиркович А.Ю., Добронравов А.И. и др. Повышение работоспособности опорных валков стана кварто методом обкатки // Сталь. – 1983. – № 9. – С. 57–59.

173. Способ подготовки к эксплуатации валков листопрокатной клетки кварто. Патент на изобретение № 2131311, Российская Федерация, МПК В21В28/02 – 98106150/02; заявл. 03.04.1998; опубл. 10.06.1999. / Луканин Ю.В., Ефименко С.П., Трайно А.И., Гарбер Э.А., Спиричев А.В., Абраменко В.И., Горелик П.Б., Антонов В.Ю.

174. Способ подготовки к эксплуатации валков листопрокатной клетки кварто. Патент на изобретение № 2185258, Российская Федерация, МПК В21В28/02 – 2000125412/02; заявл. 09.10.2000; опубл. 20.07.2002. Бюл. № 20. / Гарбер Э.А., Спиричев А.В., Румянцев В.В., Луканин Ю.В., Абраменко В.И., Горелик П.Б., Антонов В.Ю., Трайно А.И.

175. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.

176. Абрамов В.В. Остаточные напряжения и деформации в металлах. Расчеты методом расчленения тела М.: Машгиз, 1963. – 356 с.

177. Маталин А.А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин. – Киев: Техника, 1971. – 122 с.

178. Колмогоров В.Л., Богатов А.А., Мигачев Б.А., Зудов Е.Г., Фрейдензон М.Е. Пластичность и разрушение. – М.: Metallurgy, 1977. – 336 с.

179. Поздеев А.А., Няшин Ю.И., Трусов П.В. Остаточные напряжения, теория и приложения. – М.: Наука, 1982. – 111 с.

180. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В., Тиунов В.В. Технологические остаточные напряжения и их влияние на долговечность и надежность металлоизделий. – Пермь: Издательство Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2012. – 226 с.

181. Богатов А.А. Остаточные напряжения и разрушение металла // Материалы 6-ой Международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении». – Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2013 г. – С. 95–101.

182. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В. Технологические остаточные напряжения после обработки металлов давлением // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2016. – Т. 16. – № 1. – С. 41–45.

183. Буркин С.П., Шимов Г.В., Андрюкова Е.А. Металлургия. Остаточные напряжения в металлопродукции. – М.: Издательство Юрайт, 2018. – 247 с.

184. Павлов В.Ф., Кирпичев В.А., Вакулук В.С. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочненных образцов с концентраторами напряжений. – Самара: Издательство Самарского государственного аэрокосмического университета, 2011. – 125 с.

185. Кудрявцев И.В. Влияние остаточных напряжений на усталостную прочность стали. – М.: ВИНТИ, 1957. – 17 с.

186. Покровский А.М. Расчет остаточных напряжений в биметаллических опорных прокатных валках после термической обработки // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2012. – № 6. – С. 186–196.

187. Зубаирова Л.Х., Свирщев В.И. Определение остаточных напряжений от действия силы резания при шлифовании // Материалы НТК «Новые и нетрадиционные технологии в ресурс- и энергосбережении». – Киев-Одесса, 2013. – С. 156–158.

188. Гатовский К.М. Теория сварочных напряжений и деформаций. – Ленинград: Изд-во: Ленинградского Ордена Ленина кораблестроительного института, 1980. – 331 с.

189. Colegrove P., Ikeagu C., Thistlethwaite A., Williams S. The welding process impact on residual stress and distortion // Science and Technology of Welding and Joining. – 2009. – Vol. 14(8). – P. 717–725.

190. Arif A.F., Yilbas B.S. Thermal stress developed during the laser cutting process: consideration of different materials // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2008. – Vol. 37. – No. 7–8. – P. 698–704.

191. Arif A.F., Yilbas B.S., Aleem B.J. Laser cutting of thick sheet metals: Residual stress analysis // Optics & Laser Technology. – 2009. – Vol. 41. – No. 3. – P. 224–232.

192. Дьяченко Ю.В., Маковецкий А.В. Хитрых Е.Е. Численное моделирование процессов лазерной резки листовых авиационных материалов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2014. – № 63. – С. 104–113.

