

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Череповецкий государственный университет»

На правах рукописи



КОТОВ Кирилл Андреевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРАВКИ
ГОРЯЧЕКАТАНЫХ ПОЛОС В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКОЙ
ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

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

Научный руководитель – кандидат технических наук
Болобанова Н.Л.

Череповец – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава 1. Современное состояние вопроса правки горячекатаных стальных полос	11
1.1. Проблемы повышения плоскостности горячекатаных стальных полос	11
1.2. Анализ способов правки горячекатаных стальных полос	14
1.3. Особенности циклического знакопеременного деформационного воздействия на полосу	21
1.4. Анализ существующих моделей расчета параметров процесса правки полос на роликовых правильных машинах	25
Выводы по главе 1.....	46
Глава 2. Оборудование, материалы и методика проведения исследования	48
2.1 Оборудование для правки полос	48
2.2 Исследуемые материалы.....	50
2.3 Оборудование для порезки листов высокотехнологичными методами	51
2.4 Методика определения отклонений листов от плоскостности после правки и резки для оценки уровня остаточных напряжений	52
2.5 Определение механических характеристик исследуемых материалов в условиях знакопеременного нагружения	55
Выводы по главе 2	59
Глава 3. Разработка модели процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации	60
3.1 Теоретические основы систем инженерного анализа	60
3.2 Моделирование процесса правки горячекатаной полосы в программном комплексе DEFORM	62

3.3 Математическое моделирование процесса правки полосы в программном комплексе SIMULIA Abaqus	69
3.3.1 Моделирование изгиба полосы в трех роликах	69
3.3.2 Разработка модели процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации в программном комплексе SIMULIA Abaqus	74
3.3.3 Оценка адекватности модели процесса правки полосы	83
3.4 Экспериментальное исследование влияния параметров правки на отклонение листов после плазменной и лазерной резки	85
Выводы по главе 3	91
Глава 4. Исследование напряжений и деформаций горячекатаных полос при правке в условиях циклической знакопеременной деформации	93
4.1 Исследование влияния процесса знакопеременного упруго-пластического изгиба стальных полос на неоднородность их напряженно-деформированного состояния	93
4.2 Исследование влияния исходной неплоскостности горячекатаных полос на показатели правки	102
4.3 Исследование влияния конструктивных параметров РПМ на распределение напряжений по толщине полос и их деформацию ...	104
Выводы по главе 4	109
Глава 5. Разработка методики выбора режима правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации и ее применение для усовершенствования процесса правки	110
5.1 Описание методики выбора режима правки	110
5.2 Применение методики для усовершенствования процесса правки горячекатаных полос	113
5.2.1 Разработка режимов правки горячекатаных полос из марки стали S355	113

5.2.2 Испытание и внедрение разработанных режимов правки	121
Выводы по главе 4	123
Заключение	125
Список литературы	127
Приложение	138

Введение

Горячекатаный стальной листовой прокат остается одним из видов сортамента черной металлургии, на который сохраняется большой спрос в различных отраслях машиностроения и строительной индустрии. Одновременно с ростом потребления горячекатаной листовой стали непрерывно повышаются требования к ее качественным показателям. Одним из показателей, определяющих более высокий уровень технологических и потребительских свойств листового проката, является его улучшенная плоскостность, при этом ужесточение требований может возрасти в 2 – 3 раза от значений отклонений от плоскостности, представленных в стандартах. Наряду с этим требуется обеспечивать сохранение высокой плоскостности и после переработки горячекатаного проката высокотехнологичными методами, например методом лазерной или плазменной обработки.

Практика показала, что листы, изготовленные на металлургических предприятиях без отклонений от плоскостности, при выкройке из них деталей по сложному контуру на установках лазерной или плазменной резки из-за наличия в металле остаточных напряжений теряют плоскостность и искривляются. Поскольку основной завершающей стадией производства горячекатаного проката является правка на роликовых правильных машинах (РПМ) в условиях циклической знакопеременной деформации, то исследование закономерностей распределения остаточных напряжений по толщине проката от величины деформации при правке с обеспечением высокой плоскостности после обработки высокотехнологичными методами имеет большое научное и практическое значение. Кроме того, исследования в этом направлении позволят существенно расширить методы диагностики текущего состояния продукции металлургических предприятий.

В подавляющем большинстве методов исследования знакопеременного деформирования тонкого стального проката рассматриваются вопросы определения кривизны проката, энергосиловых параметров и максимальных напряжений, возникающих при правке, а вопросы исследования

закономерностей изменения параметров напряженно-деформированного состояния горячекатаных полос при правке с обеспечением минимальных отклонений остаточных напряжений по толщине после правки с учетом упругой разгрузки и дальнейшей обработки металла вообще не рассматриваются. Все это обуславливает актуальность моделирования и исследования процесса циклического знакопеременного нагружения в машинах для правки с установлением взаимосвязи распределения остаточных напряжений по толщине металла от технологических параметров процесса и последующей высокотехнологичной обработки. Такой подход ранее не применялся.

Объект и предмет исследования.

Объектом исследования в диссертации является горячекатаная стальная полоса. Предмет исследования – механизмы формирования внутренних напряжений и снижения неоднородности распределения напряжений горячекатаных полос при правке в условиях циклической знакопеременной деформации.

Цель работы и задачи исследования.

Целью работы является совершенствование процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации на основе моделирования и исследования факторов технологии для повышения плоскостности листов при их дальнейшей обработке.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработать новую математическую модель процесса правки горячекатаной полосы на РПМ в условиях знакопеременного деформирования.
2. На основе математического моделирования исследовать механизм возникновения остаточных напряжений при правке.
3. Исследовать влияние конструктивных и технологических параметров процесса правки на показатели напряженно-деформированного состояния

горячекатаных полос при правке и после правки с учетом упругой разгрузки металла.

4. Разработать методику выбора технологических режимов правки горячекатаных полос, обеспечивающих устранение исходного неоднородного напряженного состояния полос и получение минимального уровня остаточных напряжений в готовом прокате.

5. Разработать режимы правки горячекатаных полос на роликовых правильных машинах, установленных в линиях агрегатов поперечной резки № 3 (АПР-3) и № 4 (АПР-4) цеха отделки металла № 2 ПАО «Северсталь».

6. Опробовать и внедрить в производство усовершенствованную технологию правки горячекатаных полос для получения проката, пригодного для лазерной резки.

Научная новизна работы.

1. На основе моделирования процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации получено, что:

– механизм возникновения остаточных напряжений обусловлен величиной пластической деформации и неоднородностью распределения деформаций по толщине при правке;

– после правки 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.

2. Установлены закономерности изменения напряженно-деформированного состояния горячекатаных полос при правке в зависимости от технологических параметров процесса. Показано, что максимальный уровень пластических деформаций вначале правки с минимальным их уровнем на выходе обеспечивают уменьшение значений остаточных напряжений, потенциальной энергии в листах после правки и отклонений от плоскостности листов при высокотехнологичной резке.

3. Разработана научно обоснованная методика выбора режима правки, основанная на результатах моделирования и подтвержденная экспериментальными данными, полученными при правке и последующей резке листов, отличающаяся от известных учетом неоднородности напряженно-деформированного состояния проката при правке.

Практическая значимость.

1. Разработаны рекомендации по настройке роликовых правильных машин, позволяющие уменьшить остаточные напряжения в листах после правки, путем управления напряженно-деформированным состоянием металла при прохождении его через ролики.

2. 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 получения проката для лазерной резки. Годовой экономический эффект от реализации проката толщиной 4 мм со знаком «Laser Quality Steel» может составить около 6 млн. рублей.

3. Выполнена оценка конструктивных параметров роликовых правильных машин по снижению перепада напряжений по толщине при правке сортамента толщиной 3 – 4 мм и даны рекомендации по установке в линию АПР-3 ПАО «Северсталь» машины с диаметром роликов 70 – 50 мм и их числом не менее 19.

Методы исследований и достоверность результатов.

Исследование механических свойств материала стальных горячекатаных полос при циклическом нагружении проводилось по стандартным методикам с использованием универсальных испытательных машин Galdabini Quasar 50 и Zwick/Roell HA250. Для теоретического исследования процесса правки металла в работе применялись программные комплексы DEFORM и SIMULIA Abaqus. На основе промышленного эксперимента определялись отклонения листов от плоскостности после правки и резки на установках плазменной и лазерной резки.

Достоверность результатов исследований обеспечивалась применением стандартных методов с использованием современного оборудования и подтверждалась соответствием результатов теоретических исследований лабораторным и промышленным экспериментам.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Результаты комплексного исследования процесса правки, позволившего выявить качественно новые закономерности формирования и снижения остаточных напряжений при правке на роликовых правильных машинах во взаимосвязи с последующей высокотехнологичной обработкой.

2. Методика выбора режима правки, обеспечивающая расширение возможностей процесса правки на РПМ и получение горячекатаных листов с минимальным уровнем остаточных напряжений и потенциальной энергии, пригодных для плазменной и лазерной резки.

3. Результаты опробования и внедрения методики и разработанных на ее основе технологических режимов правки в производство.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в постановке задач исследований, в получении научных результатов, в самостоятельном проведении лабораторных исследований и участии в промышленных экспериментах в рамках выполнения НИОКР «Разработка специальных методов и режимов правки проката для лазерной резки в условиях ЛПЦ-2 ПАО «Северсталь» с целью обеспечения его плоскостности».

Апробация диссертации.

Материалы диссертации докладывались на Международной конференции «Science in the age of experience» (г. Чикаго, США, 2017 г.); Международной конференции STEELSIM 2017 – 7th International Conference on Modelling and Simulation of Metallurgical Processes in Steelmaking (г. Циндао, Китай, 2017 г.); Международной конференции NUMISHEET 2018 – 11th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes (г. Токио, Япония, 2018 г.); Международной конференции «Инженерные системы» (г. Москва, 2016 г., 2017 г. и 2018 г.); III

Международной научно-технической конференции «Научно-технический прогресс в черной металлургии – 2017» (г. Череповец, 2017 г.); Всероссийской научной конференции «Череповецкие научные чтения – 2017» (г. Череповец, 2017 г.).

Публикации.

Основные положения диссертации изложены в 9 печатных работах, из которых 3 статьи опубликованы в рецензируемых журналах и изданиях из перечня ВАК, 1 статья – в научном журнале, индексируемом в базе данных Scopus и 2 статьи – в научных журналах, индексируемых в базе данных Web of Science.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПРАВКИ ГОРЯЧЕКАТАНЫХ СТАЛЬНЫХ ПОЛОС

1.1 Проблемы повышения плоскостности горячекатаных стальных полос

Общая тенденция улучшения качества производимой продукции затрагивает все отрасли промышленности и выражается в стремлении потребителей металлопроката получить стальной лист с минимальной неплоскостностью, что требует ужесточения, иногда в 2 – 3 раза, значений отклонений от плоскостности, изложенных в стандартах (таблица 1.1). Последнее обстоятельство в значительной степени повышает актуальность дальнейшего совершенствования известных подходов к вопросу улучшения плоскостности горячекатаных полос и листов.

Изучению вопросов, связанных с плоскостностью листовой горячекатаной стали, посвящены многие работы российских и зарубежных ученых [1 – 25]. В них предложены и реализованы различные мероприятия по усовершенствованию технологии и оборудования горячей прокатки, охлаждения полосы на отводящем рольганге, смотки полосы и охлаждения рулонов. Несмотря на различные разработанные методы улучшения плоскостности полосы при прокатке и применение правильных машин на завершающем этапе производства горячекатаных полос и листов, у ведущих металлопроизводителей появляются серьезные трудности по выпуску высококачественного конкурентоспособного листового проката, суть которых заключается в том, что лист, не имеющий неплоскостности, при резке с применением высокотехнологичных методов, например, таких как лазерная или плазменная резка, приобретает коробоватость или волнистость, при этом отклонение от плоскости контрольной плиты нередко превышает требования, установленные стандартом или техническими условиями на поставку. На рисунке 1.1 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. Риск возникновения таких деформаций во время и после раскроя вынуждает потребителей металлопроката запрашивать обеспечение плоскостности деталей и после обработки листов.

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				

σ_b – временное сопротивление; σ_T – предел текучести.



Рисунок 1.1 – Деформация листа после порезки

Из-за наличия в металле остаточных напряжений, неравномерно распределенных по объему, при раскрое листов кромки металла могут деформироваться вследствие релаксации остаточных напряжений, что приводит к значительному отклонению от плоскостности и короблению получаемых деталей и не позволяет качественно выполнять обработку металла на машиностроительных предприятиях. На установках лазерной или плазменной резки, из-за значительного нагрева зоны реза и увеличения эффекта релаксации напряжений, это может приводить к повреждению дорогостоящих рабочих частей оборудования, например, режущей головки.

Для эффективной работы машиностроительных предприятий, в условиях возрастающего применения высокотехнологичных методов раскроя металла, должны использоваться стальные листы не только со стабильным уровнем механических характеристик, с высоким качеством поверхности, геометрии и формы, но и с оптимальным сбалансированным по объему уровнем технологических остаточных напряжений, позволяющим сохранять форму изделия во время и после обработки.

Таким образом, решение проблемы повышения плоскостности горячекатаных стальных листов, а также обеспечения плоскостности после обработки высокотехнологичными методами актуально для прокатного производства, а продолжение исследований в направлении обеспечения высокой плоскостности горячекатаных листов с раскрытием закономерностей

распределения внутренних напряжений по толщине и ширине металла имеет большое научное и практическое значение.

1.2 Анализ способов правки горячекатаных стальных полос

На металлургических заводах весь выпускаемый листовой горячекатаный прокат проходит операцию правки для устранения рулонной кривизны и сведения к минимуму дефектов неплоскостности, которые неизбежно возникают на всех предыдущих стадиях промышленного производства и обработки – при прокатке, охлаждении и смотке. Также в процессе правки, как завершающей стадии производства листового проката, формируется конечное распределение внутренних напряжений по толщине, которое может оказать значительное влияние на процессы дальнейшей обработки листа.

Правка горячекатаного проката возможна в трех типах правильных машин: роликовой правильной машине (РПМ); изгибо-растяжной машине (ИРМ) и растяжной машине.

Правка проката на роликовых правильных машинах. Данный способ правки характеризуется тем, что металл проходит через два ряда верхних и нижних роликов, расположенных в шахматном порядке и заключенных в кассеты. При этом полоса многократно изгибается, получая цикловое воздействие растягивающих и сжимающих усилий на поверхностные волокна с напряжениями, превосходящими предел текучести материала, а внутренняя часть полосы или нейтральное волокно не подвергается деформации. РПМ подразделяют на две группы [26] (рисунок 1.2): 1 – с параллельным расположением роликов и 2 – с наклонными роликами. На машинах первой группы осуществляют правку листов и полос толщиной свыше 12 мм или предварительную правку плоского металлопроката, а на машинах второй группы – правку более тонкого сортамента.

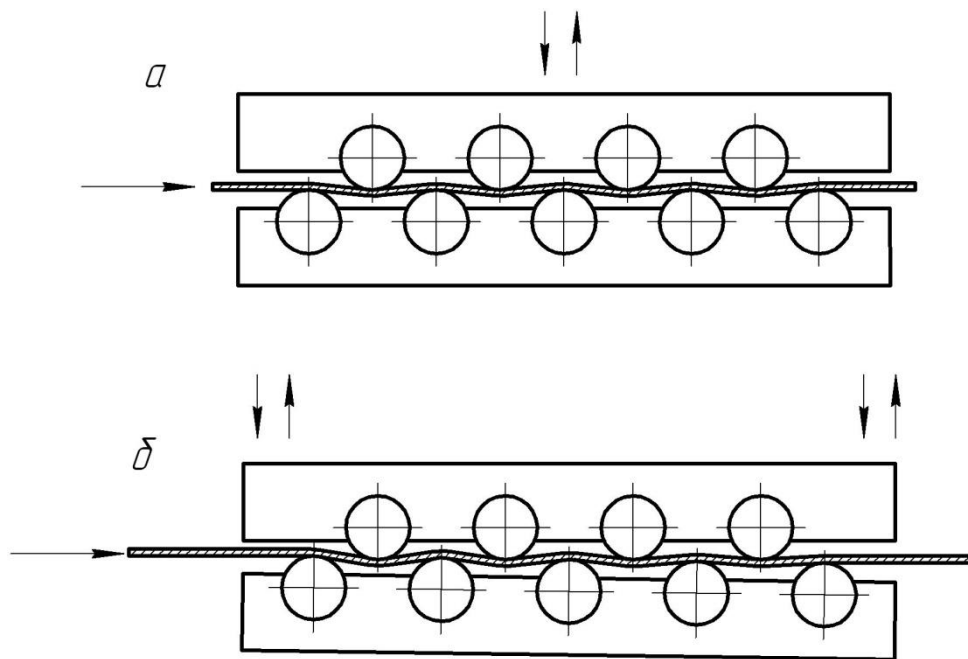


Рисунок 1.2 – Схемы роликовых правильных машин:

a – с параллельными роликами; *б* – с наклонными роликами

В машинах с параллельным расположением роликов регулируется только расстояние между верхним и нижним рядами роликов, которое обеспечивает одинаковый прогиб полосы под всеми роликами с незначительной глубиной пластической проработки проката. В машинах с наклонными роликами полоса получает наибольший прогиб между первыми роликами и по мере ее продвижения в сторону последних роликов деформация постепенно уменьшается, что позволяет расширить технологические возможности правки и обеспечить исправление дефектов формы полосы. Последние приведенные преимущества предопределили дальнейшее развитие конструкций РПМ с наклонным расположением верхней кассеты роликов.

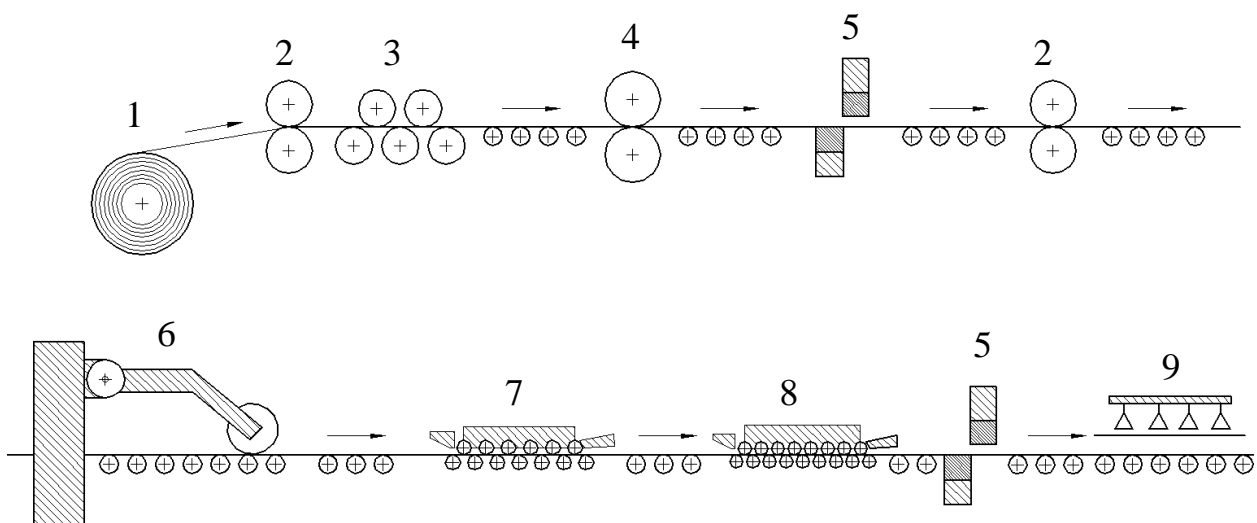
В том случае, когда необходима более точная регулировка рабочих роликов возможно применение машин [27], у которых, наряду с параллельной или наклонной установкой рабочих роликов, предусмотрена возможность независимой установки каждого рабочего ролика верхней кассеты в отдельности.

При правке полос широкого сортамента возможна установка РПМ со сменными кассетами. Сменные кассеты могут отличаться конструктивными

параметрами – числом, шагом и диаметром роликов, что позволяет расширить возможности правки полос на одной РПМ.

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

РПМ для правки полос, как правило, устанавливаются в линии агрегатов поперечной резки. Пример схемы агрегата поперечной резки (АПР) горячекатаных полос длиной от 500 до 12000 мм и толщиной от 1,5 до 12 мм представлен на рисунке 1.3. Машина предварительной правки 3 применяется для устранения дефекта рулонной кривизны и исправления грубых дефектов плоскостности и включает обычно до пяти роликов большего (в 2 – 3 раза) диаметра по сравнению с РПМ 7 и 8, установленными далее в линии для



- 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 – листоукладчик

Рисунок 1.3 – Схема агрегата поперечной резки

окончательной правки разного сортамента или последовательного применения по схеме: РПМ 7 – уменьшает дефект, а РМП 8 – его исправляет.

На сегодняшний день правка проката на роликовых правильных машинах является наиболее распространенным способом благодаря высокой производительности и эффективности исправления дефектов, а также возможности вариативного расположения, как в линии отделки проката, так и в виде отдельного агрегата по правке.

Правка на изгибо-растяжной машине (ИРМ). Упрощенная схема ИРМ представлена на рисунке 1.4. Ее центральный блок, состоящий из роликов 1 и 2, аналогично роликам РПМ, осуществляет знакопеременный упруго-пластический изгиб полосы, тем самым уменьшая ее неплоскостность. Главное отличие ИРМ – наличие двух жестких S-образных натяжных станций 3 и 4 с барабанами большого диаметра, создающих силами натяжений T_1 и T_0 растягивающие напряжения в полосе.

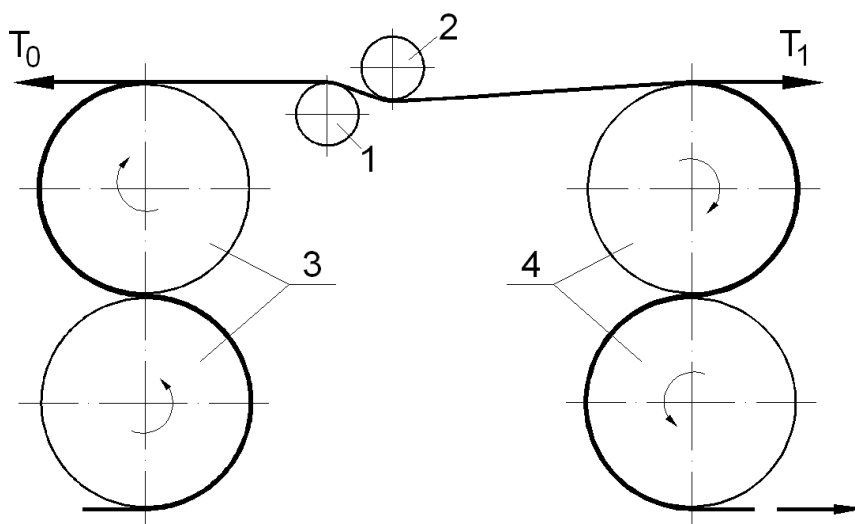


Рисунок 1.4 – Упрощенная схема изгибо-растяжной машины

Изгибо-растяжные машины обычно устанавливают в линии травления металла, где максимальная толщина полосы не превышает 6 мм. Сложность создания натяжения между двумя станциями роликов и связанное с этим увеличение протяженности ИРМ ограничивает их использование [28, 29].

Правка растяжением. Данная технология реализуется на растяжной машине [26], на которую подается лист 1, концы которого закрепляют при помощи зажимов 2 гидравлического или механического типа. Упрощенная схема правки представлена на рисунке 1.5.

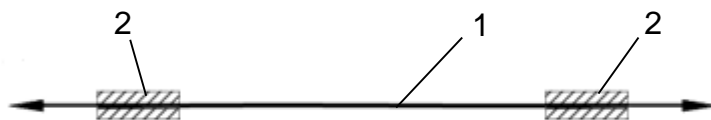


Рисунок 1.5 – Упрощенная схема правки листа растяжением

При правке материала растяжением в продольном направлении создаются напряжения, достигающие предела текучести металла и происходит выравнивание толщины листа по всей его ширине. Особенностью данного метода является то, что полоса вначале должна быть порезана на листы, которые только потом подвергаются растяжению, поэтому данный процесс характеризуется очень низкой производительностью.

Анализ качества правки. Как было показано выше, в связи с запросами потребителей металлопроката на обеспечение плоскостности деталей после обработки листов высокотехнологичными методами, возникает необходимость оценивать качество правки не только через показатели плоскостности полосы, но и учитывать распределения остаточных напряжений по толщине и ширине металла, а также степень распространения пластической деформации по толщине.

Коэффициент проникновения пластической деформации (рисунок 1.6), введенный в работе [26], показывает отношение зоны пластической деформации z ко всей толщине h полосы:

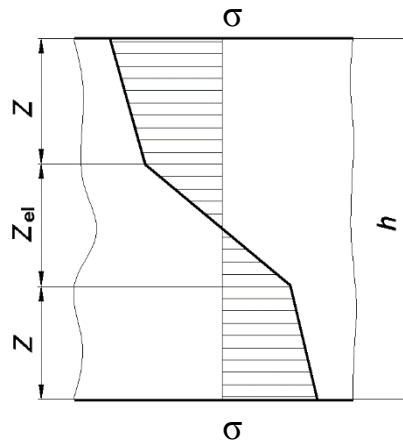


Рисунок 1.6 – К определению коэффициента проникновения пластической деформации по толщине полосы

$$k_{plastic} = \left(1 - \frac{2z}{h}\right) \cdot 100\% . \quad (1.1)$$

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 ИРМ пластическая деформация проникает практически на всю толщину полосы и пластификация составляет более 90 %. Роликовые правильные машины обеспечивают в среднем пластификацию в 60 %, но при определенных соотношениях конструктивных параметров оборудования и тонкой настройки машин можно достигать пластификации больше 80 %.

Преимущества и недостатки различных типов машин для правки. На основании изложенной информации о правильных машинах составлена таблица 1.2 с преимуществами и недостатками каждой технологии правки.

При правке полос широкого сортамента с высокой производительностью, баланс между преимуществами и недостатками различных типов машин, как видно из таблицы 1.2, может быть достигнут при применении РПМ, а решение

проблем настройки и выбора оптимальных режимов правки с учетом конструктивных возможностей открывает широкие перспективы технологии правки стальных полос на роликовых правильных машинах.

Таблица 1.2 – Преимущества и недостатки различных технологий правки

Технология правки	Преимущества	Недостатки
1. Роликовая правка в РПМ	<ol style="list-style-type: none"> 1. Высокая производительность. 2. Непрерывность процесса правки. 3. Возможность обработки широкого сортамента при компактном расположении. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Средний коэффициент пластификации по толщине полосы 60%, но при правильно рассчитанной технологии может достигать 90%. 2. Трудоемкий процесс настройки для получения однородного поля внутренних напряжений.
2. Правка изгибом и растяжением в ИРМ	<ol style="list-style-type: none"> 1. Пластификация более 90%. 2. Непрерывный процесс правки. 3. Высокое качество правки и однородное поле напряжений. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ограниченный диапазон толщин – до 6 мм. 2. Машина занимает большую производственную площадь. 3. Высокая стоимость оборудования.
3. Правка растяжением	<ol style="list-style-type: none"> 1. Пластификация близкая к 100% и отсутствие дефектов плоскостности. 2. Однородный профиль внутренних напряжений. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Осуществляется правка только листов. 2. Низкая производительность.

Некоторые иностранные металлургические компании, например, компания SSAB (Швеция) или компания Marcegaglia (Италия) используют комбинацию нескольких способов правки горячекатаных полос – на роликовой правильной машине с последующим небольшим обжатием в дрессировочной клетки и порезкой на листы.

Применение дрессировки, по данным компаний SSAB и Marcegaglia, позволяет обеспечить достаточно высокую плоскостность (гарантируется плоскостность 3 мм на 1 м длины после лазерной резки) и снизить поперечную разнотолщинность полосы, что затруднительно выполнить при использовании только правки на РПМ. При этом они не публикуют информацию о параметрах применяемых процессов и оборудования, приводя лишь гарантированные

характеристики плоскостности после резки лазером и называя бренд стальных листов SSAB Laser[®] Plus или Marcegaglia Laser Sharp[®].

Таким образом, анализ способов правки показал, что многократный знакопеременный изгиб в РПМ несомненно был и останется одним из самых востребованных способов правки. Исследование и совершенствование процесса правки на РПМ позволит открыть новые перспективные возможности знакопеременного изгиба как инструмента по управлению плоскостностью и остаточными напряжениями горячекатаной полосы.

1.3 Особенности циклического знакопеременного деформационного воздействия на полосу

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 количество научных работ по расчету и исследованию процесса правки, например, [26, 27, 30 – 53]. Так, в [26] 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 [30] на основе опыта эксплуатации РПМ, – чем меньше шаг роликов, тем выше качество правки. Также в [30] отмечается, что диаметры роликов нужно выбирать максимально возможными в пределах шага роликов. В работе [31] предложены формулы по определению минимального и максимального диаметров роликов:

$$D_{\min} \approx h \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_T}} \approx 20h; \quad (1.2)$$

$$D_{\max} \approx 40h, \quad (1.3)$$

где E и σ_T – модуль упругости и предел текучести материала полосы.

От количества используемых роликов зависит качество правки, на основе опыта эксплуатации РПМ в работе [26] 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 [26], 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 работе [30] отмечается, что эффективность правки снижается при росте скорости и при неизменных настройках роликов, а для сохранения эффективности правки с увеличением скорости процесса необходимо увеличивать зазоры или 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, актуальной задачей является дальнейшее исследование закономерностей технологии правки и параметров роликовых машин.

Знакопеременная деформация при изгибе, как свидетельствуют, например, результаты работ [54 – 56], оказывает влияние на свойства низколегированных сталей. Тем самым становится перспективной возможность использования листопрямильных машин в качестве инструмента многократного знакопеременного деформационного воздействия для управления свойствами металлопроката. Однако, для определения влияния на свойства нужно иметь методику определения относительной деформации листа при правке.

Еще одним важным аспектом является исследование внутренних напряжений в условиях циклической знакопеременной деформации, а также и после снятия внешних воздействий и прекращения действия внутренних процессов, когда происходит остаточное формоизменение листа при разгрузке, в результате которой изменяется поле напряжений. Оставшиеся напряжения в листе принято называть остаточными. К основным причинам их возникновения относится неравномерность деформации по толщине проката при прохождении его через ролики машины – поверхностные волокна попеременно растягиваются и сжимаются. Именно неравномерная пластическая деформация поверхностных слоев, связанная с вытягиванием и сжатием верхних и нижних волокон приводит к развитию в них остаточных напряжений.

Практика работы листопрокатных цехов показала, что, несмотря на неуравновешенность по толщине и ширине продольных остаточных напряжений, листы, прошедшие через РПМ, не теряют плоскостности после их поперечной резки механическим способом (ножницами или пилами). Это объясняется тем, что стремлению к потере плоскостности листа препятствует упругое сопротивление, создаваемое поперечными нормальными напряжениями.

На рисунке 1.7 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.

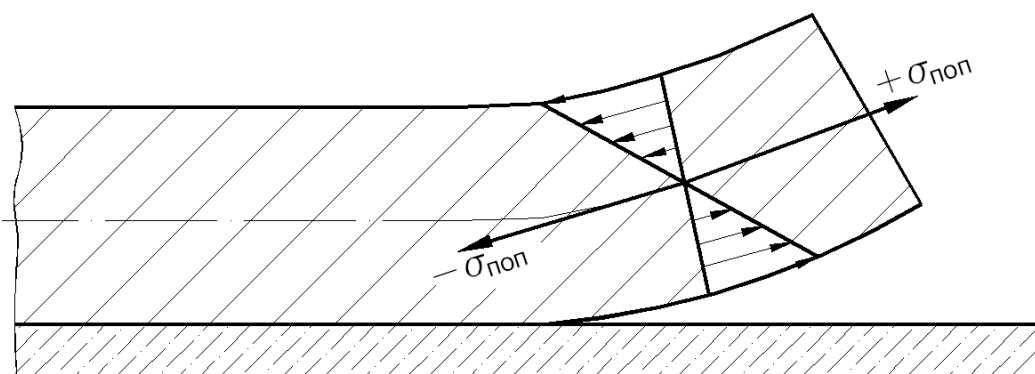


Рисунок 1.7 – Схема распределения поперечных нормальных напряжений в прикромочном участке полосы, имеющем волнистость, вызванную неравномерным распределением по толщине продольных остаточных напряжений

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

Механизм формирования остаточных напряжений при знакопеременном деформационном воздействии на полосу является сложным, зависящим от большого числа технологических и конструктивных параметров РПМ и характеристик исходной полосы. Несмотря на многочисленные работы российских и зарубежных исследователей [57 – 67], посвященные формированию остаточных напряжений при обработке металлов различными методами, вопрос прогнозирования технологических остаточных напряжений в процессе циклического знакопеременного нагружения остается открытым.

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

В работе [26] предложена методика расчета процесса правки на роликовых правильных машинах, основанная на гипотезе плоских сечений и рассмотрении только продольных деформаций и напряжений. При правке на РПМ возможны три случая распределения внутренних напряжений (рисунок 1.8): 1) при упругом изгибе; 2) при пластическом изгибе; 3) при упруго-пластическом изгибе. Независимо от типа изгиба наружные слои металла сжимаются или растягиваются, а в нейтральном слое деформация и напряжения равны нулю.

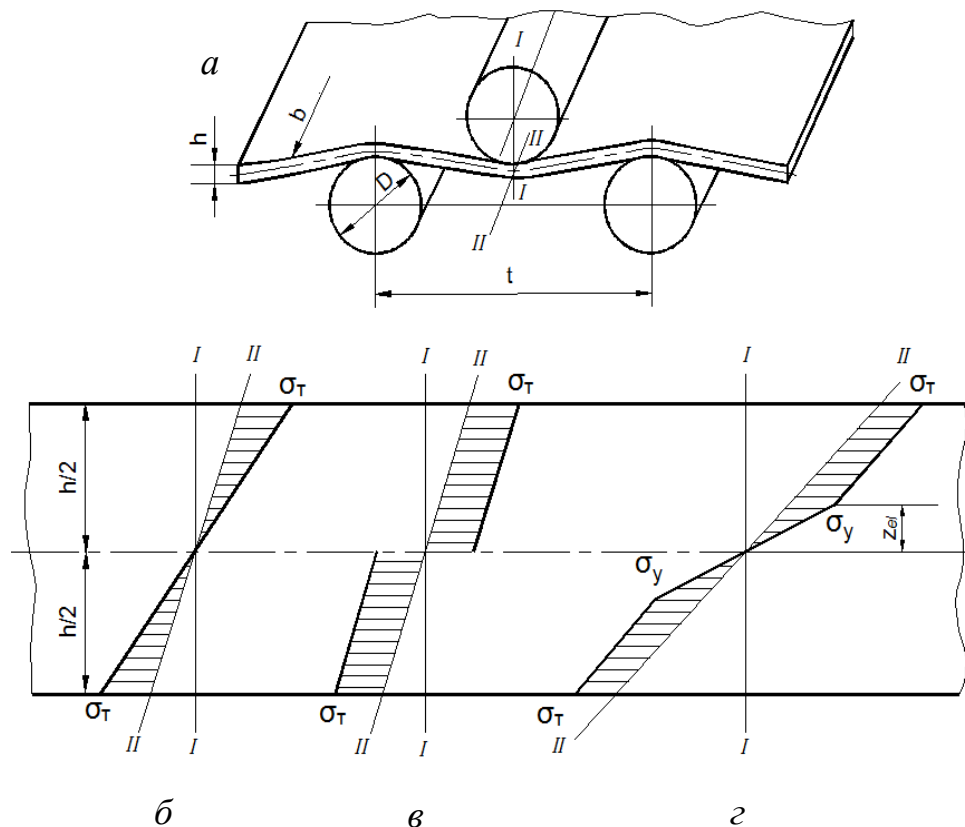


Рисунок 1.8 – Схема правки листа тремя роликам (а) и распределение напряжений по толщине полосы при упругом изгибе (б); пластическом изгибе (в) и упруго-пластическом изгибе (z)

При упругом изгибе внутренние напряжения возрастают от середины полосы к периферийным слоям по закону Гука:

$$\sigma_y = \sigma_T \frac{2y}{h}, \quad (1.4)$$

где σ_T – предел текучести материала; h – толщина полосы; b – ширина полосы; y – расстояние слоя металла от среднего нейтрального сечения полосы.

Момент внутренних сил равен:

$$M_y = \sigma_T \frac{bh^2}{6}. \quad (1.5)$$

При пластическом изгибе полосы внутренние напряжения по всему сечению равны пределу текучести $\sigma_y = \sigma_T$, а момент изгиба составляет:

$$M_{\text{п}} = \sigma_T \frac{bh^2}{4}. \quad (1.6)$$

Момент упруго-пластического изгиба больше момента упругого изгиба и меньше пластического. При упруго-пластическом изгибе поверхностные слои полосы деформируются пластически, а внутренние – упруго. Граница между упругой и пластической зонами находится на некотором расстоянии z_{el} от нейтральной оси и отношение зоны пластической деформации ко всей толщине полосы характеризуется коэффициентом проникновения пластической деформации k_{pl} – формула (1.1). При чисто упругом изгибе $k_{pl} = 0$, а при чисто пластическом – $k_{pl} = 1$. При упруго-пластическом изгибе k_{pl} будет иметь промежуточное значение от 0 до 1.

Кривизна изгиба проката ρ определяется как обратная величина радиуса кривизны полосы в нейтральном слое:

$$\rho = 1/R_{\text{крив}}. \quad (1.7)$$

Также в работе [26] предложена методика определения усилий на ролики при правке полосы на основе уравнений моментов. Принимается, что усилия правки действуют вертикально и приложены к прокату и правильным роликам в точках. Упрощенная схема правки с эпюрой изгибающих моментов вдоль проката представлена на рисунке 1.9.

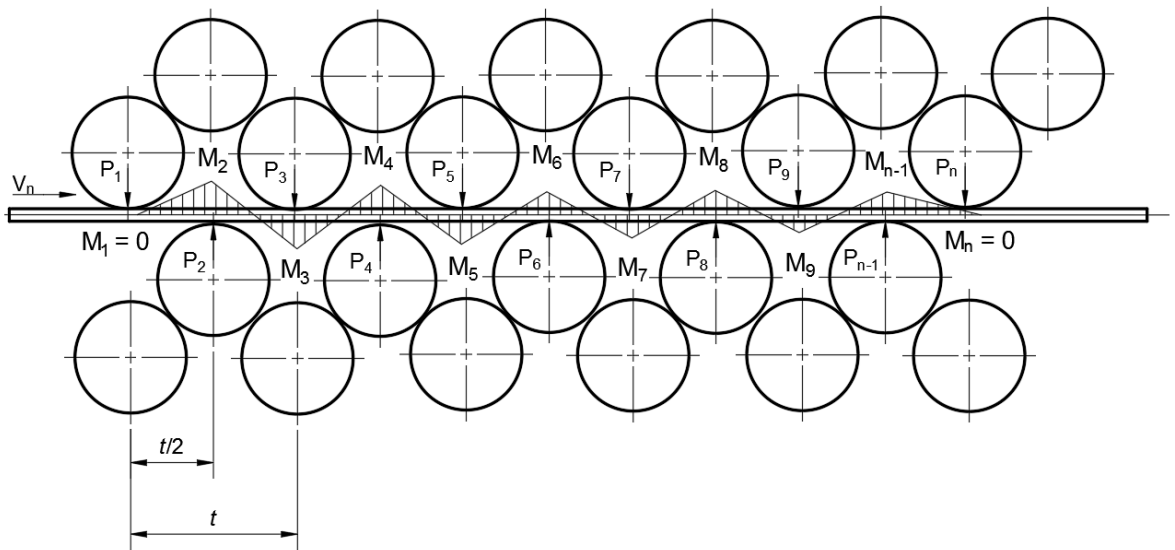


Рисунок 1.9 – К определению усилий на ролики и моментов изгиба полосы

Для сечений 2, 3, 4, ..., (n-1) и n усилия на ролики составляют:

$$\begin{aligned}
 P_1 \frac{t}{2} &= +M_2; P_1 = \frac{2}{t} M_2; \\
 P_1 t - P_2 \frac{t}{2} &= -M_3; P_2 = \frac{2}{t} (M_3 + 2M_2); \\
 P_1 \frac{3}{2} t - P_2 t + P_3 \frac{t}{2} &= +M_4; P_3 = \frac{2}{t} (M_4 + 2M_3 + M_2); \text{ и т. д.} \\
 P_1 2t - P_2 \frac{3}{2} t + P_3 t - P_4 \frac{t}{2} &= -M_5; P_4 = \frac{2}{t} (M_5 + 2M_4 + M_3); \\
 P_5 &= \frac{2}{t} (M_6 + 2M_5 + M_4); P_i = \frac{2}{t} (M_{i+1} + 2M_i + M_{i-1}); \\
 P_{n-i} &= \frac{2}{t} (0 + 2M_{n-i} + M_{i-2}); P_n = \frac{2}{t} (0 + 0 + M_{n-1}).
 \end{aligned} \tag{1.8}$$

Моменты M_1 и M_n равны нулю, так как под первым и последним роликами нет деформации полосы. Для листопрямляющих машин с числом роликов $n > 11$ предложено принимать: 1) под первыми тремя роликами (вторым, третьим и четвёртым) всё сечение полосы деформируется пластически и моменты M_2 , M_3 , M_4 определяются по формуле (1.6); 2) под последними тремя роликами ($n-3$, $n-2$ и $n-1$) всё сечение полосы деформируется только упруго и моменты M_n .