193. Королев А.А. Упруго-пластический изгиб полосы при правке ее на многороликовой машине // Материалы сборника статей «Прокатные станы и технология прокатки. – М.: Машгиз, 1957. – С. 57–76.

194. Королев А.А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов. – М.: Metallurgia, 1985. – 376 с.

195. Слоним А.З., Сонин Л.А. Машины для правки листового и сортового проката. – М.: Metallurgia, 1981. – 232 с.

196. Данько В.М. Механическое оборудование прокатных цехов. – Алчевск: ДонДТУ, 2007. – 167с.

197. Семененко Ю.Л. Машины для правки проката. – М.: Metallurgizdat, 1961. – 209 с.

198. Остринский А.С. Определение расчетных параметров листовых роликовых правильных машин // Сборник трудов ВНИИМЕТМАШ. – 1966. – №18. – С. 7–32.

199. Недорезов И.В. Моделирование процессов правки проката на роликовых машинах. – Екатеринбург: АКВА-пресс, 2003. – 255 с.

200. Недорезов И.В. Основные подходы к моделированию процессов правки проката на роликовых машинах // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Непрерывные процессы обработки давлением». – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. С. 179–184.

201. Шелест А.Е., Юсупов В.С., Перкас М.М., Шефтель Е.Н., Просвирнин В.В., Акопян К.Э. Разработка методики определения геометрических и деформационных параметров правки металлических листов на роликоточильных машинах // Производство проката. – 2016. – №. 7. – С. 2–8.

202. Шелест А.Е., Юсупов В.С., Перкас М.М., Шефтель Е.Н., Акопян К.Э., Просвирнин В.В. // Институт металлургии материаловедения им. А.А. Байкова РАН – 80 лет. Сборник научных трудов. – М.: Интерконтакт Наука, 2018. – С. 187–216.

203. Шинкин В.Н., Барыков А.М. Расчет технологических параметров холодной правки стального листа на девятироликовой листопрямительной машине SMS Siemag металлургического комплекса стан-5000 // Производство проката. – 2014. – № 5. – С. 7–15.

204. Шинкин В.Н. Расчет технологических параметров правки тонкой стальной полосы на пятнадцатироликовой листопрямительной машине фирмы Fagor Arrasate // Молодой ученый. 2015. № 10. С. 361-366.

205. Шинкин В.Н. Расчет сил и моментов семироликовой правильной машины при предварительной правке стального листа // Известия Высших учебных заведений. Черная Металлургия. – 2017. – Т. 59. – №. 12. – С. 870–874.

206. Шинкин В.Н. Приближенные методы расчета  $(2n+1)$ -роликовой листопрямляющей машины. Часть 1. Первое приближение // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2017. – № 2–1. – С. 40–44.

207. Шинкин В.Н. Приближенный метод расчета кривизны листа при правке на семирроликовой машине // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2017. – № 1–3. – С. 44–47.

208. Shinkin V.N. Arithmetical method of calculation of power parameters of 2N-roller straightening machine under flattening of steel sheet // CIS Iron and Steel Review. – 2017. – Vol. 14. P. 22–27.

209. Салганик В.М., Зайцев Д.А. Математическое описание процесса холодной правки толстых листов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2016. – Т.1. – № 1. – С. 56–59.

210. Зайцев Д.А. Улучшение плоскостности толстого листа на основе расчета параметров правки в холодном состоянии // Сталь. – 2018. – № 2. – С. 22–24.

211. Максимов Е.А., Шаталов Р.Л., Васильев Ю.С. Уточнение методики расчета параметров правки толстых листов на роликовой правильной машине // Сталь. – 2017. – № 1. – С. 35–38.

212. Maksimov E.A., Shatalov R.L. A Study of the parameters for hot straightening of thick steel plates on a roller straightening machine // Metallurgist. – 2018. – Vol. 62 (1-2). – P. 132–137.

213. Максимов Е.А., Шаталов Р.Л., Васильев Ю.С. Уточнение методики расчета параметров правки толстых листов на роликовой правильной машине // Сталь. – 2017. – № 1. – С. 35–38.