3, M_{n-2} и M_{n-1} определяются по формуле (1.4); 3) под остальными средними ($n-8$) роликами значение момента изгиба среднее между пластическим и упругим моментами.

Мощность и крутящий момент на всех роликах (кроме первого и последнего, которые не изгибают полосу) при правке полосы со скоростью v можно определять по формулам:

$$N_{\text{деф}} = \frac{\sigma_{\text{т}}^2}{2E} v b h k_{\text{деф}}; \quad (1.9)$$

$$M_{\text{деф}} = \frac{\sigma_{\text{т}}^2}{4E} b h D k_{\text{деф}}, \quad (1.10)$$

где $k_{\text{деф}}$ – результирующий коэффициент пластической деформации при правке полосы:

$$k_{\text{деф}} = k_{pl2}^2 \left[\frac{1}{1 - k_{pl2}} + k_{pl2} (n - 3) \right], \quad (1.11)$$

где k_{pl2} – коэффициент проникновения пластической деформации под вторым роликом.

Рассмотренную методику расчета процесса правки на роликовых правильных машинах крайне сложно применить на практике, поскольку в ней не учитывается фактическое перекрытие роликов, а рекомендуемое допущение о пластической деформации полосы под первыми тремя роликами противоречит утверждению самого автора в этой же работе [26], что при правке в РПМ не может быть чисто пластического изгиба по всему сечению, что возможно только при пластическом растяжении.

Автором работы [27] предложена методика расчета установившегося процесса правки, основанная на схемах правки проката, показанных на рисунке 1.10 для случая, когда между двумя роликами лист изгибается третьим роликом.

Принято, что на участках упругого нагружения (AB и CD) кривизна изгиба меняется линейно, а на участках пластического изгиба (BC и DE) – по квадратичной параболе.

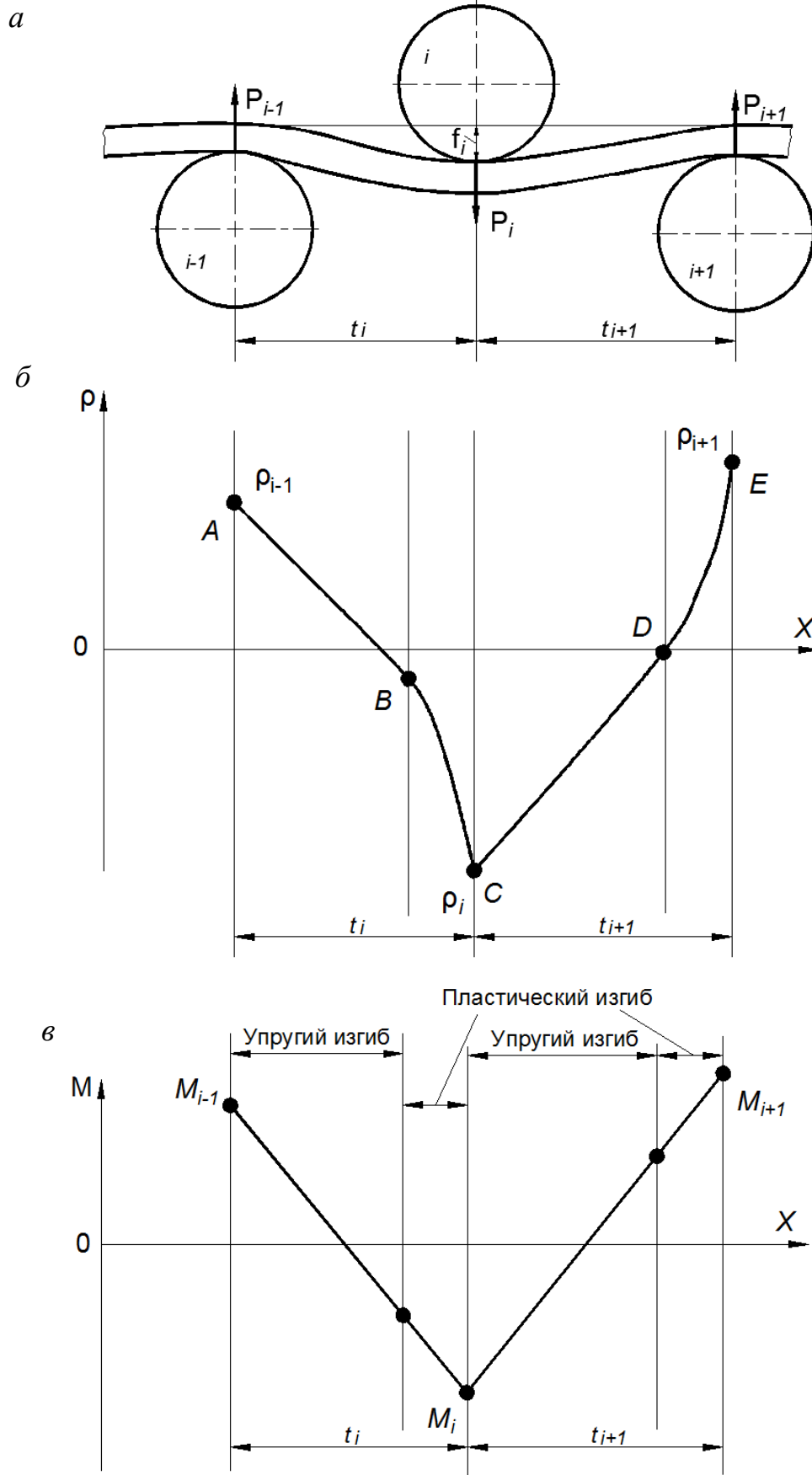


Рисунок 1.10 - Упрощенная схема правки проката (*a*), схема изгиба проката (*б*), эпюра изгибающих моментов (*в*)

Общий прогиб проката f_i под каждым i -м роликом состоит из двух составляющих:

$$f_i = f_{\rho_i} + f_{q_i}, \quad (1.12)$$

где f_{ρ_i} – прогиб от влияния кривизны изгиба проката; f_{q_i} – прогиб от влияния поперечной силы. Эти слагаемые предложено рассчитывать по следующим формулам:

$$f_{\rho_i} = \frac{t_i^2 \cdot q_{i+1} \cdot (A\rho_{i-1} + B\rho_i + C\rho_{i+1}D\beta_i + E_1\beta_{i+1})}{12 \cdot (1 + q_{i+1})}, \quad (1.13)$$

$$\text{где } q_{i+1} = \frac{t_{i+1}}{t_i}, \quad A = 3 + 2\rho_i + \rho_i^2, \quad B = 3 - 2\rho_i - \rho_i^2 + q_{i+1} \cdot (5 + 2\rho_{i+1} - \rho_{i+1}^2),$$

$$C = q_{i+1} \cdot (1 - \rho_{i+1})^2, \quad D = \frac{(1 + \rho_i)^2}{\rho_i}, \quad E_1 = \frac{q_i \cdot (1 + 2\rho_i - \rho_i^2)}{\rho_{i+1}}.$$

$$f_{q_i} = \frac{\omega \cdot t_i \cdot q_{i+1} \cdot P_i}{2 \cdot E \cdot (1 + q_{i+1})}, \quad (1.14)$$

где ω – коэффициент учета поперечных сил, зависящий от геометрических размеров поперечного сечения; E – модуль упругости материала полосы; t_i – шаг между роликами; P_i – усилие правки между роликом и прокатом.

При определении изгибающих моментов и усилий правки предлагается использовать модель среды Мазинга, в которой при каждом последующем нагружении другого знака напряжения рассчитываются по формуле:

$$\sigma = \sigma_{\max} - \mu_2 \cdot f\left(\frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon}{\mu_2}\right), \quad (1.15)$$

где f – функция зависимости «напряжение – деформация», принятая для первого нагружения $\sigma_{\max} = f(\varepsilon_{\max})$; μ_2 – коэффициент Мазинга.

Коэффициент μ_2 определяется экспериментально [68 – 70] и в общем случае зависит от номера нагружения, но обычно принимается равным 2. На рисунке 1.11 для примера показана модель упруго-пластической среды с

линейным упрочнением и $\mu_2 = 2$. Для сравнения пунктиром показана общепринятая модель упрочнения материала.

Модель среды Мазинга позволяет учесть снижение предела текучести при повторных нагружениях или эффект Баушингера.

При определении изгибающих моментов первоначально задаются условия $i = 1$, $M_{i-1} = 0$, $\rho_{i-1} = \rho_0$ и наибольший предыдущий изгиб $\rho_m = 0$:

$$M(\rho) = \begin{cases} M_{i-1} - 2g \cdot \left(\frac{\rho_{i-1} - \rho}{2} \right), & \text{при } |\rho - \rho_0| < \rho_m, \\ g \cdot (\rho - \rho_0), & \text{при } |\rho - \rho_0| \geq \rho_m \end{cases}, \quad (1.16)$$

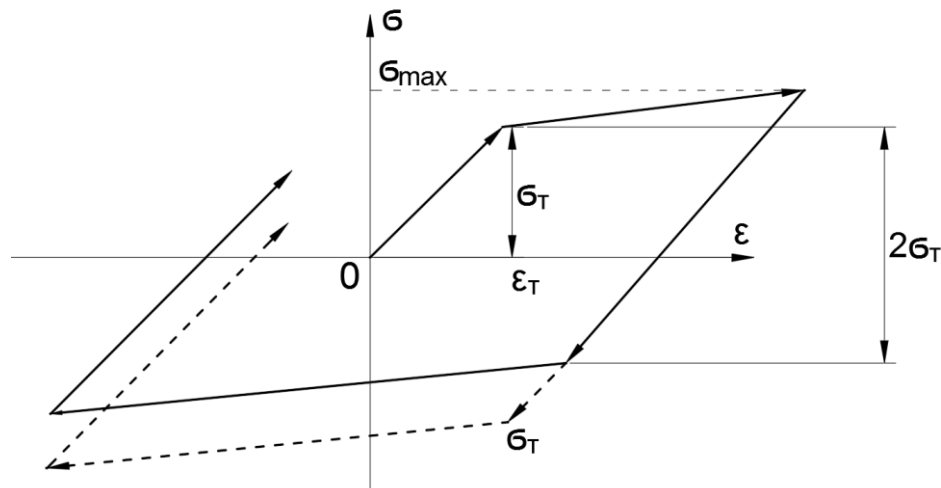


Рисунок 1.11 – Зависимость между деформациями и напряжениями при знакопеременном деформировании

где $g(\rho) = \int_{y_H}^{y_B} \sigma(\rho \cdot y) \cdot y dF$; y_H , y_B – координаты крайней верхней и крайней

нижней точки поперечного сечения проката. В листах y_B равно половине толщины проката со знаком плюс, а y_H – со знаком минус.

Взаимосвязь усилий правки P_i и моментов изгиба M_i под роликами определяется формулой:

$$P_i = \frac{M_{i+1} - M_i}{X_{\rho_{i+1}} - X_{\rho_i}} + \frac{M_{i-1} - M_i}{X_{\rho_i} - X_{\rho_{i-1}}}. \quad (1.17)$$

На основе разработанной методики автором [27] рассмотрена правка толстого сортамента, когда отсутствует внешнее натяжение и реализуется практически линейный контакт проката с роликами (линия контакта параллельна оси вращения ролика).

В силу упрощенности методики, не учитывающей такие факторы, как трение при правке, скорость правки, исходная искривленность полосы, применить ее для раскрытия закономерностей распределения внутренних напряжений по толщине и ширине металла при правке горячекатаных полос не представляется возможным.

Автор работ [36 – 38] предлагает математический метод определения таких параметров холодной правки стальных полос, как вид и 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. Для этого составляется кинематическая схема роликовой правильной машины. В качестве примера на рисунке 1.12 приведена схема семироликовой машины.

Для каждого ролика вводится локальная прямоугольная декартова система координат y - z в точках касания листа с рабочими роликами слева направо. Ось z направлена по касательной к поверхности ролика, а ось y – перпендикулярно к оси z в сторону центра соответствующего ролика. В каждой системе определяются координаты нейтральной линии листа (между соседними точками касания листа и роликов) с помощью кубических полиномов вида $y(z) = az^2 - bz^3$. Здесь a_i и b_i – коэффициенты кубических полиномов в i -ой системе координат ($i = 1...7$). Тогда для каждой пары роликов составляются уравнения для коэффициентов кубических полиномов, кривизны и радиусов кривизны нейтральной линии листа в точках касания листа с роликами:

– первый и второй ролики:

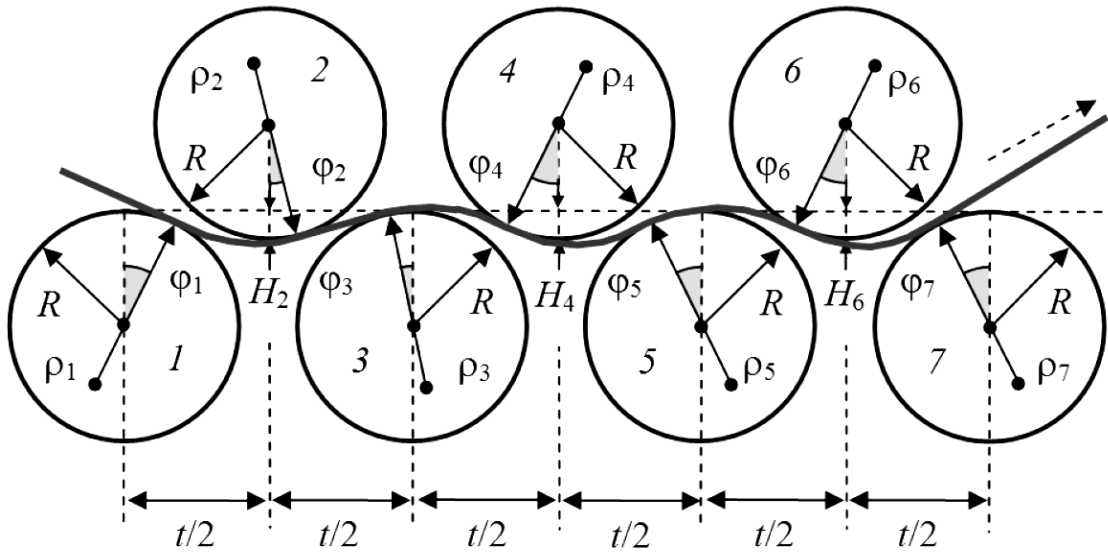


Рисунок 1.12 – Правка стального листа между семью рабочими роликами:
 R – радиус рабочего ролика; φ_i – угол между вертикальной осью ролика и линией, проходящей через точку касания листа и ролика; i – номер ролика; ρ_i и $\varepsilon_i = 1 / \rho_i$ – радиус кривизны и кривизна срединной линии листа в точках касания листа с рабочими роликами; t – шаг между роликами одного ряда; H_2, H_4, H_6 – перекрытия верхних роликов 2, 4 и 6 с нижним рядом роликов

$$\begin{aligned}
 z_2 &= \left(\frac{t}{2} - R_0 \sin \varphi_1 + R_0 \cos \varphi_2 \right) \cos \varphi_1 + \\
 &+ [H_2 - R_0(1 - \cos \varphi_1) - R_0(1 - \cos \varphi_2)] \sin \varphi_1; \\
 y_2 &= \left(\frac{t}{2} - R_0 \sin \varphi_1 + R_0 \cos \varphi_2 \right) \cos \varphi_1 + \\
 &+ [H_2 - R_0(1 - \cos \varphi_1) - R_0(1 - \cos \varphi_2)] \sin \varphi_1; \\
 a_1 &= \frac{3y_2 + tg(\varphi_1 + \varphi_2)z_2}{z_2^2}; b_1 = \frac{2y_2 + tg(\varphi_1 + \varphi_2)z_2}{z_2^3}; \\
 \varepsilon_{1,2} &= 2a_1; \rho_{1,2} = \frac{1}{2a_1}; \\
 \varepsilon_{2,1} &= \frac{2a_1 - 6b_1z_2}{[1 + (2a_1z_2 - 3b_1z_2^2)]^{\frac{3}{2}}}; \rho_{2,1} = \frac{1}{\varepsilon_{2,1}}
 \end{aligned} \tag{1.18}$$

– второй и третий ролики:

$$\begin{aligned}
 z_3 &= \left(\frac{t}{2} - R_0 \sin \varphi_2 + R_0 \cos \varphi_3 \right) \cos \varphi_2 + \\
 &+ [H_2 - R_0(1 - \cos \varphi_2) - R_0(1 - \cos \varphi_3)] \sin \varphi_2; \\
 y_3 &= \left(\frac{t}{2} - R_0 \sin \varphi_2 + R_0 \cos \varphi_3 \right) \cos \varphi_2 + \\
 &+ [H_3 - R_0(1 - \cos \varphi_2) - R_0(1 - \cos \varphi_3)] \sin \varphi_2; \\
 a_2 &= \frac{3y_3 + tg(\varphi_2 + \varphi_3)z_3}{z_3^2}; b_2 = \frac{2y_3 + tg(\varphi_2 + \varphi_3)z_3}{z_3^3}. \tag{1.19} \\
 \varepsilon_{2,3} &= 2a_2; \rho_{2,3} = \frac{1}{2a_2}; \\
 \varepsilon_{3,2} &= \frac{2a_2 - 6b_2z_2}{[1 + (2a_2z_3 - 3b_2z_2^2)]^2}; \rho_{3,2} = \frac{1}{\varepsilon_{3,2}}
 \end{aligned}$$

Аналогично определяются параметры под оставшимися парами роликов, при этом учитываются граничные условия $\rho_{12} = \rho_1$, $\rho_{21} = -\rho_{23}$, $\rho_{32} = -\rho_{34}$, ..., $\rho_{76} = \beta(\rho_{67})$. Коэффициент пружинения нейтральной линии листа при радиусе кривизны ρ равен:

$$\beta(\rho) = \frac{1}{1 - \left[3 \left(\frac{\rho \sigma_T}{hE} \right) - 4 \left(\frac{\rho \sigma_T}{hE} \right)^3 + \frac{(\Pi_p + \Pi_c)}{2E} \left(1 - 3 \left(\frac{\rho \sigma_T}{hE} \right) - 4 \left(\frac{\rho \sigma_T}{hE} \right)^3 \right) \right]}, \tag{1.20}$$

где Π_p и Π_c – пределы упрочнения соответственно при растяжении и сжатии, σ_T и E – предел текучести и модуль упругости материала листа; h – толщина листа.

При пластическом изгибе $\rho < \rho_T = hE/(2\sigma_T)$ стального листа изгибающий момент равен:

$$M(\rho) = \frac{bh^2\sigma_T}{12} \left(3 - 4 \left(\frac{\rho \sigma_T}{hE} \right)^2 \right) + \frac{bh^3(\Pi_p + \Pi_c)}{24\rho} \left(1 - 2 \left(\frac{\rho \sigma_T}{hE} \right) \right)^2 \left(1 + \frac{\rho \sigma_T}{hE} \right), \tag{1.21}$$

где b – толщина листа.

При этом автор не уточняет, как определяется протяженность зон упругой и пластической деформаций в поперечном сечении полосы, а значит нет возможности определить коэффициент пластификации в процессе правки.

Кроме того, автор в своих работах не приводит сравнение расчетных значений кривизны листа после правки с измеренными экспериментально. Также следует отметить, что не учитывается влияние трения, скоростных параметров процесса правки, что может влиять на достоверность математической модели.

Авторами работы [39] 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 (рисунок 1.13) и частичном контакте (рисунок 1.14), при полном касании листом роликов листопрямильной машины (рисунок 1.15) и определены радиусы кривизны нейтральной линии листа и относительная деформация листа при правке.

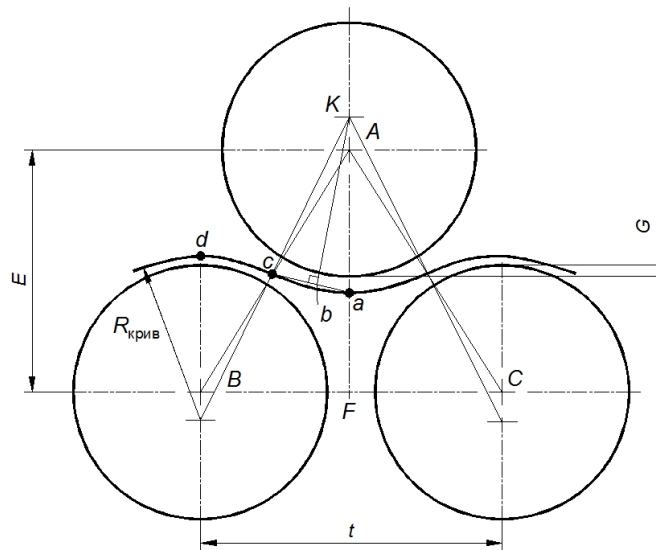


Рисунок 1.13 – Схема изгиба листа между роликами в случае точечного контакта

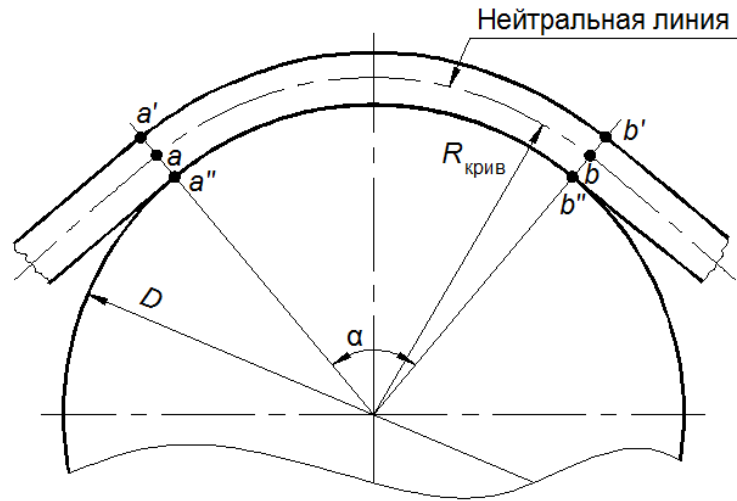


Рисунок 1.14 – Схема изгиба листа на ролике
при частичном контакте

На схемах приняты следующие общие обозначения: E – межцентровое расстояние между верхним и нижним роликами РПМ; t – межосевое расстояние или шаг роликов; D – диаметр роликов; G – параметр, называемый зазором при $G > 0$ и перекрытием роликов при $G < 0$ роликов; h – толщина листа.

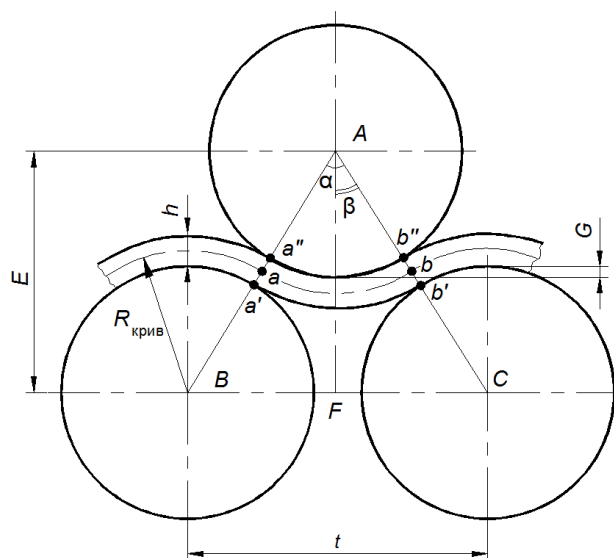


Рисунок 1.15 – Схема изгиба листа между роликами
в случае полного касания листом роликов РПМ

На рисунке 1.13 изображена в виде кривой часть нейтральной линии, состоящая из двух дуг – ac и cd , имеющих в точке c общую касательную. Центр дуги изгиба находится в точке K пересечения, прямой, проходящей через точки A и F , и перпендикуляра к хорде abc , восстановленного из его середины (из точки b), а радиус кривизны, равный Ka и определяемый геометрически, составит

$$R_{\text{крив}} = \frac{\sqrt{(0,5L)^2 + (h - G)^2}}{4 \cos \left[\operatorname{arctg} \frac{L}{2(h - G)} \right]}. \quad (1.29)$$

В случае частичного контакта (рисунок 1.14) величина поверхности контакта характеризуется центральным углом α и радиус кривизны нейтральной линии листа равен $R_{\text{крив}} = 0,5D + 0,5h$. Относительные деформации удлинения (для наружного волокна) и укорочения (для внутреннего волокна) определяются из соотношений:

$$\varepsilon_{\text{нар}} = \frac{H}{2R_{\text{крив}}} 100\%, \quad \varepsilon_{\text{вн}} = -\frac{H}{2R_{\text{крив}}} 100\% \quad (1.30)$$

Истинные деформации для наружного и внутреннего волокон составляют:

$$e_{\text{нар}} = \ln \frac{a'b'}{ab} = \ln \frac{R_{\text{крив}} + 0,5H}{R_{\text{крив}}}; \quad (1.31)$$

$$e_{\text{вн}} = \ln \frac{a''b''}{ab} = \ln \frac{R_{\text{крив}} - 0,5H}{R_{\text{крив}}}.$$

При полном касании листом роликов относительные деформации и радиус кривизны нейтральной линии листа определяются аналогично случаю с частичным касанием.

Авторы провели эксперименты по знакопеременному изгибу листов на прецизионной правильной машины ARKU25/21 (модель EcoMasler2550) с рабочими ролики $D = 25$ мм при расстоянии между их центрами $L = 28$ мм. В верхней кассете установлено 10 рабочих роликов и 11 – в нижней. Машина предназначена для правки листов толщиной от 0,25 до 3,0 мм. На основе

модели точечного контакта листа с роликами были установлены зависимости кривизны нейтральной линии листа ρ и относительной продольной деформации в поверхности листа $\varepsilon_{\text{нар}}$ от величины перекрытия роликов G : $\rho = 0,0276 - 0,0195G$; $\varepsilon_{\text{нар}} = 1,9357 - 1,3564G$. Также проведенные эксперименты показали, что гипотетический случай полного касания листом роликов правильной машины на практике не может быть реализован. Но это не исключает возможности знакопеременной деформации листа на правильной машине при частичном касании, так как величина площади поверхности контакта не влияет на величины относительных деформаций волокон листа, определяемых соотношениями (1.30) и (1.31). В случае же точечного контакта радиус кривизны нейтральной линии листа будет определяться из соотношения (1.29) и будет расти с увеличением G .

Предлагаемая авторами методика определения геометрических и деформационных параметров правки не позволяет исследовать распределение напряжений по толщине полосы, поскольку определяет относительные продольные деформации на поверхности полосы, а также не учитывает модель материала при знакопеременном деформировании и скорость правки.

Описанный в [40] оригинальный программный продукт «Levelling_АМЕТ» предназначен 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. Программа прошла апробацию в промышленных условиях на листопрямительной машине толстолистового стана 2800 Ашинского металлургического завода. Из приведенного описания программы можно сделать вывод, что в ней не предусмотрен учет исходной неплоскостности листа, кинематической модели упрочнения материала и нет возможности определения напряжений при правке.

Модель холодной правки толстых листов, изложенная в работах [41, 42], базируется на элементах моделей, описанных в работах [26, 27, 30] и

разработанных «ВНИИМЕТМАШ им. А.И. Целикова» и ПАО «Уралмашзавод». За основной критерий, определяющий все выходные величины процесса правки, был взят коэффициент пластической проработки сечения k_{pl} , значение которого можно задавать индивидуально для каждого ролика. Исходя из этого, математическая модель позволяет оценить достаточность усилий правки, величины прогибов и крутящих моментов для исправления дефектов плоскостности у листа с определённой геометрией и геометрическими характеристиками с одновременным исключением повешенного износа правильных роликов. В [42] приведены результаты расчета технологических параметров холодной правки толстолистового проката на 9-роликовой листопрямительной машине фирмы SMS Siemag и предложены значения k_{pl} со второго по восьмой ролики, формирующие, по утверждению автора, наиболее подходящее распределение остаточных напряжений, при котором их амплитуда уменьшается по направлению от центра тяжести листа. При этом ни в работе [41], ни в работе [42] в описании модели нет формул по расчету остаточных напряжений и не приводятся результаты их расчета.

В работе [43] представлена модель напряженно-деформированного состояния и кинематических параметров очага деформации при изгибе листа во время правки, основанная на описании фрагмента изгиба листа с поворотом его торцов на определенный угол. Принятое допущение при разработке модели о представлении очага деформации при изгибе листа между тремя роликами в виде пластической зоны, тангенциальные напряжения в которой равны истинному пределу текучести, исключает ее применение для исследования распределений напряжений по толщине листов при различных технологических и конструктивных параметрах процесса правки. Кроме того, утверждение авторов, что модель позволяет повысить точность расчетов тангенциальных напряжений на 30 – 40 % по сравнению с линейной моделью, принятой в традиционной теории правки, а также механических свойств,

усилия правки, мощности электродвигателя главного привода РПМ не имеет никаких практических подтверждений.

В работе [44] приведена методика определения параметров процесса правки листов, которая учитывает изгиб рабочих роликов и его влияние на исправление дефекта волнистости, основанную на совместном использовании инженерной модели правки кривизны листов и регрессионных описаний, полученных в результате реализации конечно-элементной модели правки в программном комплексе DEFORM-3D. Авторами сделан вывод о нелинейной зависимости показателей плоскостности проката от изгиба рабочих роликов, при этом они не исследовали зависимости распределения внутренних напряжений по толщине и ширине полос. Кроме того, в работе отсутствует описание конечно-элементной модели, принятой в DEFORM-3D.

Авторы работ [45, 46] разработали алгоритм выбора режима правки на роликовой правильной машине, реализовав его в среде Matlab. Исходными данными являются геометрические параметры правильной машины, характеристики металлопроката и исходная топография листа, получаемая путем сканирования с помощью специального оборудования. Исходный лист разделяется на полосы по ширине. Если лист с дефектом «короб», то краевые полосы имеют меньшую длину по сравнению с центральными (рисунок 1.16, а), и наоборот, если лист имеет «волну» по краям, то краевые полосы имеют большую длину по сравнению с центральными (рисунок 1.16, б). Для каждой полосы определяются точки контакта с роликами и вычисляется отклонение полосы под каждым роликом, а также длина полосы с использованием аппроксимации сплайнами, на основании чего рассчитывается пластическая деформация каждой полосы после правки. При этом выбирают такие настройки машины с учетом влияния опорных роликов, чтобы обеспечивалась минимальное отклонение друг от друга длин полосок после правки.

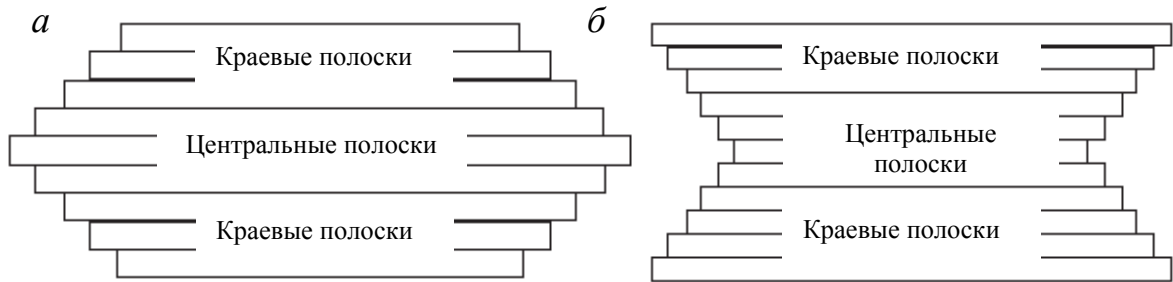


Рисунок 1.16 – Виртуальное разделение листа с дефектами
на полосы по ширине: *a* – «короб»; *б* – «волна»

Результаты работы авторов 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 работах авторы [47] предложили методику расчета прогиба ролика и напряжений в листе, с учетом исходной неплоскостности листа – волны по кромкам. Так же, как и в работах [45, 46], листы перед правкой разделяются на i число полосок ($i = 1 \dots n$) по ширине, длина каждой определяется по формуле в зависимости от значения I-Units (I):

$$I_i = I \cos(\pi w_i / t), \quad (1.32)$$

где w_i – координата ширины листа; t – шаг роликов. Для количественной оценки волнистости и коробоватости полосы в ряде стран, например, США, Канада, применяется параметр I-Units (I) [71 – 74], значения этого параметра определяются в зависимости от высоты H и длины L волны по формуле:

$$I = \left[\frac{\pi H}{2 L} \right]^2 \cdot 10^5. \quad (1.33)$$

Для определения длины каждой полоски после правки вводятся условные промежутки – на рисунке 1.17 показан пример разделения 9-роликовой машины на семь промежутков.

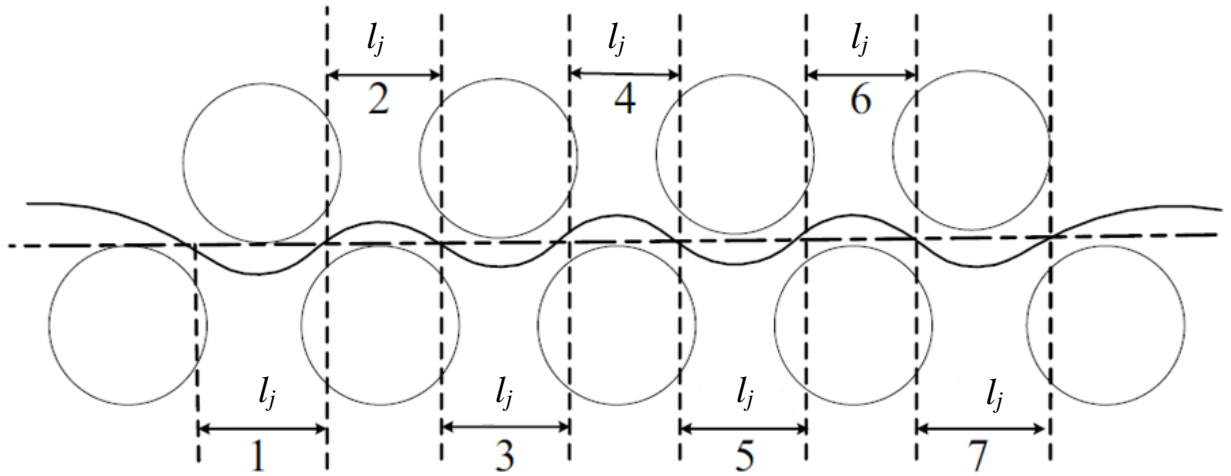


Рисунок 1.17 – Схема к определению промежутков по длине РПМ

Длина каждого j ($j = 1 \dots m$) промежутка определяется по формуле:

$$l_j = l - \frac{\pi^2}{4l} (v_{\max} \cos(\frac{\pi w_i}{W_R}) + \delta_j)^2, \quad (1.34)$$

где l – длина листа; W_R – длина ролика, v_{\max} – максимальное перекрытие роликов при правке; δ_j – перекрытие роликов j промежутка.

Тогда длина всей полоски составит:

$$l_i = \sum_1^m l_j. \quad (1.35)$$

Относительные деформации и напряжения после правки предложено определять по формулам:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta l_i}{l}, \quad \sigma_i = \frac{E \Delta l_i}{l}, \quad (1.36)$$

где E – модуль упругости полосы.

Основной недостаток предложенного метода – отсутствие информации о ее практическом применении. Кроме того, не совсем понятно, по какому принципу определяются границы промежутков каждой полоски, как

рассчитываются длины полосок при разделении листов с другими различными дефектами неплоскостности перед правкой, а также, как учитывается толщина листа при правке.

Авторы статьи [48] разработали аналитический метод расчета кривизны полосы на основе интегрирования кривой, описывающей полосу при прохождении ее через роликовую правильную машину, в системе Matlab. Авторы не приводят сравнений с экспериментальными данными и не раскрывают возможности практической реализации предложенного метода определения кривизны полосы.

По мнению авторов работы [49], моделирование на основе метода конечных элементов в 2D постановке с использованием программного комплекса Abaqus может позволить изучить изменение кривизны полосы при ее правке в роликовой правильной машине. Авторы приводят результаты расчета кривизны полосы при правке ее в 9-роликовой правильной машине, а также полученное распределение остаточных напряжений по толщине полосы после правки (рисунок 1.18).

По результатам моделирования высказаны предположения, что напряженное состояние полосы после правки зависит от изменения кривизны при правке и числа роликов, под которыми изгибается полоса. В 9-роликовой правильной машине в изгибе полосы не участвуют нижние первый и последний ролики, поэтому число смен знаков напряжений с плюса на минус по толщине полосы после правки должно быть семь сверху и семь снизу. При этом при моделировании не учитывался процесс упругой разгрузки полосы после правки и связанные с ним перераспределения напряжений по толщине, приводящие к отклонению от прямолинейности листов при последующей обработке. Кроме того, в работе не приводятся исследования влияния параметров процесса правки на изменение кривизны полосы и распределения напряжений по толщине.