214. Максимов Е.А., Шаталов Р.Л. Повышение качества листов из строительных сталей путем правки на роликовой правильной машине // Черные металлы. – 2018. – № 6. – С. 49–55.

215. Behrens B.A., El Nadi T., Krimm R. Development of an analytical 3D-simulation model of the levelling process // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2011. – Vol. 211. – No. 6. – P.1060–1068.

216. Behrens B.-A., Krimm R. Controlled sheet metal straightening // *Supplemental Proceedings 3, TMS*. – 2008. – P. 129–136.

217. Chen W. A 2.5-dimensional analytical model of cold leveling for plates with transverse wave defects // *Journal of Iron and Steel Research International*. – 2015. – Vol. 22. – No. 8. – P. 664–671.

218. Madej L., Muszka K., Perzyński K., Majta J., Pietrzyk M. Computer aided development of the levelling technology for flat products // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 2011. – Vol. 60. – P. 291–294.

219. Silvestre E., Sáenz de Argandoña E., Galdós L., Mendiguren J. Testing and modeling of roll levelling process // *Key Engineering Materials*. – 2014. – Vol. 611–612. – P. 1753–1762.

220. Behrens B.-A., Nadi T.El., Krimm R. Development of an analytical 3D-simulation model of the levelling process // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2011. – Vol. 211. – No. 6. – P.1060–1068.

221. Grüber M., Hirt G. Numerical investigation of a process control for the roller levelling process based on a force measurement // *Materials Science Forum. Trans Tech Publications*. – 2015. – Vol. 854. – P. 249–254.

222. Grüber M., Oligschläger M., Hirt G. The effect of the initial stress and strain state in sheet metals on the roller levelling process // *Key Engineering Materials. Trans Tech Publications*. – 2015. – Vol. 651. – P. 1023–1028.

223. Grüber M., Hirt G. A strategy for the controlled setting of flatness and residual stress distribution in sheet metals via roller levelling // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 207. – P. 1332–1337.

224. Грибков Э.П., Завгородний А.В., Гаврильченко Е.Ю., Горбенко А.С. Программное обеспечение для проектирования технологических параметров настройки многороликовых листопрямильных машин // *Научный вестник*



Донбасской государственной машиностроительной академии. – 2015. – № 2. – С. 33–38.

225. Барабаш А.В., Гаврильченко Е.Ю., Грибков Э.П., Марков О.Е. Моделирование процесса правки на листопрямильных машинах с исправлением дефекта волнистости проката // Сталь. – 2014. – № 12. – С. 62–66.

226. Болобанова Н.Л., Гарбер Э.А. Исследование и моделирование процесса деформации сляба в черновой группе стана 2000 // Metallurg. – 2021. – № 5. – С. 71–75.

Bolobanova N.L., Garber E.A. Study and modeling of slab deformation processes in the roughing stands of Severstal's mill-2000 hot-rolling line // Metallurgist. – 2021. – Vol. 65. No. 5-6. – P. 564–570 (перевод).

227. Болобанова Н.Л., Гарбер Э.А. Численное моделирование процесса деформации сляба с разной величиной обжатия в вертикальных валках черновой группы стана 2000 // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2021. – № 6. – С. 675–681.

228. Недорезов И.В., Белоглазов Е.Г., Нестерова Н.Д., Мезрина Т.А., Макаров Ю.Д. Расчеты прочности и оценка ресурса долговечности действующих прокатных станов // Сталь. – 2008. – № 11. – С. 108–110.

229. Синицкий В.М., Иванов А.В., Виноградов Н.А. Анализ конструктивных схем клетей станов холодной прокатки с повышенной точностью проката // Производство проката. – 2012. – № 3. – С. 11–16.

230. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л., Трайно А.И. Применение метода конечных элементов для расчета профилировок валков широкополосных станов // Металлы. – 2012. – № 3. – С. 19–24.

Garber E.A., Bolobanova N.L., Traino A.I. Use of a finite element method to calculate roll for broad-strip mills // Russian Metallurgy. – 2012. – No. 5. – P. 370–374. (перевод).

231. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л. Профилирование валков широкополосных станов с применением метода конечных элементов // Производство проката. – 2012. – № 3. – С. 6–10.

232. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л. Совершенствование метода моделирования упругих деформаций валков клетки кварто и их влияния на поперечный профиль широких полос // Производство проката. – 2012. – № 12. – С. 14–18.

233. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л. Повышение точности моделирования поперечной разнотолщинности широких полос с использованием метода конечных элементов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2012. – № 12. – С. 50–53.

234. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л. Совершенствование методики расчета упругих деформаций валковой системы клетки «кварто» для повышения точности выполнения поперечного профиля широких полос // Материалы Международной научно-практической конференции «Современная металлургия начала нового тысячелетия». Часть II. – Липецк: Из-во ЛГТУ, 2012 г. – С. 3–8.

235. Болобанова Н.Л., Гарбер Э.А. Особенности моделирования упругих деформаций валков клетки «кварто» методом конечных элементов, обеспечивающие повышение точности расчета поперечного профиля полосы // Материалы Международного научного семинара «Научно-технический прогресс в металлургии – 2012». – Череповец: ЧГУ, 2013. – С. 138–146.

236. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л. Совершенствование методов моделирования профилировок валков листопрокатного производства // Материалы II Международной научно-технической конференции «Научно-технический прогресс в черной металлургии». – Череповец: ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет», 2015. – С.106–111.

237. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л. Развитие методов профилирования валков широкополосных станов // Материалы X Международной научно-технической конференции «Автоматизация и энергосбережение

машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования». – Вологда: Вологодский государственный университет, 2015. – С. 52–63.

238. Трение, изнашивание и смазка. Справочник. В 2-х книгах. Кн. 2. / Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1979. – 358 с.

239. Гарбер Э.А., Горшков И.К., Ермилов В.В. Статистическая модель трения 1-го рода в силовом контакте валков станов холодной прокатки // Производство проката. – 2001. – № 11. – С. 10–12.

240. Харченко М.В., Амиров Р.Н., Латыпов О.Р. Моделирование фрикционного контакта пары трения рабочий-опорный валок // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением. – 2018. – № 24. – С. 40–47

241. Дема Р.Р., Платов С.И., Харченко М.В., Латыпов О.Р., Калугина О.Б., Колдин А.В., Кургузов С.А. Компьютерное и математическое моделирование процесса горячей прокатки с применением смазочных материалов в программном комплексе Deform-3D. Сообщение 2. Компьютерное моделирование процесса контактного взаимодействия «опорный валок – рабочий валок» при листовой горячей прокатке с применением технологической смазки // Производство проката. – 2019. – № 8. – С. 8–12.

242. Харченко М.В., Платов С.И., Дема Р.Р., Колдин А.В., Латыпов О.Р., Кинзина И.И. Компьютерное и математическое моделирование процесса горячей прокатки с применением смазочных материалов в программном комплексе Deform-3D. Сообщение 3. Исследование напряженного состояния в системе «опорный валок-рабочий валок» при листовой горячей прокатке с применением технологической смазки // Производство проката. – 2019. – № 11. – С. 13–18.

243. Дема Р.Р. Развитие методологии комплексного совершенствования технологии и оборудования для смазывания и охлаждения валков листовых станов горячей прокатки: автф. дис. ...д-ра техн. наук: 05.02.09. – ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – Магнитогорск, 2021. – 36 с.

244. Полухин В.П., Николаев В.А., Тылкин М.А., Шульман П. Т., Масол В. А., Ефименко С.П., Дунаевский В.И., Вальчук Г.И., Белкин М.Я., Венжега А.С. Надежность и долговечность валков холодной прокатки. – М.: Металлургия, 1976. – 448 с.

245. Антонов П.В., Болобанова Н.Л., Кожевникова И.А. Моделирование напряжений и деформаций валковой системы широкополосного стана холодной прокатки на основе метода конечных элементов // Сталь. – 2019. – № 5. – С. 28–32.

Antonov P.V., Bolobanova N.L., Kozhevnikova I.A. Roller Stress and Strain in a Broad-Strip Cold-Rolling Mill // Steel in Translation. – 2019. № 5(49). – P. 339–344 (перевод).