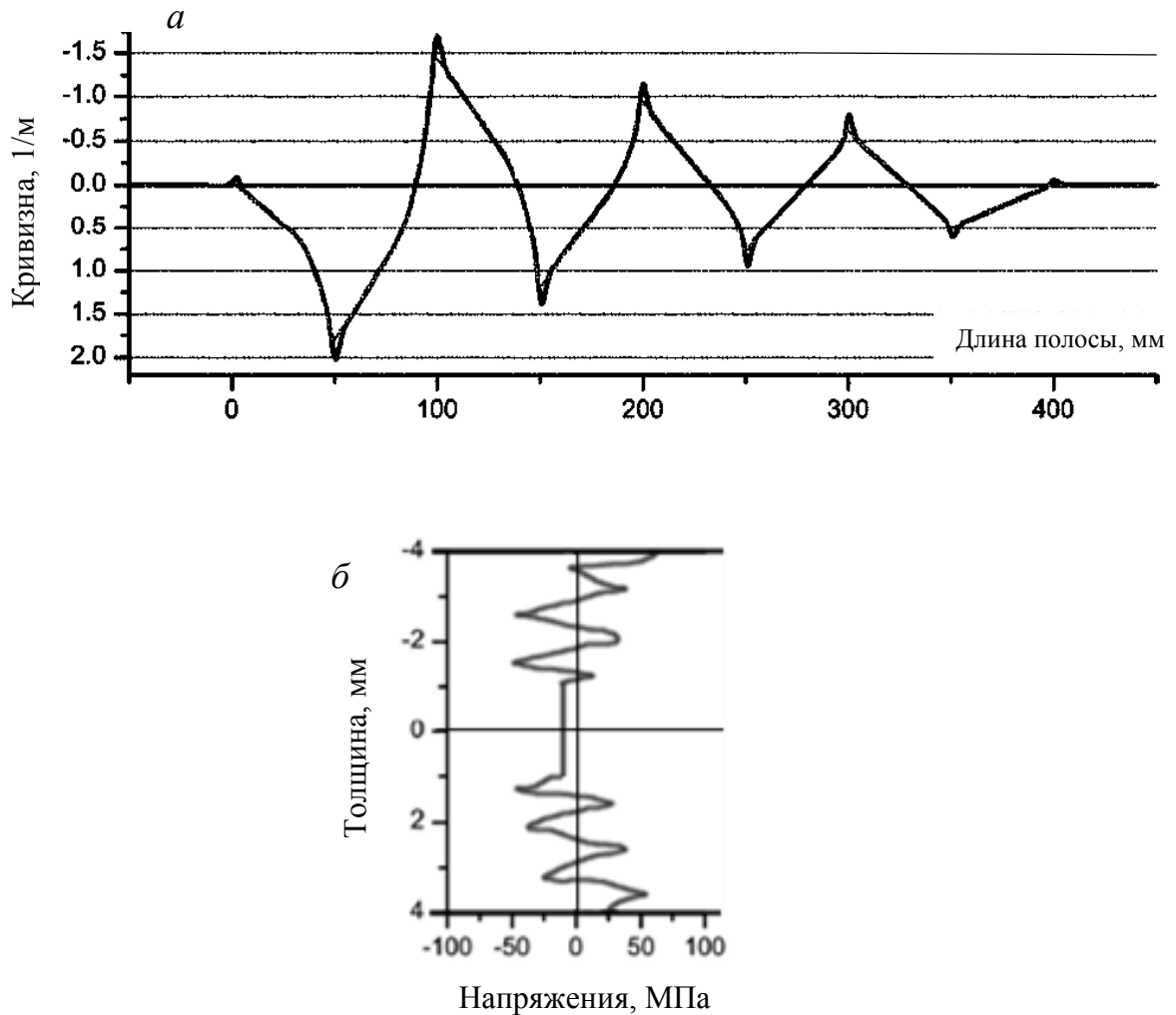


Рисунок 1.18 – Изменение кривизны полосы при правке в 9-роликовой машине (а), распределение остаточных напряжений по толщине полосы после правки (б)

Рассмотрением процесса правки занимались авторы работ [50 – 53], выполняя экспериментальные и численные исследования циклических испытаний пластины на изгиб, рассматривая вопросы управления кривизной листа после правки путем перемещения последнего верхнего ролика. В работе [53] высказывается предположение о возможности адаптации распределения остаточных напряжений по толщине в зависимости от перекрытия роликов и приводятся результаты моделирования распределений напряжений по толщине (рисунок 1.19) после правки в 7-роликовой правильной машине полосы из низкоуглеродистой стали DC01 толщиной 2 мм с начальной

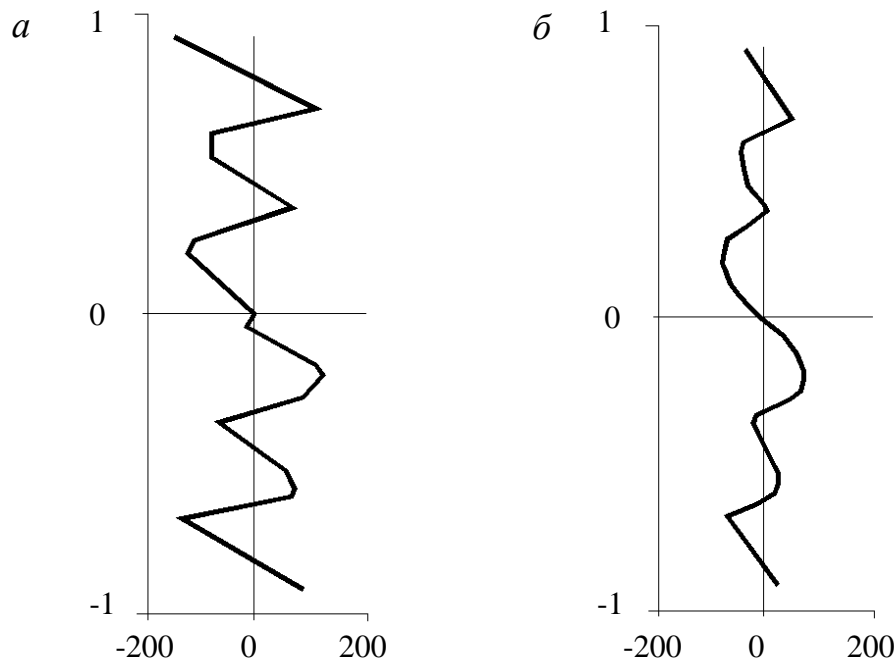


Рисунок 1.19 – Распределения напряжений по толщине полосы при разной исходной кривизне полосы: *а* – 200 мм; *б* – 500 мм

кривизной полосы, равной 200 мм и 500 мм, с постоянным перекрытием ролика № 2 с нижними роликами и различными значениями перекрытий роликов № 4 и № 6. 2D-модель правки создана в программном комплексе Abaqus.

В работе сделаны следующие выводы: 1) чем меньше радиус кривизны полосы на входе в РПМ, тем больше внутренние напряжения в полосе после правки; 2) форма кривой распределения напряжений характеризуется многократным изменением знака напряжений по толщине, зависящим от фактического числа операций изгиба, т.е. от числа растяжений и сжатий.

Основной недостаток модели – отсутствие учета упругой разгрузки материала после правки, а также то, что рассматриваемая РПМ с независимой настройкой верхних роликов крайне редко применяется на практике. Кроме того, не совсем понятно, как задавалось контактное взаимодействие полосы и роликов и учитывался такой параметр правки, как скорость. А также

непонятно, почему при исследовании выбирались такие перекрытия верхних роликов.

Приведенный анализ публикаций показал, что вопросами моделирования процесса правки на роликовых правильных машинах занимается достаточно большое число исследователей, как в России, так и в мире. Большинство публикаций посвящено определению кривизны проката, а также максимальных напряжений, возникающих в полосе при правке, на уровне мирового научного сообщества активно применяется метод конечных элементов. При этом вопросы исследования закономерностей распределения внутренних напряжений по толщине полосы при правке, после правки с учетом упругой разгрузки металла и дальнейшей обработке металла вообще не рассматриваются.

Учитывая изложенное, моделирование процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации с применением метода конечных элементов представляется весьма актуальной научно-технической задачей.

Выводы по главе 1

1. Обзор известных подходов к вопросу повышения плоскостности горячекатаных полос и листов показал, что несмотря на разработанные методы ее улучшения при прокатке и правке, не рассматривается взаимосвязь этих процессов с дальнейшей обработкой металла с применением высокотехнологичных методов, таких как лазерная или плазменная резка, приводящих из-за нагрева зоны реза и релаксации технологических остаточных напряжений к значительному отклонению от плоскостности (короблению) деталей и даже появлению в них трещин.

2. Анализ способов правки горячекатаных стальных полос, являющихся завершающей стадией производства листового проката, показал, что при правке полос широкого сортамента с высокой производительностью

основным способом является правка в условиях циклической знакопеременной деформации, а решение проблем настройки и выбора оптимальных параметров процесса правки на современных РПМ открывает новые перспективные возможности знакопеременного изгиба как инструмента по управлению плоскостностью и остаточными напряжениями горячекатаных полос.

3. Аналитический обзор существующих моделей расчета процесса правки в условиях циклической знакопеременной деформации позволил установить, что их применение на практике не обеспечивает адекватной оценки и прогнозирования остаточных напряжений в тонком стальном листе, подвергаемом высокотехнологичными методами обработки, из-за следующих недостатков:

3.1. В подавляющем большинстве известных моделей предусмотрено определение определению кривизны проката, а также максимальных напряжений, возникающих в полосе при правке и не имеется возможности рассчитать распределения внутренних напряжений по толщине полосы при правке.

3.2. В известных моделях отсутствует описание контактного взаимодействия полосы и роликов, а также в моделях, основанных на аналитических выражениях, не учитывался такой параметр правки, как скорость. В ряде работ нет сравнений с экспериментальными данными и не раскрываются возможности практической реализации.

3.3 Во всех известных моделях не рассматривался комплексный подход к исследованию закономерностей распределения внутренних напряжений по толщине полосы при правке, после правки с учетом упругой разгрузки металла и дальнейшей обработки металла.

4. Анализ возможных путей устранения указанных недостатков показал, что наиболее перспективным методом моделирования процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации и дальнейшей обработки металла является метод конечных элементов.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Оборудование для правки полос

Для достижения поставленной цели в диссертации были проведены эксперименты на агрегатах поперечной резки №3 (АПР-3) и №4 (АПР-4), установленных в цехе обработки металла №2 (ЦОМ-2) ПАО «Северсталь». Схема агрегата АПР-4 представлена на рисунке 1.3.

АПР-3 имеет в своем составе одну 15-роликовую правильную машину (рисунок 2.1), а АПР-4 – две машины правки – 13-роликовую и 17-роликовую (рисунок 2.2). Производитель всех машин – фирма LDM, Италия.



Рисунок 2.1 – 15-роликовая правильная машина
агрегата поперечной резки №3



Рисунок 2.2 – 13- и 17-роликовые правильные машины агрегата поперечной резки № 4

Режимы правки на всех машинах подбираются опытным путем в зависимости от сортамента, подвергаемого правке. Усилия, действующие на рабочие ролики в процессе правки, не фиксируются, но имеется защита двигателей от перегрузки при увеличении значений перекрытий роликов на входе РПМ. Сортамент РПМ представлен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Сортамент правильных машин фирмы LDM

Параметры	15-роликовая (АПР-3)	13-роликовая (АПР-4)	17-роликовая (АПР-4)
Толщина полосы, мм	2 – 10	3 – 16	3 – 6
Предел текучести материала полосы (максимальный), МПа	500	700	
Скорость правки, м/мин	60 – 120	30 – 60	

2.2 Исследуемые материалы

Для исследований были взяты марки стали S235MC и S355MC и их аналоги – сталь 09Г2С и сталь 3, как наиболее подходящие для всех видов резки, включая лазерную, и поэтому широко востребованные современным машиностроительным производством, применяющим высокотехнологичные методы раскроя металла. Рассматривались горячекатаные полосы толщиной 3 – 15 мм.

Химический состав исследуемых сталей приведен в таблице 2.2, а механические характеристики – в таблице 2.3.

Таблица 2.2 – Химический состав сталей

Марка стали	Стандарт	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu	V	Nb	Ti
S235	EN 10025-2	до 0,17	-	до 1,4	-	до 0,045	до 0,045	-	до 0,009	-	-	-	-
S355*	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 2.3 – Механические характеристики горячекатаных полос

Марка стали	Стандарт	Толщина, мм	Предел текучести (min), МПа	Предел прочности (min – max), МПа	Относительное удлинение, %
S235	EN 10025-2	3,0 – 15,0	235	360 – 510	24
S355	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

2.3 Оборудование для порезки листов высокотехнологичными методами

К высокотехнологичным методам обработки листов относятся лазерная и плазменная резки, позволяющие точно и быстро вырезать из стального листа практически любую деталь сложной формы.

Исследования после порезки отклонений листов, прошедших правку на РПМ, производились в промышленных условиях машиностроительного центра «СММ-Тяжмаш» на машине плазменной резки «SatroniK LS3000» (рисунок 2.3) и на энергомашиностроительном предприятии ООО «Электросила» (г. Санкт-Петербург) на установке лазерной резки BYSPRINT 3015 (рисунок 2.4)



Рисунок 2.3 – Машина плазменной резки SatroniK LS3000

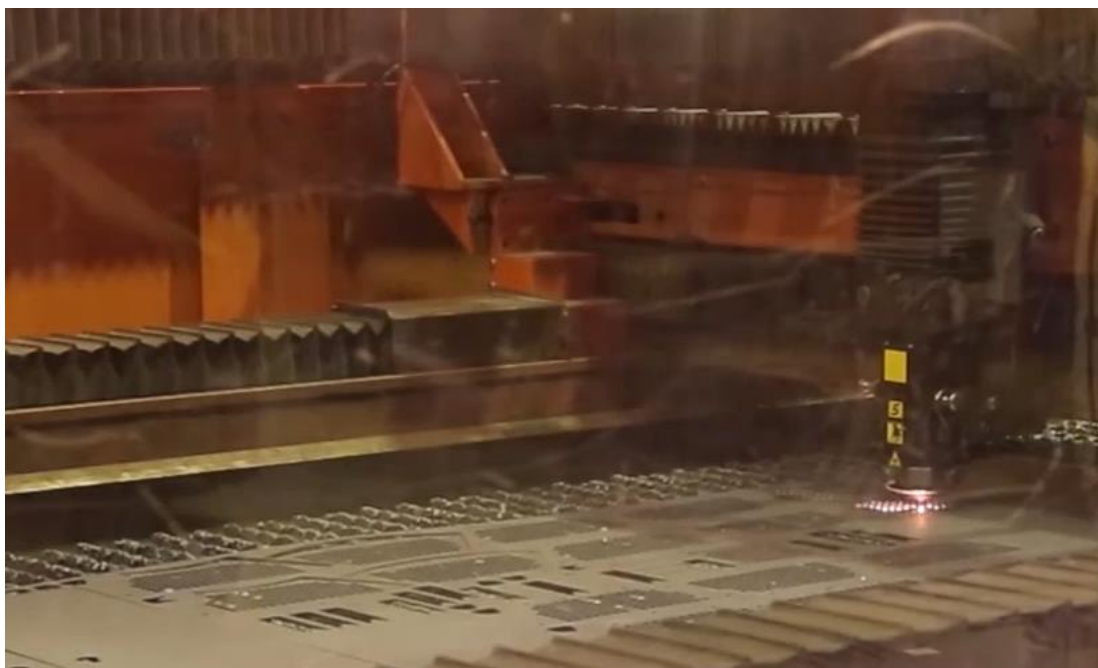


Рисунок 2.4 – Установка лазерной резки BYSPRINT 3015

В проводимых экспериментах ширина отбираемых листов, прошедших правку на машинах LDM, составляла 1500 мм, а длина 3000 мм. Каждый лист разрезался на продольные полоски одинаковой ширины.

2.4 Методика определения отклонений листов от плоскостности после правки и резки для оценки уровня остаточных напряжений

Анализ экспериментальных методов определения остаточных напряжений, включая механические (разрезание, высверливание отверстий в материале с определением измерений по показателям тензометров) и физические (рентгеновский, ультразвуковой, электромагнитный и др.) [75 – 83], показал, что, несмотря на их большое многообразие, все они характеризуются высокой трудоемкостью, сложностью, а в большинстве случаев невозможностью определения напряжений, как по толщине, так и всему объему стального листа. При этом применение надежного инструмента теоретических исследований – математического моделирования, основанного на методе конечных элементов, позволяет изучить влияние параметров

процесса правки проката на распределение напряжений по толщине листов. А соотношение полученных результатов моделирования с результатами деформаций листов после резки высокотехнологичными методами позволит оценить, был ли горячекатаный лист должным образом освобожден от остаточных напряжений после правки. По результатам сравнения показателей напряженно-деформированного состояния полос, включая уровень остаточных напряжений и характера их распределения по толщине, с значениями отклонений листов, зафиксированных после высокотехнологичной обработки, может быть сделан вывод о пригодности разработанной модели правки в среде конечно-элементного анализа.

Измерение отклонений от плоскостности листов после правки производилось на контрольной плите на всей длине листа, а также фиксировались значения в системе контроля данных технологического процесса правки.

Для оценки изгиба полосок, вырезаемых высокотехнологичными методами, была разработана методика определения их отклонений от плоскостности, основанная на схеме раскроя листа размерами 1500x3000 мм (рисунок 2.5) и включающая следующие этапы:

1. Порезка образца на продольные полоски шириной 100 мм по заданной программе на установке лазерной или плазменной резки.
2. Маркировка каждой полоски – V_1, V_2, \dots, V_n , где V обозначает верх; n – порядковый номер.
3. Измерение плоскостности получившихся полосок длиной 3000 мм.
4. Отрезка участков длиной не менее 500 мм по краям полосок на установке лазерной или плазменной резки для исключения влияния механического реза после правки.
5. Определение величины фактического изгиба каждой полоски длиной 2000 мм.

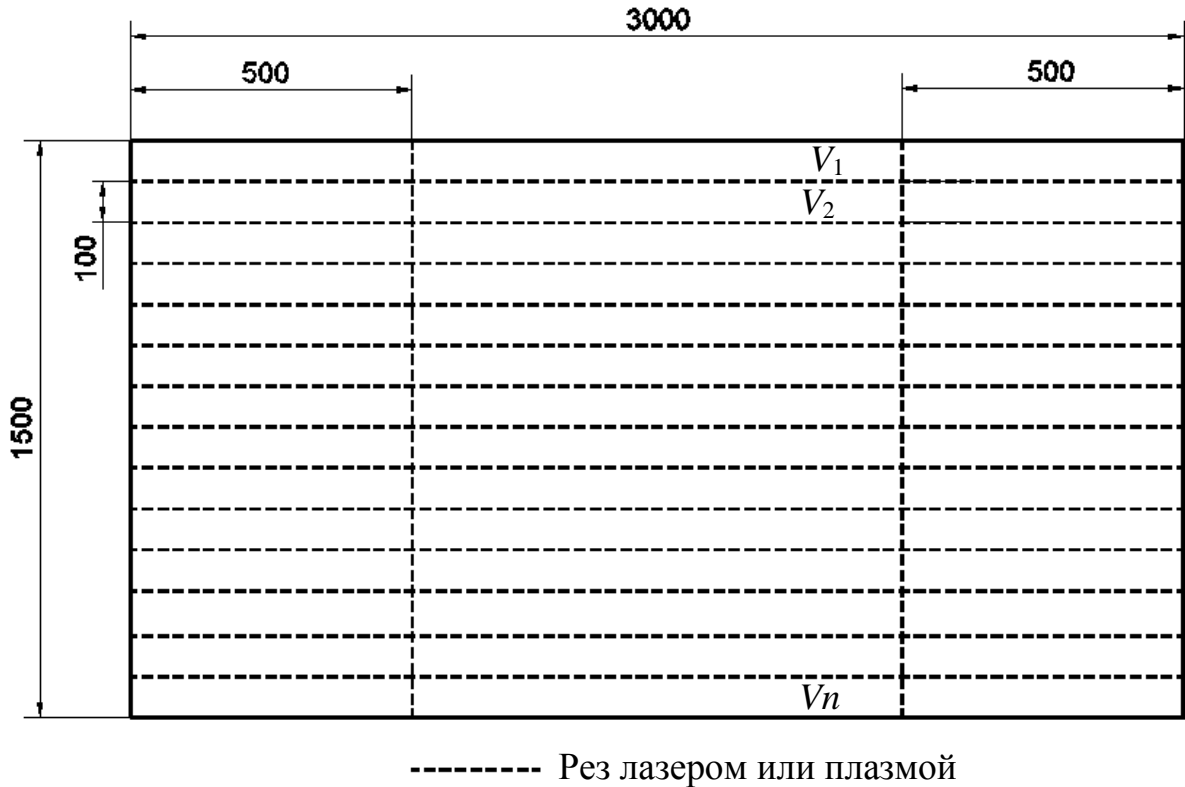





Рисунок 2.5 – Схема раскроя листа размерами 1500x3000 мм

Величина фактического изгиба каждой полоски определяется на поверочной плите длиной 1000 мм, при этом середина полоски совпадает с серединой плиты (рисунок 2.6). Также отмечается тип изгиба полоски согласно таблице 2.2.



Рисунок 2.6 – К определению фактического изгиба каждой полоски

Таблица 2.2 – Типовые изгибы полос после эксперимента

№	Схематичное изображения	Описание
1		Полоса лежит на поверхности ровно, без значительных (не более 5 мм) отклонений от плоскостности
2		Оба конца полосы отклонены вверх
3		Оба конца полосы отклонены вниз

Наличие хотя бы одной полоски с неплоскостностью более 20 мм после лазерной или плазменной резки приводит к отбраковке листа по плоскостности.

2.5 Определение механических характеристик исследуемых материалов в условиях знакопеременного нагружения

Для определения механических свойств исследуемых материалов были подготовлены образцы из стали 3 и 09Г2С по ГОСТ 1497-84 толщиной 3 мм (рисунок 2.7). Образцы были отобраны непосредственно после прокатки на непрерывном широкополосном стане 2000 ПАО «Северсталь», а далее были испытаны на универсальных испытательных машинах Galdabini Quasar 50 и Zwick/Roell HA250, установленных соответственно в лаборатории «Моделирования и механических испытаний» Череповецкого государственного университета и в лаборатории механических испытаний ПАО «Северсталь» (рисунок 2.8). Результаты растяжения образцов представлены на рисунке 2.9.

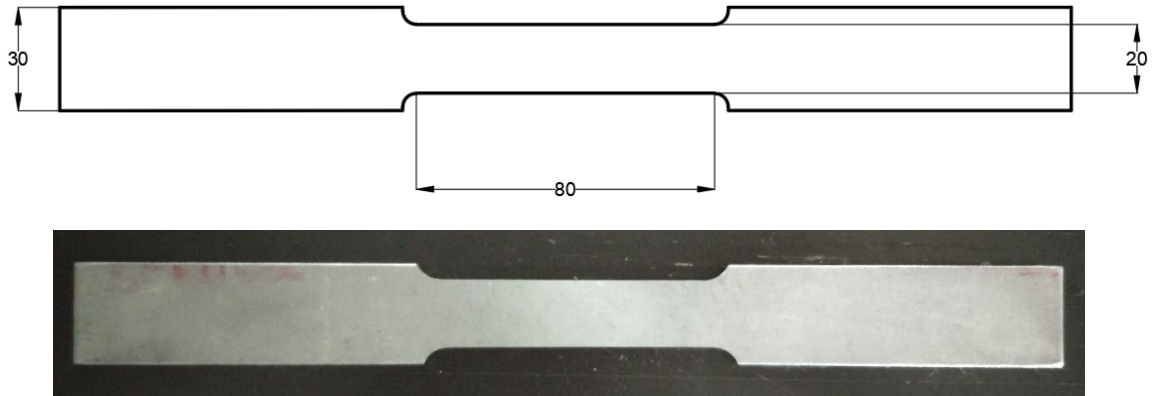
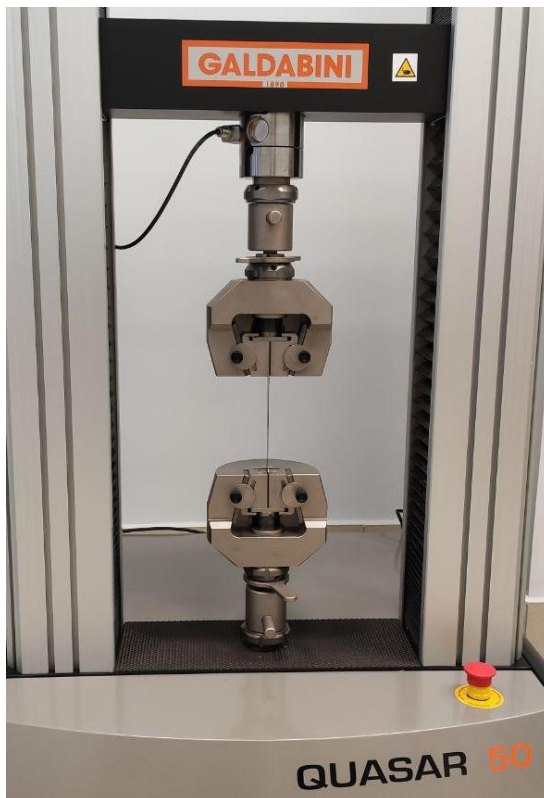


Рисунок 2.7 – Образец для испытаний на растяжение, подготовленный по ГОСТ 1497-84



a



б

Рисунок 2.8 – Испытания образцов на универсальных машинах:
a – Galdabini Quasar 50; *б* – Zwick/Roell HA250

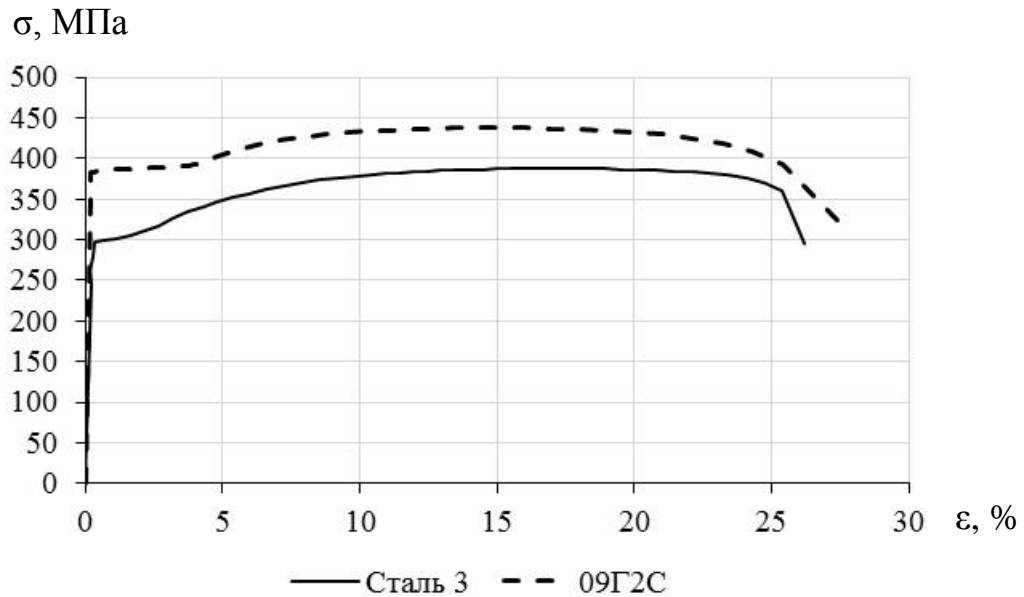


Рисунок 2.9 – Диаграммы растяжения марок стали 3 и 09Г2С

Для реализации знакопеременного нагружения образцов и учета эффекта Баушингера было задано растяжение образца, затем сжатие и снова растяжение и сжатие, далее – снятие нагрузки. Скорость подвижной траверсы на растяжение и сжатие составляла 0,1 мм/с, а нагружение производилось до деформации, равной 1,5 %. При этом при сжатии отмечалась потеря устойчивости образца. Для исключения этого негативного явления было решено использовать фиксатор, состоящий из двух стальных жестко скрепленных пластинок и позволяющий предотвратить перемещение образца в поперечном направлении (рисунок 2.10). На рисунке 2.11 представлена диаграмма деформирования образца на примере стали марки 09Г2С, которая в дальнейшем использовалась для задания кинематической модели упрочнения материала при численном моделировании процесса правки.



Рисунок 2.10 – Образец с фиксатором

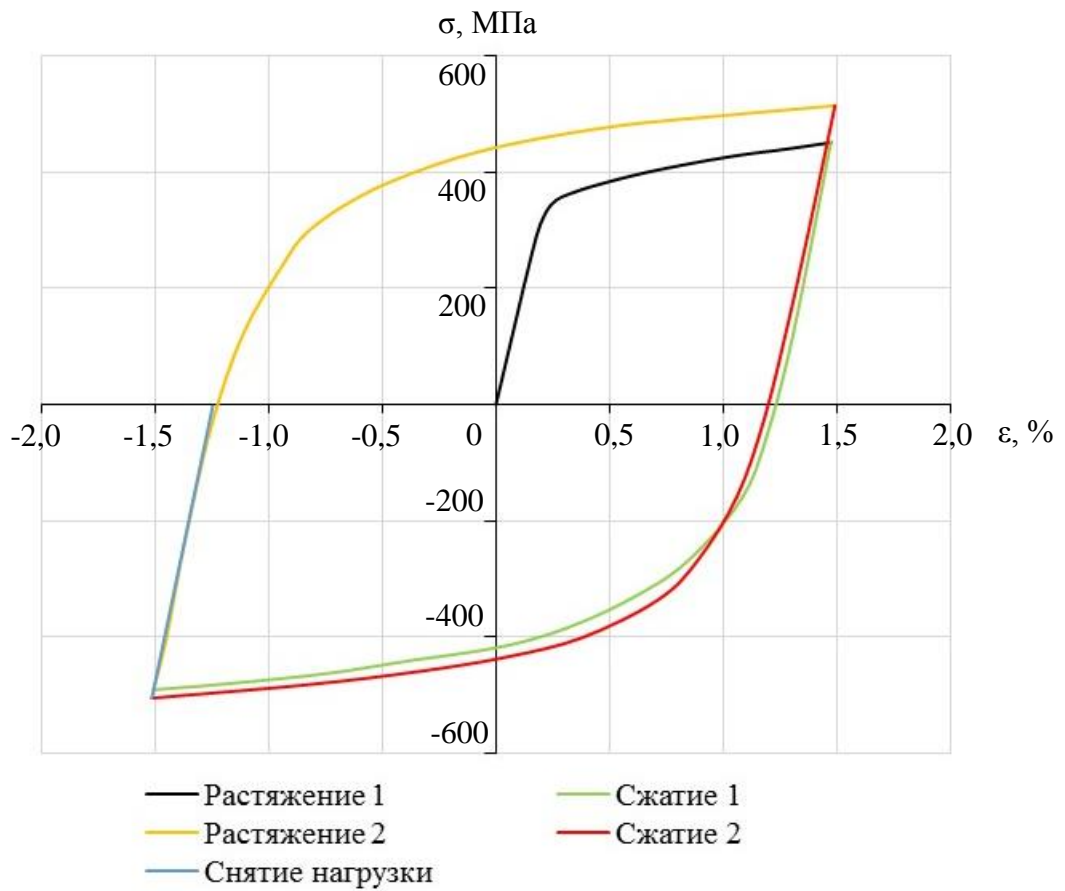


Рисунок 2.10 – Диаграмма знакопеременного деформирования образца из марки стали 09Г2С

Выводы по главе 2

1. Представлены оборудование и материалы, необходимые для проведения исследований процесса правки в условиях циклической знакопеременной деформации и отклонений листов от плоскостности после их резки высокотехнологичными методами.

2. Разработана методика определения отклонений горячекатаных листов от плоскостности после лазерной и плазменной резки для оценки уровня остаточных напряжений в листах после правки.

3. Получены диаграммы знакопеременного деформирования образцов из сталей марок 3 и 09Г2С на основе циклических испытаний на растяжение – сжатие.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПРАВКИ ГОРЯЧЕКАТАНЫХ ПОЛОС В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Для всестороннего исследования процесса правки, включая определение напряженно-деформированного состояния (НДС) горячекатаных полос, деформационных и энергосиловых параметров правки в условиях циклической знакопеременной деформации, были использованы системы инженерного анализа DEFORM и SIMULIA Abaqus, основанные на методе конечных элементов и широко применяемые в мировой исследовательской практике при решении задач обработки металлов давлением.

3.1 Теоретические основы систем инженерного анализа

В основу расчетов в системах инженерного анализа положен энергетический метод. Уравнения равновесия получаются путем дискретизации уравнения виртуальных работ и могут быть записаны в виде

$$\sum_{k=1}^N F_k \delta u_k = 0, \quad (3.1)$$

где F_k – сила, приложенная к каждой точке системы; а δu_k – перемещения точек системы. Поскольку состояние системы может зависеть от истории нагружения, в процессе решения должны производиться малые приращения нагрузки с определением равновесного состояния на каждом этапе. Одним из методов решения нелинейных уравнений является метод Ньютона-Рафсона, обеспечивающий вычислительную эффективность и сходимость при решении большинства прикладных задач.

При решении задачи с учетом истории нагружения методом Ньютона-Рафсона узловые перемещения u изменяются на каждом шаге приращения нагрузки линейно:

$$u(\tau) = \left(1 - \frac{\tau}{\Delta t}\right)u(t) + \frac{\tau}{\Delta t}u(t + \Delta t), \quad (3.2)$$

где τ – время текущего приращения нагрузки, принимающее значения от 0 до Δt .

Напряженно-деформированное состояние системы описывается через значения эквивалентных напряжений:

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12} + \sigma_{23} + \sigma_{31})}, \quad (3.3)$$

где σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} – главные напряжения, σ_{12} , σ_{23} , σ_{31} – тангенциальные напряжения.

Начало текучести материала соответствует механической характеристике, задаваемой в упруго-пластической модели поведения материала с кинематическим упрочнением.

Общая деформация материала состоит из упругой и пластической частей:

$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{pl}. \quad (3.4)$$

Эквивалентная упругая деформация равна:

$$\varepsilon^{el} = \frac{2(1 + \nu)}{E} \sigma_0, \quad (3.5)$$

где ν – коэффициент Пуассона материала; E – модуль упругости 1-го рода;

$\sigma_0 = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})$ – среднее напряжение.

Приращение эквивалентной пластической деформации составляет:

$$d\varepsilon^{pl} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(d\varepsilon_1^{pl} - d\varepsilon_2^{pl})^2 + (d\varepsilon_2^{pl} - d\varepsilon_3^{pl})^2 + (d\varepsilon_3^{pl} - d\varepsilon_1^{pl})^2}. \quad (3.6)$$

Тогда полная эквивалентная деформация равна

$$\varepsilon^{pl} = \int d\varepsilon^{pl}. \quad (3.7)$$

3.2 Моделирование процесса правки горячекатаной полосы в программном комплексе DEFORM

Конечно-элементные модели процесса правки в условиях циклической знакопеременной деформации были разработаны в программном комплексе DEFORM в 2D постановке для исследования распределений напряжений по толщине полосы и в 3D постановке для учета влияния исходной формы полосы – плоской, имеющей короб в середине и имеющей волну у боковых кромок.

Моделирование методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния горячекатаных стальных полос при правке в среде DEFORM, независимо от вида постановки, включало три этапа [84 – 87]:

- первый – создание модели РПМ, в которой между верхними и нижними роликами размещена полоса;
- второй – перемещение модели кассеты с верхними роликами вниз в рабочее наклонное положение, так, чтобы максимальное перемещение имели первые ролики;
- третий – задание вращательного движения всех роликов модели, в результате чего полоса через ролики начинает двигаться с заданной скоростью v за счет сил трения между ней и роликами.

Для моделирования были приняты следующие условия и исходные данные (на примере правки в РПМ, имеющей 17 роликов (рисунок 3.1)). Упругопластическая модель полосы с кинематическим упрочнением длиной 1700 мм была сформирована из 4-х узловых элементов: в 2D постановке с четырьмя конечными элементами по толщине и в 3D постановке из тетраэдров. Диаметры роликов $D_p = 64$ мм, шаг $S = 75$ мм. Для описания контактов полосы с роликами использовалась модель трения по Кулону со значением коэффициента трения, равным 0,12. На концах полосы были заданы

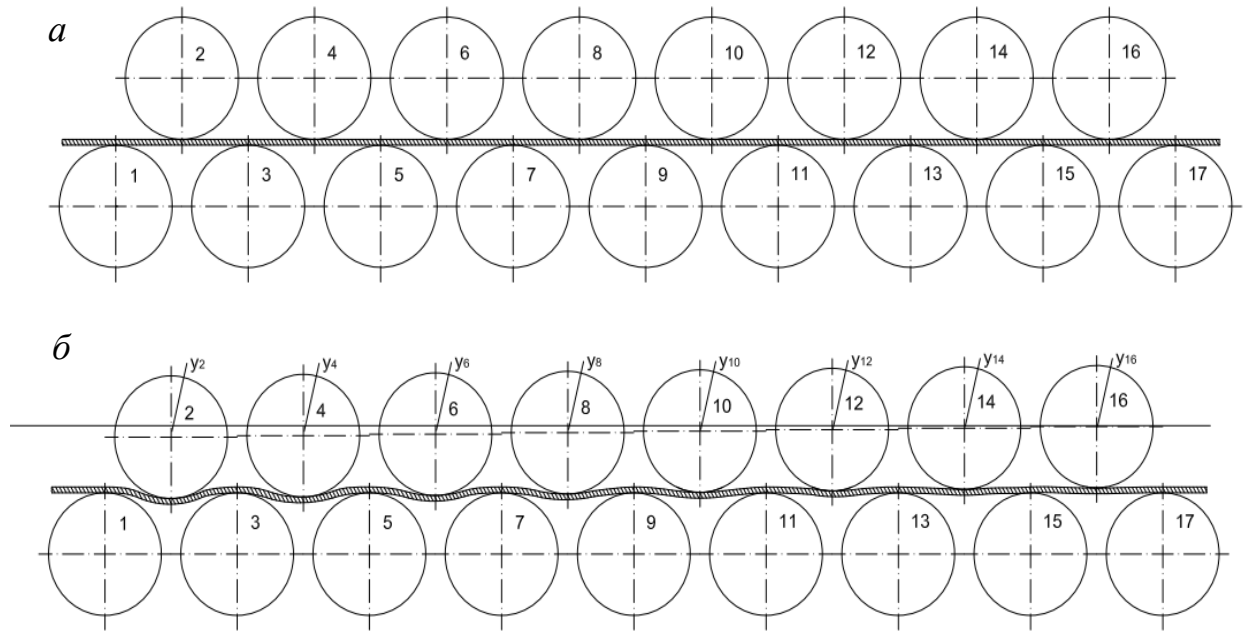


Рисунок 3.1 – Схема процесса правки на 17-роликовой РПМ:

a – исходное положение; *б* – рабочее положение

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

следующие граничные условия: узлы заднего торца полосы не перемещаются по вертикали, узлы переднего торца перемещаются в направлении движения полосы в соответствии с заданной скоростью правки. Кроме того, принято допущение о незначительном влиянии силы тяжести и удельного веса полосы на ее напряженно-деформированное состояние.

Математическое моделирование в среде DEFORM 2D было выполнено для пяти вариантов наклона верхней кассеты. Значения перемещений роликов $y_2 \dots y_{16}$ для каждого варианта расчета приведены в таблице 3.1.

Результаты расчета распределений нормальных напряжений по толщине можно получать отдельно по оси x (вдоль оси полосы) и по оси y или в тензорном виде σ (результат геометрического суммирования σ_x и σ_y), определяющем состояние полосы: при $\sigma < \sigma_{0,2}$ – состояние упругости, а при $\sigma \geq \sigma_{0,2}$ – состояние пластичности ($\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести полосы).

Таблица 3.1 – Вертикальные перемещения верхних роликов для 5-ти вариантов настройки РПМ

Номер варианта	Перемещения роликов, мм							
	y_2	y_4	y_6	y_8	y_{10}	y_{12}	y_{14}	y_{16}
1	8,0	6,89	5,78	4,66	3,54	2,43	1,32	0,2
2	8,0	6,93	5,86	4,79	3,72	2,64	1,57	0,5
3	6,0	5,17	4,34	3,51	2,69	1,86	1,03	0,2
4	6,0	5,21	4,43	3,64	2,86	2,07	1,29	0,5
5	5,25	4,63	4,01	3,39	2,76	2,14	1,52	0,9

Примечание. Значения $y_2...y_{16}$ показаны на рисунке 3.1, схема «б».

Реализация модели осуществлена на примере правки полосы толщиной $h = 3$ мм из стали 09Г2С. В качестве допущения принято, что полоса поступает в РПМ без остаточных напряжений. В качестве примера на рисунке 3.2 показаны распределения напряжений σ по толщине полосы между 1-м и 2-м роликами (схема «а») и между 16-м и 17-м роликами (схема «б») для 4-го варианта расчета.

На графиках рисунка 3.3 представлены результаты расчета распределений напряжений σ по толщине полосы на выходе из листопрямильной машины для всех пяти вариантов перемещения верхних роликов.

Таким образом, моделирование подтвердило исходную предпосылку – правка на РПМ приводит к существенной неравномерности остаточных напряжений по толщине полос. Максимальная неравномерность их оказалась после правки по 4-му варианту настройки машины: 511 МПа.

Моделирование в среде DEFORM 3D было выполнено для трех вариантов 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 длину задавалась равной 400 мм. На рисунке 3.4 показана полоса, входящая в первые ролики РПМ, имеющая неплоскостность в виде короба (схема б) или волны (схема в). Рассматривался режим правки №

4 таблицы 3.1 полосы размерами 3x1500 мм на 17-роликовой правильной машине.