246. Антонов П.В. Разработка и исследование новых методов воздействия на поперечный профиль холоднокатаных полос и повышения качества их поверхности: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05. – Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, 2019. – 100 с.

247. Антонов П.В., Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л. Повышение точности формирования поперечного профиля и качества поверхности холоднокатаных полос // Труды XII Конгресса прокатчиков (том II). Под редакцией Спирина С.А., Думчевой Т.Н. – Москва: Грин Принт, 2020. – С. 160–166.

248. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л., Антонов П.В. Новые методы воздействия на поперечный профиль и качество поверхности стальных холоднокатаных полос: Монография. – Череповец: Череповецкий гос. ун-т, 2021. – 81 с.

249. Салганик В.М. Математическое моделирование деформаций и нагрузок валковой системы кварто для повышения ее стойкости и качества прокатываемых полос // Пути развития машиностроительного комплекса Магнитогорского металлургического комбината: Сб. науч. тр. Вып. 2 «Прокатные валки». – Магнитогорск: ПМП «МиниТип». – 1996. – С. 120–128.

250. Болобанова Н.Л., Гарбер Э.А., Ермушин Д.Ю. Исследование напряженного состояния опорных валков широкополосного стана горячей прокатки методом моделирования // *Сталь*. – 2021. – № 12. – С.15–18.

Bolobanova N.L., Garber E.A., Ermushin D.Yu. Stress analysis of backup rolls in a wide-strip hot mill using a modeling method // *Steel in Translation*. – 2021. – № 12 (51). – P. 899–902 (перевод).

251. Болобанова Н.Л., Гарбер Э.А., Юсупов В.С. Развитие методов профилирования валков листопрокатного производства // *Сталь*. – 2022. – №. 11. – С. 18–23.

Bolobanova N.L., Garber E.A., Yusupov V.S. Development of roll profiling methods of sheet rolling production // *Steel in Translation*. – 2022. – № 52(11). – P. 1073–1078 (перевод).

252. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л., Корчагин А.М., Сычев О.Н., Запевалов В.П., Покровский Д.А. Новая методика профилирования опорных валков толстолиствого стана // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. – 2015. – № 2. – С. 69–73.

253. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л., Корчагин А.М., Сычев О.Н., Запевалов В.П., Покровский Д.А. Развитие методов профилирования валков толстолиствого стана // *Материалы Международного научного семинара «Проблемы черной металлургии-2014»*. – Череповец: ЧГУ, 2015. – С. 113–120.

254. Способ профилирования опорных валков стана кварто. Патент на изобретение № 2585594, Российская Федерация, МПК В21В27/02 – 2015110267/02; заявл. 23.03.2015; опубл. 27.05.2016. Бюл. № 15. / Запевалов В.П., Корчагин А.М., Покровский Д.А., Сычев О.Н., Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л.

255. Болобанова Н.Л., Ермушин Д.Ю. Исследование интенсивности напряжений в контакте валков чистовой группы широкополосного стана горячей прокатки // *Сборник трудов XIII Международной научно-технической конференции «Интеллектуально-информационные технологии и интеллектуальный бизнес (ИНФОС-2022)»*. – Вологда: ВоГУ, 2022. – С. 91–94.

256. Мыльников В.В., Кондрашкин О.Б., Шетулов Д.И. Циклическая прочность и долговечность конструкционных материалов: монография. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2018. – 177 с.

257. Ермушин Д. Ю., Лобачев А. А., Болобанова Н. Л. Прогнозирование упрочнения бочки опорного вала на основе компьютерного моделирования // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2023. – № 1 (112). – С. 27–38.

258. Ермушин Д.Ю., Болобанова Н.Л. Исследование поверхностного деформационного упрочнения бочки опорных валков чистовой группы широкополосного стана горячей прокатки // Черные металлы. – 2023. – № 2. – С. 27–32.

259. Болобанова Н.Л., Ермушин Д.Ю. Моделирование поверхностного деформационного упрочнения инструмента при широкополосной прокатке // Материалы Международной научно-технической конференции «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» «Технология – Оборудование – Инструмент – Качество». Под редакцией Шелег В.К. – Минск: Бизнесофсет, 2023. – С.10–12.

260. Богомолов Ю.С., Дель Г.Д., Седоков Л.М. Зависимость между твердостью и напряжением деформируемого тела // Известия Томского политехнического института им. С.М. Кирова. – 1966. – Том 147. – С. 14–17.

261. Касаткин Б.С., Кудрин А.Б., Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Полухин П.И., Чиченев Н.А. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений. – Киев: Наукова думка, 1981. – 584 с.

262. Пригоровский Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений. Справочник. – М.: Машиностроение, 1983. – 248 с.

263. Экспериментальная механика / Под. ред. А. Кобаяси. В 2-х томах: Т. 1. – М.: Мир, 1990. – 616 с.

264. Дайчик М.Л., Пригоровский Н.М., Хуршудов Г.Х. Методы и средства натурной тензометрии. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.

265. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник под. ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.

266. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электроннооптический анализ. М.: МИСИС, 2002. 360 с.

267. Дубов А.А., Дубов Ал. А., Колокольников С.М. Метод магнитной памяти металла и приборы контроля. – М.: Изд-во ЗАО «Тиссо», 2008. – 365 с.

268. Котов К.А., Нуштаев Д.В., Болобанова Н.Л. Исследование механизма формирования остаточных напряжений при правке горячекатаных полос на роликовых правильных машинах // Материалы IV Международной научно-технической конференции «Научно-технический прогресс в черной металлургии – 2019». Череповец: Череповецкий государственный университет, 2019. – С. 103–109.

269. Котов К.А., Нуштаев Д.В., Болобанова Н.Л. Механизм возникновения остаточных напряжений при правке горячекатаных полос на роликовых правильных машинах // Материалы III Международной научно-технической конференции, посвященной 120-летию со дня рождения член-корреспондента АН СССР Павлова Игоря Михайловича «Павловские чтения». Москва: ИМЕТ РАН, 2021. – С. 55–57.

270. Trusov K.A., Mishnev P.A., Garber E. A., Bolobanova N.L., Nushtaev D.V., Ardatov K.V. Investigation of blank bow defect after roller leveller by finite element analysis // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1063, 2018. 012192.

271. Котов К.А., Болобанова Н.Л. Моделирование процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации // Материалы VIII Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». Москва: ИМЕТ РАН, 2019. – С. 716-718.

272. Котов К.А., Болобанова Н.Л., Нуштаев Д.В. Моделирование напряжений при правке горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2020. – Том 63. № 10. – С. 808–814.

Kotov K.A., Bolobanova N.L., Nushtaev D.V. Modeling the stress state of a steel strip with a roller leveling machine under cyclic alternating deformations // *Steel in Translation*. – 2020. – № 11(50). – P. 750–755 (перевод).

273. Болобанова Н.Л., Котов К.А., Нуштаев Д.В. Исследование коэффициента пластификации при правке горячекатаных стальных полос на роликовых правильных машинах // *Сталь*. – 2020. – № 3. – С. 32–36.

274. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л., Трусов К.А. Моделирование и исследование конструктивных параметров роликовых правильных машин // *Материалы III Международной научно-технической конференции «Научно-технический прогресс в черной металлургии – 2017»*. Череповец: Череповецкий государственный университет, 2017. – С. 63–69.

275. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л., Трусов К.А. Выявление и устранение причин потери плоскостности горячекатаных стальных листов в процессе их лазерной резки // *Производство проката*. – 2017. – № 6. – С. 11–15.

276. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л., Трусов К.А. Применение метода конечных элементов для выявления причин потери плоскостности горячекатаных стальных листов в процессе их лазерной резки // *Металлы*. – 2018. – № 1. – С. 103–108.

Garber E.A., Bolobanova N.L., Trusov K.A. application of the finite element method to reveal the causes of loss of planeness of hot-rolled steel sheets during laser cutting // *Russian Metallurgy (Metally)*. – 2018. – No. 1. – P. 103-108 (перевод).

277. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л., Трусов К.А. Моделирование напряжений и деформаций в плоской стальной полосе при ее правке в роликовой правильной машине // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. – 2018. – № 1. – С. 68–73.

278. Котов К.А. Исследование и совершенствование процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05. – Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, 2020. – 139 с.