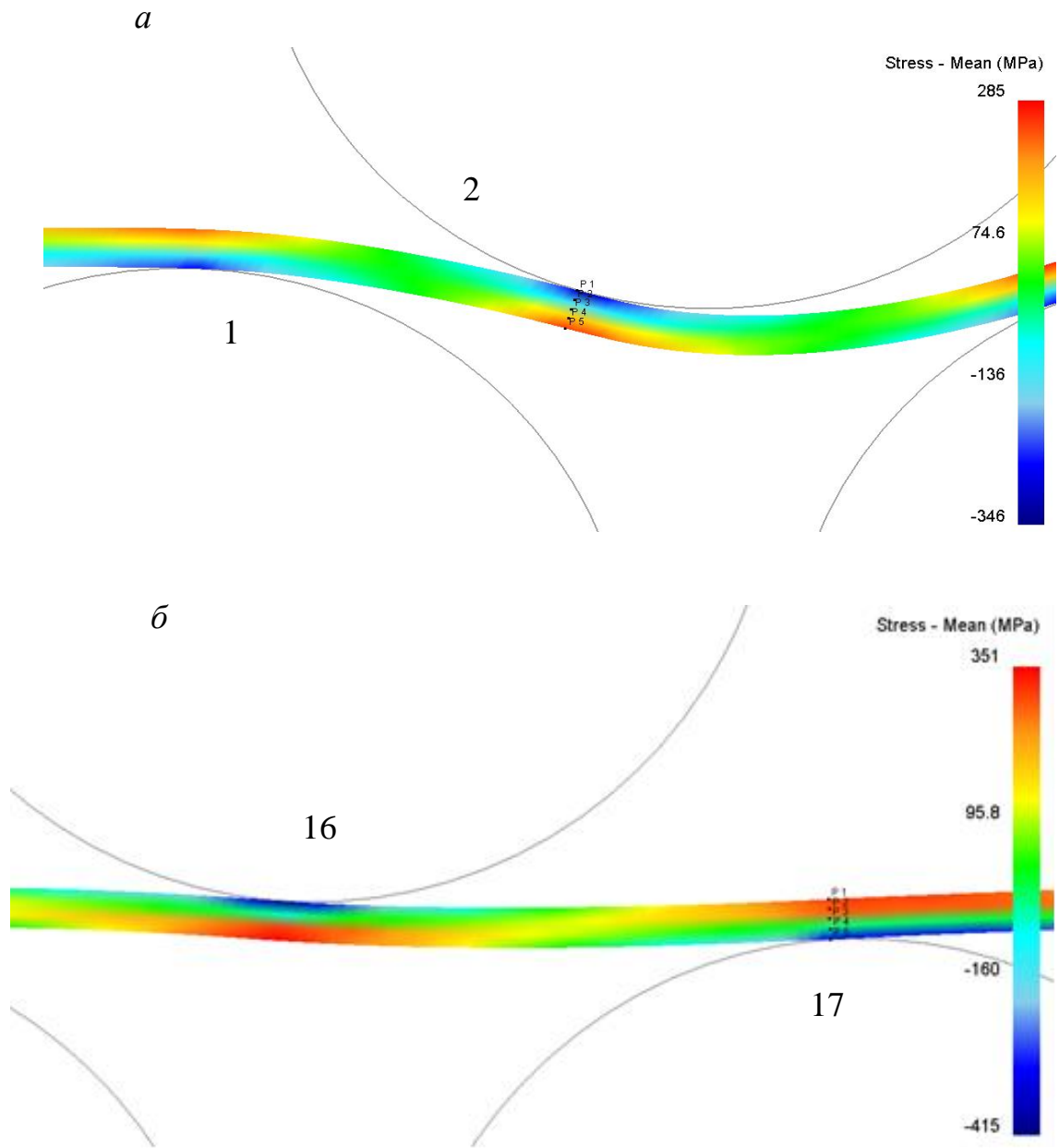


Рисунок 3.2 – Примеры результатов расчета распределений напряжений по толщине полосы для 4-го варианта настройки РПМ:
а – между 1-м и 2-м роликами; *б* – между 16-м и 17-м роликами

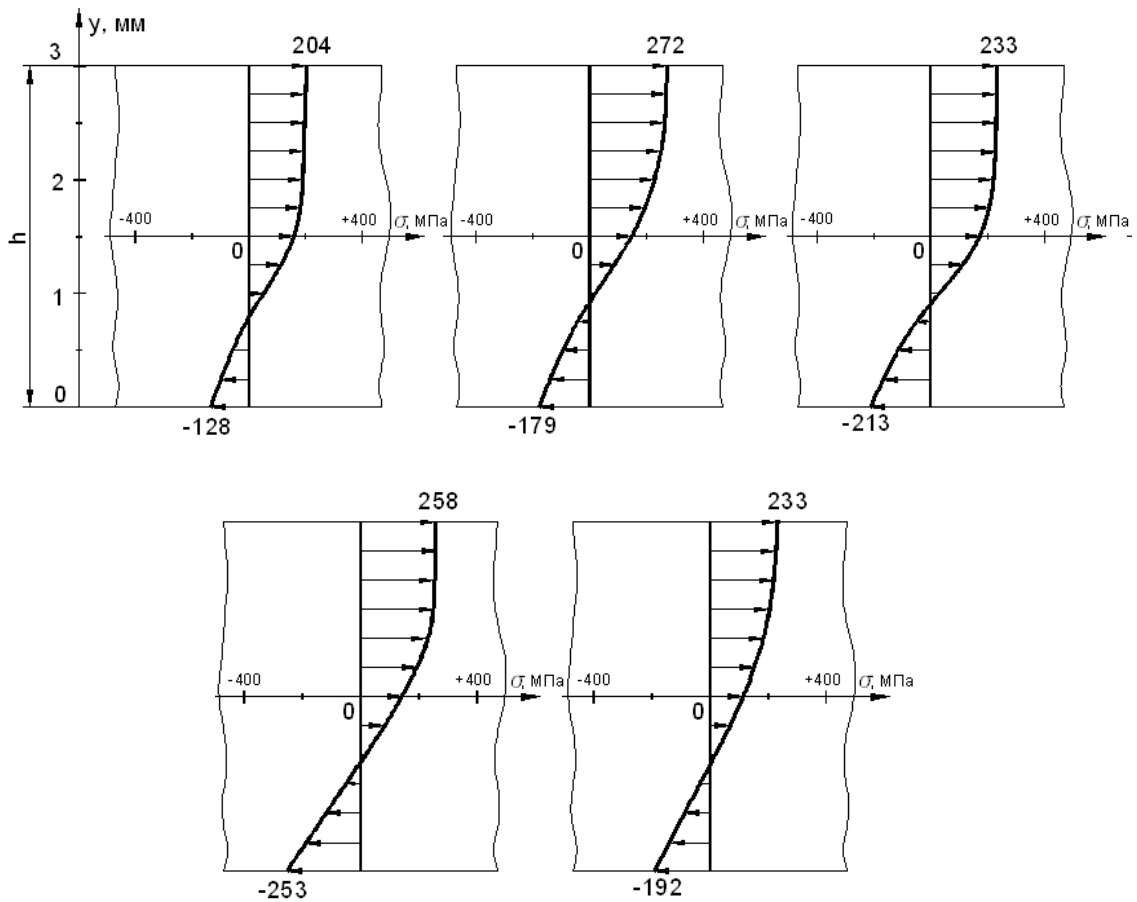


Рисунок 3.3 – Распределение напряжений по толщине полосы на выходе из РПМ для пяти вариантов настройки, указанных в таблице 3.1

После пропуска 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.

Распределение продольных растягивающих и сжимающих напряжений по толщине и ширине полосы во всех трех вариантах оказалось существенно неравномерным.

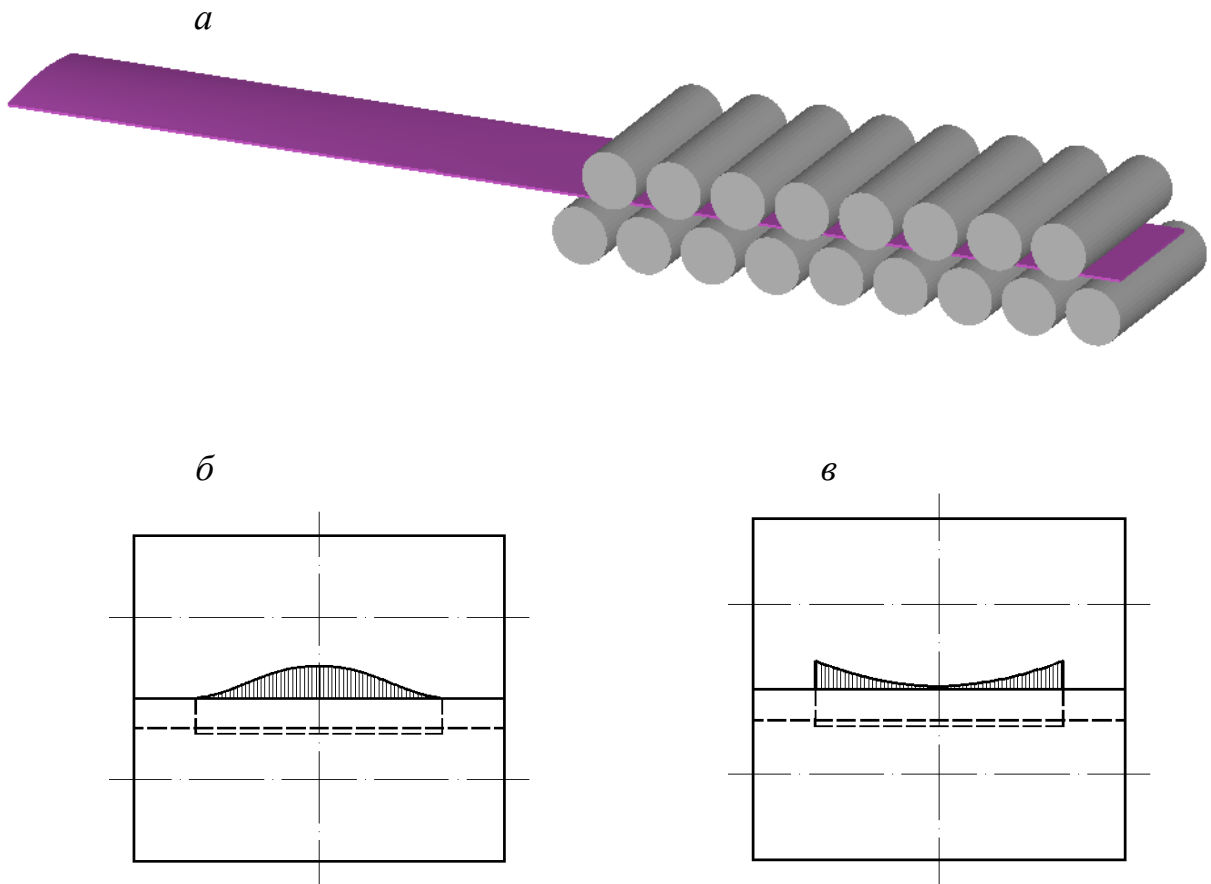


Рисунок 3.4 – Модель правки в 17-роликовой машине (*а*) и форма полосы на входе в РПМ с неплоскостью короб (*б*) и волна (*в*)

В качестве примера на рисунке 3.5 приведены полученные в результате моделирования графики распределения напряжений в поперечных сечениях полосы на выходе из 17-го ролика для трех вариантов исходной формы полос: без неплоскости, имеющей короб с высотой 20 мм и имеющей волну с высотой 10 мм. Данные этого рисунка подтверждают предварительный вывод о том, что правка на РПМ, устраняя неплоскость, создает неравномерно распределенные по толщине и ширине полосы продольные напряжения.

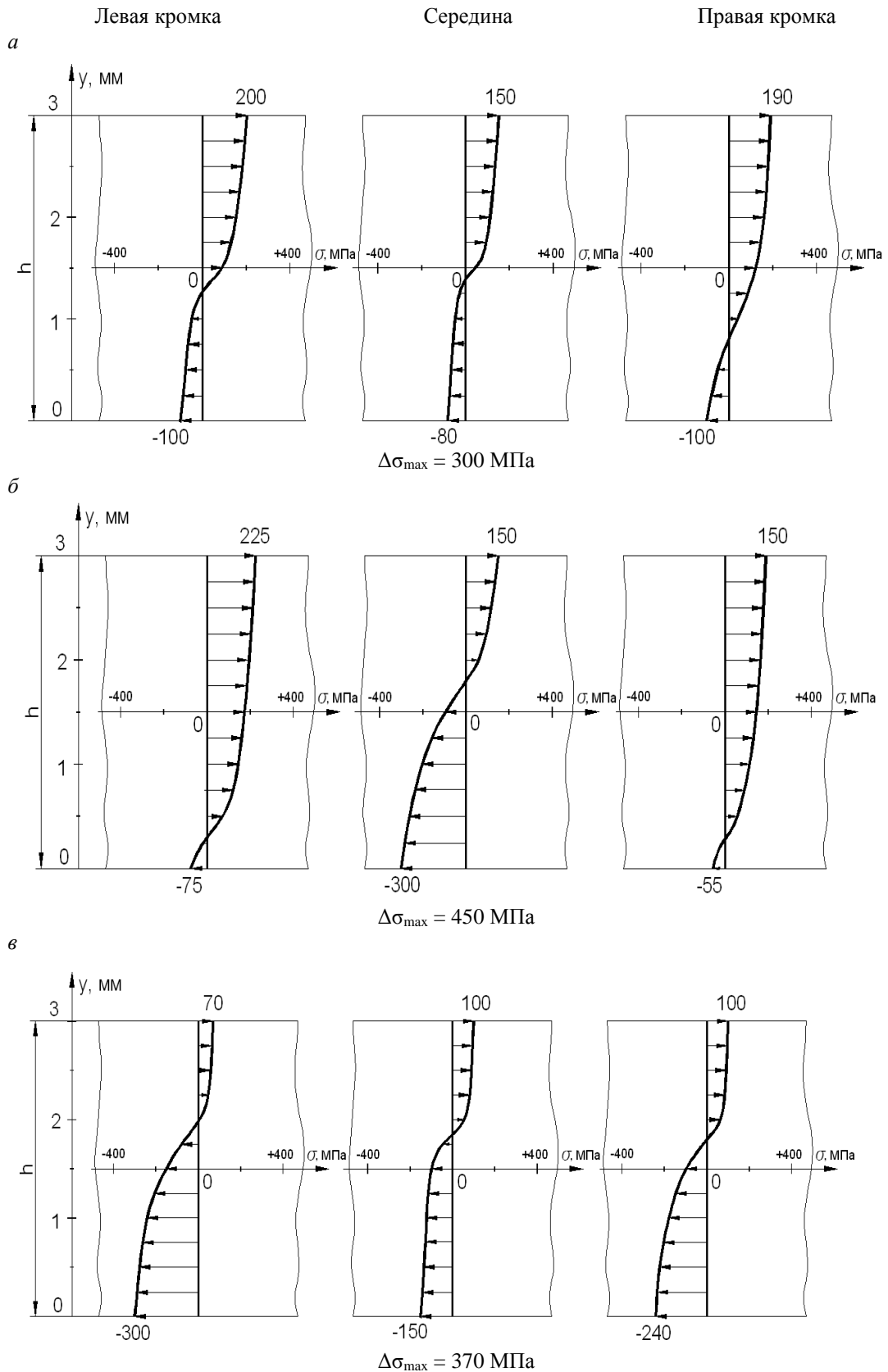


Рисунок 3.5 – Распределение продольных растягивающих напряжений по толщине полосы, МПа, в середине ширины, по левой и правой боковым кромкам, на выходе из последнего ролика РПМ (*a* – исходная полоса плоская; *б* – исходная неплоскостность – короб с амплитудой 20 мм; *в* – исходная неплоскостность – волна с амплитудой 10 мм; *h* – толщина полосы; «+» – растяжение, «-» – сжатие)

Для реализации комплексного подхода к исследованию процесса правки необходимо учитывать упругую разгрузку материала листа после правки. Вследствие того, что при моделировании в системе DEFORM нет возможности задать статический шаг, а значит определить упругое изменение напряжений в полосе после того, как она вышла из роликовой правильной машины и на нее перестали действовать внешние силы, было принято решение об использовании программного продукта, позволяющего выполнять последовательно разные типы задач, например, после динамической задачи рассчитывать статическую, далее снова вернуться к динамической и т.д.

3.3 Математическое моделирование процесса правки полосы в программном комплексе SIMULIA Abaqus

SIMULIA Abaqus – многоцелевой конечно-элементный программный комплекс, который может быть использован для решения различных классов задач инженерного анализа [88 – 90].

Отличительное преимущество, определившее дальнейшее использование системы SIMULIA Abaqus для исследования процесса правки, связано с возможностью проведения многодисциплинарного моделирования, включая статический и динамический анализы напряженно-деформированного состояния горячекатаной полосы, в рамках реализации одного алгоритма.

3.3.1 Моделирование изгиба полосы в трех роликах

Для раскрытия механизма формирования остаточных напряжений при правке с учетом упругой разгрузки материала в первом приближении процесс правки может быть сведен к задаче изгиба полосы в трех абсолютно жестких роликах цилиндрической формы (рис. 1).

Изгибу подвергался фрагмент полосы толщиной $h = 4$ мм и длиной, равной шагу t между роликами 1 и 3 нижнего ряда. Материал полосы –

S235MC со свойствами, полученными при испытаниях образцов. Модель деформируемой среды – упруго-пластическая. Количество конечных элементов по толщине полосы – 16. Между роликом 2 и верхней поверхностью полосы определено контактное взаимодействие с коэффициентом трения 0,25. Перемещение верхнего ролика вниз составляло 5 мм. На торцах полосы были зафиксированы от перемещений по горизонтали и вертикали точки в середине ее толщины.

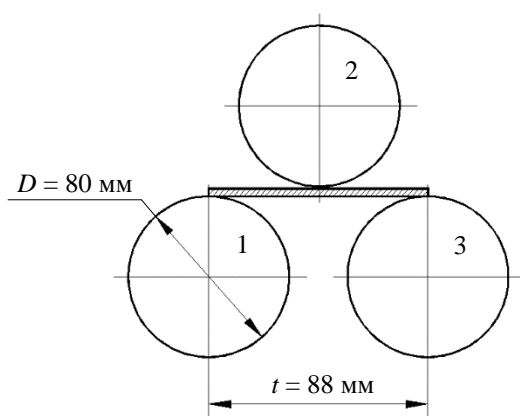


Рисунок 3.6 – Схема к пояснению изгиба
полосы в трех роликах

Результаты моделирования приведены на рисунках 3.7 – 3.10.

На рисунке 3.7 представлено распределение продольных напряжений при изгибе полосы при крайнем нижнем положении верхнего ролика. Видно, что верхние слои металла испытывают сжимающие напряжения, а нижние – растягивающие.

При снятии внешнего воздействия происходит упругая разгрузка материала полосы, сопровождающаяся релаксацией напряжений в приповерхностных областях проката, с формированием области «стесненных» упругих напряжений в центральной части сечения полосы (рисунок 3.8).

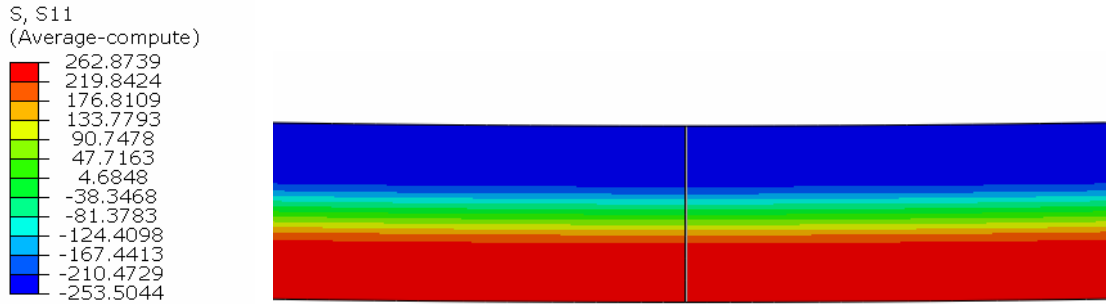


Рисунок 3.7 – Распределение продольных напряжений по толщине полосы, МПа

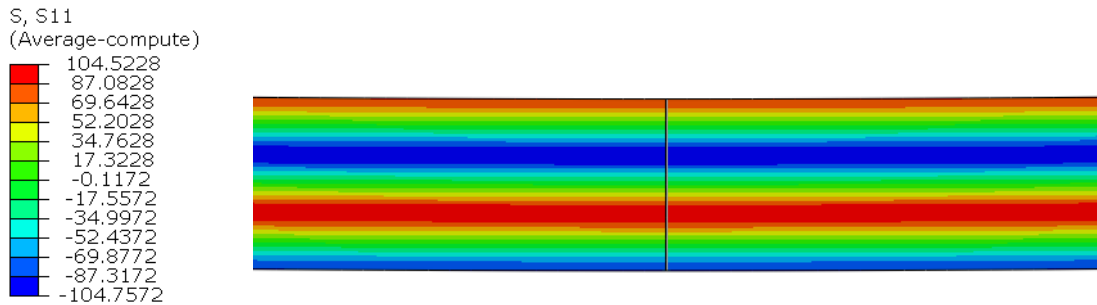


Рисунок 3.8 – Распределение продольных напряжений по толщине полосы после упругой разгрузки, МПа

Для сравнения характера изменения напряжений по толщине, на рисунке 3.9 приведены графики, а также фрагмент поля напряжений по толщине полосы после упругой разгрузки. Видно, что центральная часть сечения полосы испытывала только упругие деформации в процессе нагружения. Из-за наличия упругих деформаций в середине проката в этой зоне происходит накопление потенциальной энергии деформации при правке. Поскольку необратимые пластические деформации локализованы в приповерхностных слоях проката высотой, равной 1,2 мм сверху и снизу, то при разгрузке эти слои становятся препятствием по высвобождению обратимой потенциальной энергии упругой деформации. Это подтверждает распределение потенциальной энергии после разгрузки (рисунок 3.10). Максимальные значения соответствуют слоям, располагающимся на высоте от 1,1 до 1,4 мм