279. Котов К.А., Болобанова Н.Л., Нуштаев Д.В. Разработка режимов правки горячекатаных полос в целях получения проката для высокотехнологичной обработки // Черные металлы. – 2021. – № 2. – С. 16–21.

280. Болобанова Н.Л., Котов К.А., Юсупов В.С. Исследование и прогнозирование пластификации горячекатаной стальной полосы при правке в условиях знакопеременного деформирования // Metallurg. – 2022. – № 10. – С. 93–98.

Bolobanova N.L., Kotov K.A., Yusupov V.S. Study and prediction of plasticization of hot-rolled steel strip during straightening under conditions of alternating deformation // Metallurgist. – Vol. 66. – No. 9-10. – P. 1290–1298 (перевод).

281. Гарбер Э.А., Тимофеева М.А., Павлов С.И., Болобанова Н.Л., Антонов В.Ю., Дятлов И.А. Влияние профилировок рабочих и опорных валков на шероховатость поверхности широких холоднокатаных автомобильных листов // Производство проката. – 2011. – № 7. – С. 9–13.

282. Гарбер Э.А., Тимофеева М.А., Павлов С.И., Болобанова Н.Л., Антонов В.Ю., Дятлов И.А. Исследование и устранение сверхнормативной шероховатости поверхности прикромочных участков широких холоднокатаных полос // Вестник ЧГУ. – Череповец: ЧГУ. – 2011. – № 4. Том 2. – С. 5–8.

283. Kozhevnikov A.V., Kozhevnikova I.A., Bolobanova N.L., Antonov P.V., Anisimov D.A. Improvement of operational efficiency of cold rolling mill work rolls // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2019. – № 6(54). – P. 1298–1304.

284. Kozhevnikova I.A., Bolobanova N.L., Antonov P.V., Zhilenko S.V., Kozhevnikov A.V. Development and industrial testing of advanced rolling conditions at 4-stand mill 2100 of PAO Severstal // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 718, 2020. 012008.

285. Ермушин Д.Ю., Болобанова Н.Л., Кожевникова И.А. Моделирование температурного состояния рабочего валка при холодной прокатке // Черная

металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2020. – № 5. – С. 482–488.

286. Справочник средств измерений: измерители профиля горячекатаной полосы Sipro. URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/70849-18-sipro> (дата обращения 02.12.2022 г.)



Дата 01.09.2022  
№ ИС-404-00-дд-150

На №  
От

Череповецкий государственный  
университет

пр. Луначарского, д. 5  
г. Череповец,  
162600

#### Справка об экономическом эффекте

Настоящая справка подтверждает экономический эффект от реализации научно-исследовательских работ, выполненных под руководством Н.Л. Болобановой, а также при участии Н.Л. Болобановой:

1. 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 (№ 986НП от 22.12.2009 г.).
2. Определение оптимальных обжатий в вертикальных и горизонтальных валках черновой группы стана, подбор профилировок вертикальных валков стана 2000, обеспечивающих уменьшение течения металла от ребра на широкую грань при прокатке слябов из стали типа 08Ю, имеющих дефекты на узкой грани (№ 989НП от 21.07.2010 г.).
3. Разработка системы профилировок рабочих и опорных валков стана 5000 ЛПЦ-3 (№ 1021НП от 23.12.2013 г.).
4. Разработка специальных методов и режимов правки проката для лазерной резки в условиях ЛПЦ-2 с целью обеспечения его плоскостности (№ 1040НП от 16.12.2015 г.).
5. Совершенствование технологии производства холодного проката на 4-клетевом стане 2100 ЦПиО ППП (№ 1051НП/ 9000081409 от 25.07.2018 г.).
6. Разработка технологии эксплуатации опорных валков стана 2000 в зависимости от цикличности нагрузки и ее величины (№ 1059НП/ 9000098006 от 9.09.2019 г.).

После внедрения результатов указанных работ ожидаемый экономический эффект составляет 26 602,48 тысяч рублей в год.

С уважением,  
Директор по техническому развитию и  
качеству



П.А. Мишнев

О. В. Зябко  
+7 921 252 23 66