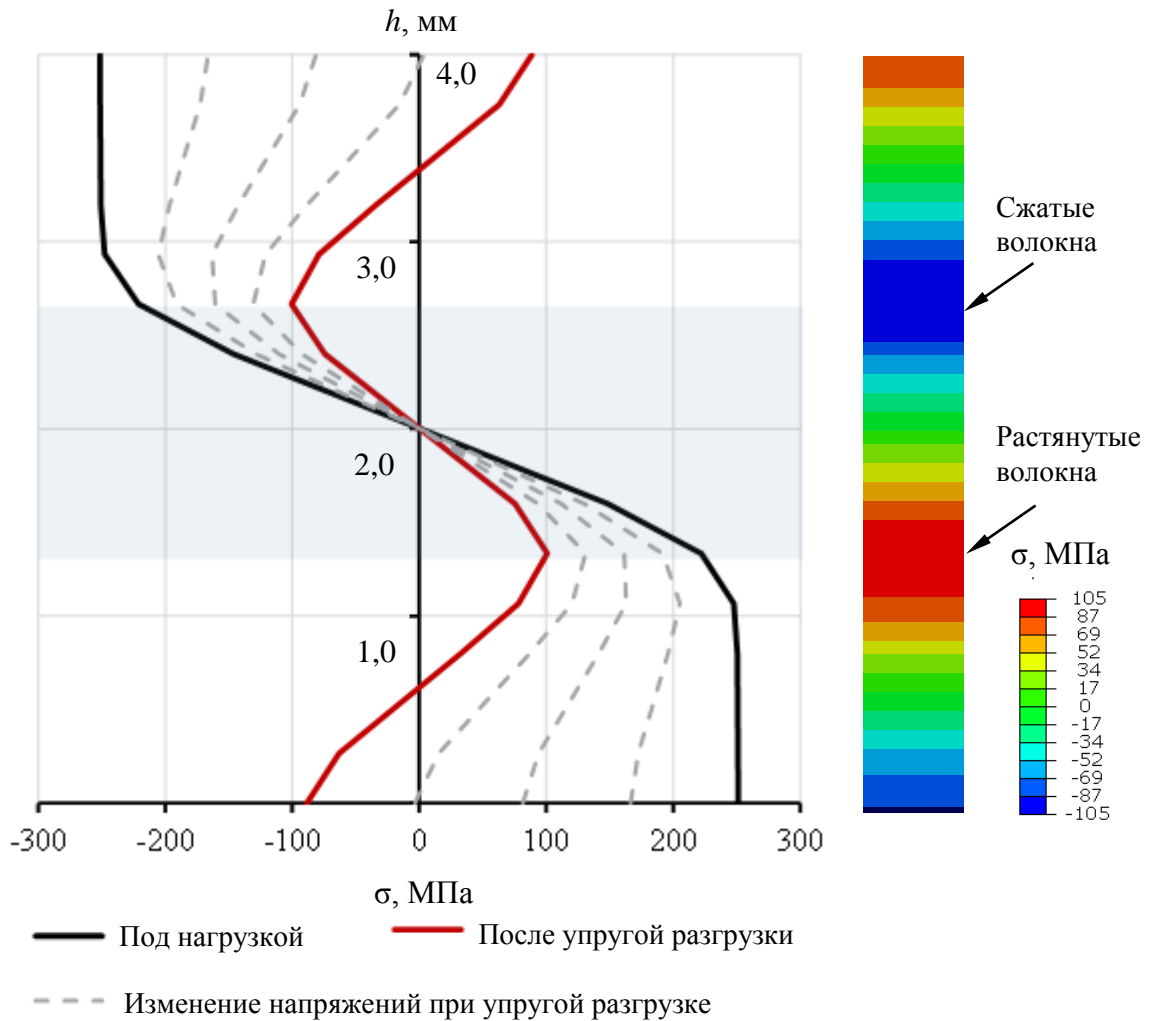


Рисунок 3.9 – Графики изменения напряжений по толщине полосы с фрагментом поля напряжений после упругой разгрузки

от поверхности, что соответствует зонам сжатых и растянутых волокон, показанных на рисунке 3.9. Именно наличие стесненной потенциальной энергии приводит к возникновению остаточных напряжений.

При удалении внешних сил накопленная потенциальная энергия расходуется на восстановление первоначального недеформированного состояния полосы. За счет этого в сжатых поверхностных волокнах верхней части возникают внутренние усилия, приводящие к их растяжению, а в нижних растянутых поверхностных волокнах, наоборот, к сжатию. Таким образом, после снятия нагрузки возникают остаточные растягивающие напряжения сверху и сжимающие напряжения снизу (рисунок 3.9), эти

напряжения уравниваются напряжениями, возникающими в остальной части сечения металла.

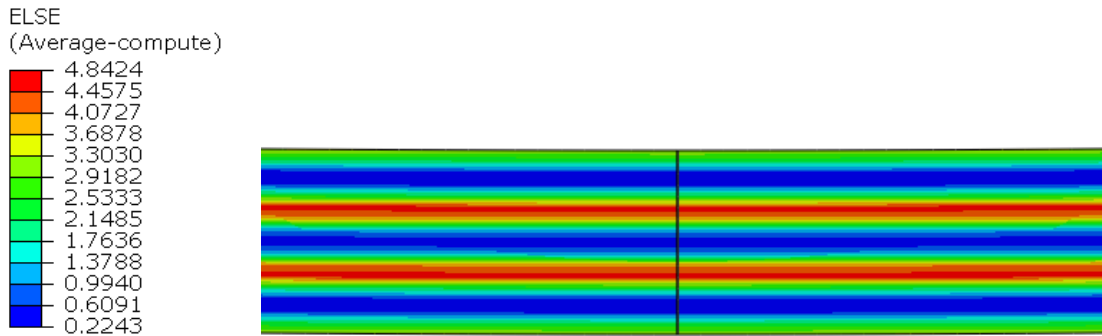


Рисунок 3.10 – Распределение потенциальной энергии по толщине полосы после разгрузки, мДж

По результатам моделирования был построен график изменения потенциальной энергии U , полученной суммированием всех значений по толщине полосы, в зависимости от времени процесса τ (рисунок 3.11). При движении вниз верхнего ролика за время, равное 1 с, произошло накопление потенциальной до 333 мДж, далее при разгрузке в течение 2 с в материале осталась накопленная потенциальная энергия, равная 34 мДж. Эта «стесненная» потенциальная энергия при дальнейшей обработке, например

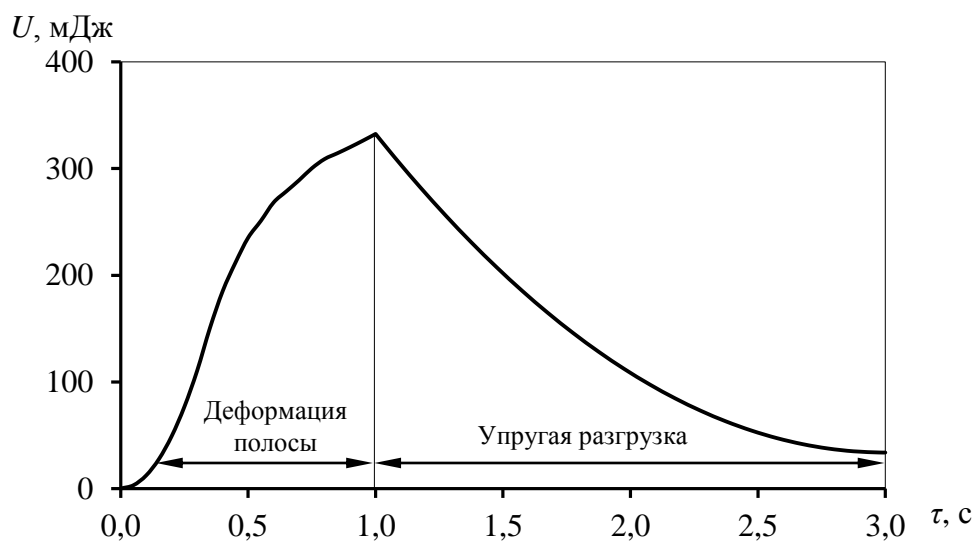


Рисунок 3.11 – Изменение потенциальной энергии в зависимости от времени процесса

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

Представленные результаты позволяют сделать вывод, что механизм возникновения остаточных напряжений при правке обусловлен неоднородностью распределения деформаций по толщине.

3.3.2 Разработка модели процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации в программном комплексе SIMULIA Abaqus

Моделирование упруго-пластического знакопеременного изгиба металла в системе SIMULIA Abaqus включает следующие этапы [92 – 94]:

- 1) настройка модели – создание конечно-элементной модели полосы, размещаемой между верхними и нижними роликами;
- 2) перемещение верхних роликов вниз в рабочее положение с обеспечением заданной величины перекрытия или зазора между верхними и нижними роликами;
- 3) приложение силы тяжести к системе при отсутствии движения роликов;
- 4) задание скорости вращения роликов для моделирования движения полосы за счет сил трения между ней и роликами;
- 5) оценка упругой разгрузки материала после правки.

Первый и третий этапы – динамические с заданием поступательного и вращательного движений роликов РПМ, а остальные – статические без задания движения роликов.

Рассматривалась правка горячекатаной полосы в 17-роликовой правильной машине (рисунок 3.1) с диаметрами роликов $D_p = 80$ мм и шагом роликов $t = 89$ мм для варианта перемещений верхних роликов $y_2 \dots y_{16}$, представленного в таблице 3.2. На рисунке 3.12 показана настройка конечно-элементной модели правки полосы. Принималась упруго-пластическая модель

полосы. В качестве материала полосы толщиной 3 мм были взяты стали S235MC и S355MC с кинематическими моделями упрочнения, описанными в п. 2.5. Также в расчете использовались следующие характеристики материала полосы: плотность $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$; модуль упругости 1-го рода $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$.

Таблица 3.2 – Параметры процесса правки полос толщиной 3 мм на 17-роликовой правильной машине

Марки стали	Перемещения роликов, мм								ν , М/с
	y_2	y_4	y_6	y_8	y_{10}	y_{12}	y_{14}	y_{16}	
S235MC и S355MC	6,0	5,57	5,14	4,71	4,29	3,86	3,43	3,0	1

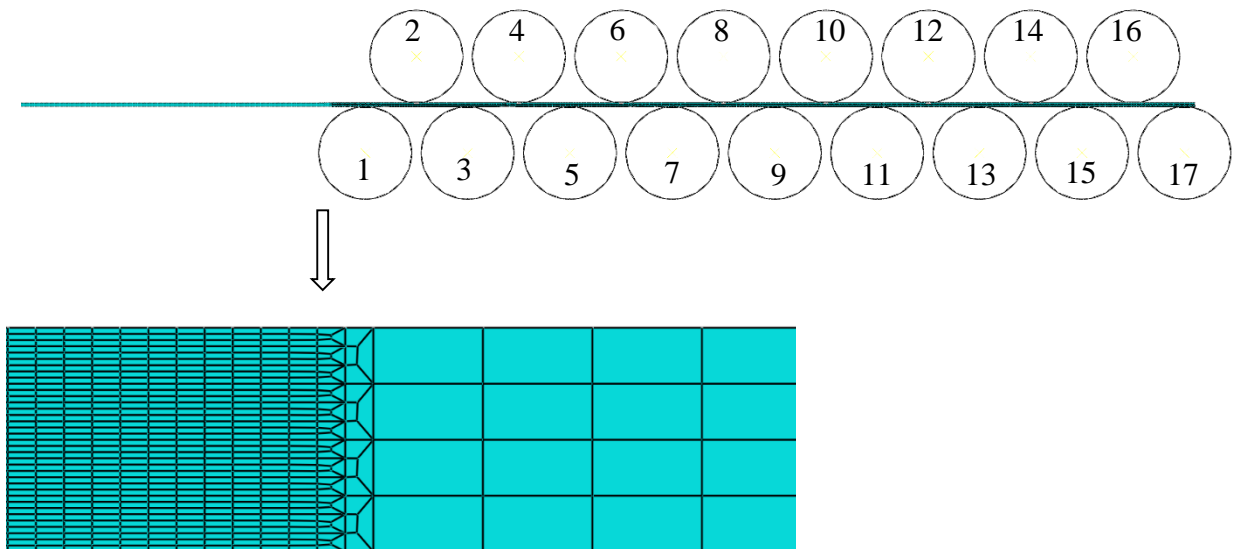


Рисунок 3.12 – Настройка модели

Для сокращения вычислительных затрат конечно-элементная модель полосы длиной 3000 мм имела участок с 36-ю элементами по толщине длиной 700 мм, располагаемый перед началом правки на входе в РПМ (рисунок 3.12), а на остальных участках модель полосы была сформирована из 4-х элементов по толщине. Тип элементов модели полосы – четырехузловой гексаэдрический элемент «CPE4R». Использование таких элементов позволяет, несмотря на двухмерную постановку задачи, учесть тензор напряжений по ширине полосы,

задав в этом направлении размер элемента, равным реальной ширине полосы – 1500 мм. В этом случае учитывается сила тяжести полосы. Каждый ролик был представлен жестким оболочным элементом «R2D2».

Для описания контактного взаимодействия между роликами и заготовкой использовались встроенные возможности системы SIMULIA Abaqus, позволяющие учитывать статический и динамический коэффициенты трения. При отсутствии касательных перемещений в контактной паре, что соответствует перемещению роликов вниз, используется статический коэффициент трения, равный 0,25, а после начала движения полосы – динамический, равный 0,12.

На рисунке 3.13 в качестве примера приведен фрагмент распределений напряжений по толщине горячекатаной полосы из стали S235MC при ее прохождении между тремя последними роликами на выходе из РПМ. Видно, что под последним верхним роликом № 16 верхние волокна сжимаются, а нижние – растягиваются. После выхода из правильной машины происходит упругая разгрузка, которая приводит к снижению и перераспределению внутренних напряжений. На рисунке 3.14 представлен фрагмент распределения напряжений по толщине полосы из стали марки S235MC после упругой разгрузки. Видно, что в сравнении с рисунком 3.13 изменяется не только характер распределения напряжений по толщине, но и значения напряжений, после упругой разгрузки они уменьшаются в 1,5 раза.

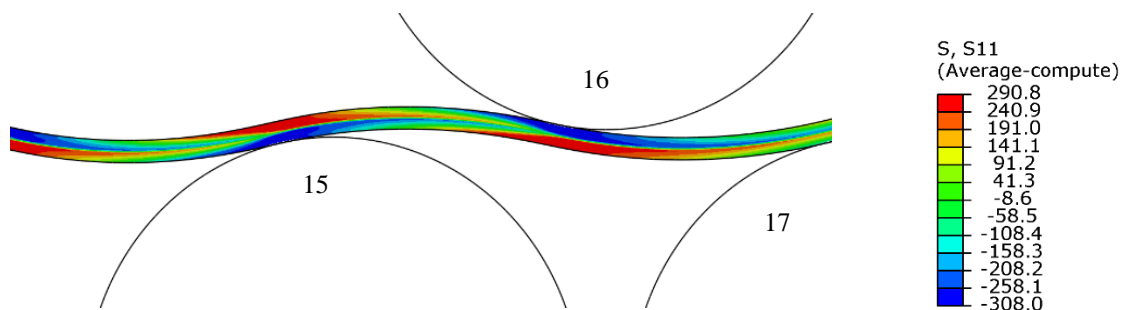


Рисунок 3.13 – Распределение напряжений в горячекатаной полосе из стали S235MC при правке по режиму, представленному в таблице 3.2

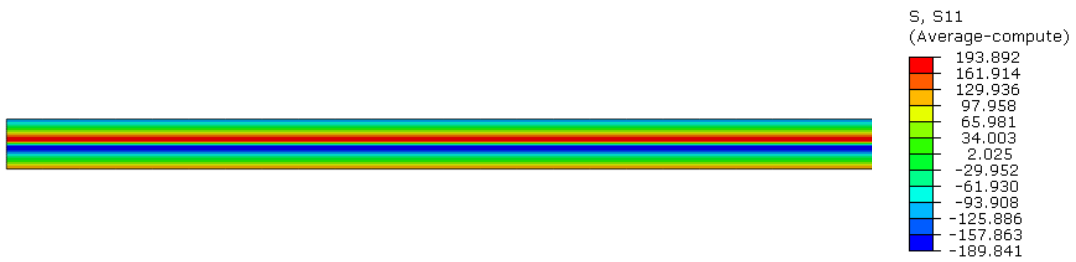


Рисунок 3.14 – Распределение напряжений по толщине полосы из стали S235MC после упругой разгрузки

Для сопоставления напряженного состояния полос из сталей различной категории прочности (S235MC и S355MC) были построены графики распределений напряжений в поперечном сечении полосы на выходе из РПМ под роликом № 16 (рисунок 3.15) и после упругой разгрузки (рисунок 3.16).

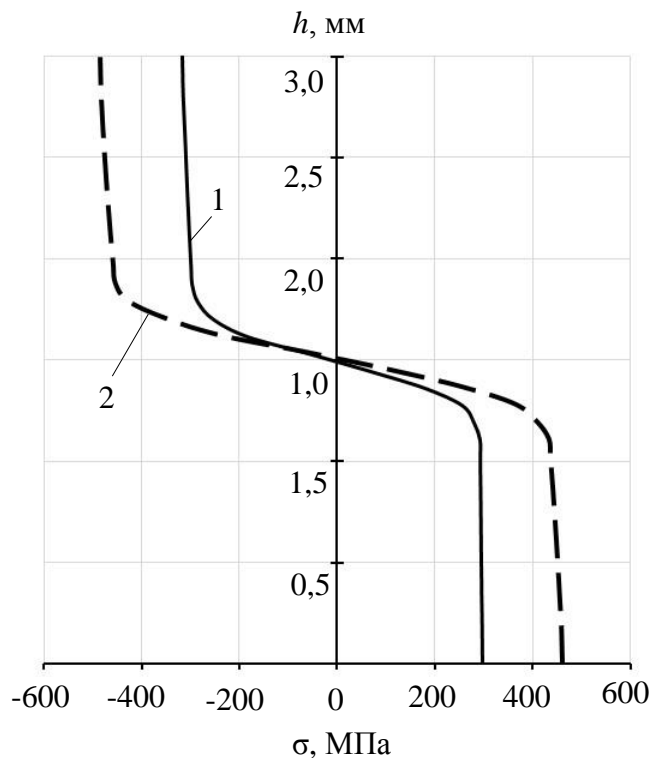


Рисунок 3.15 – Распределения напряжений по толщине полосы из сталей:
1 – S235MC; 2 – S355MC под роликом № 16

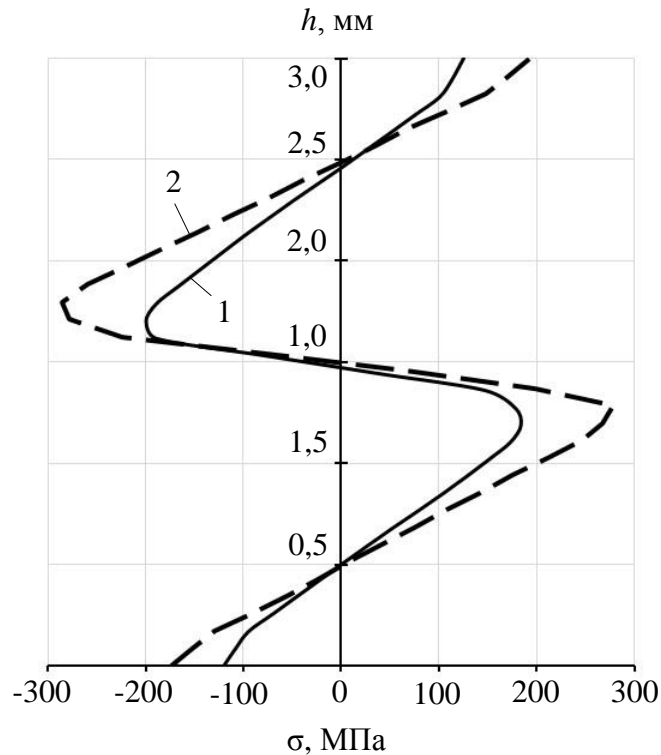


Рисунок 3.16 – Распределения напряжений по толщине полосы из сталей:
1 – S235MC; 2 – S355MC после упругой разгрузки

Видно, что под роликом № 16 в середине полосы на высоте от 1,3 мм до 1,7 мм от поверхности имеется участок с упругой деформацией. Напряжения в оставшейся части полосы выше предела текучести, т.е. материал деформируется в упруго-пластической области. Максимальное отклонение напряжений ± 300 МПа при правке полосы из стали S235MC и ± 480 МПа при правке из стали S355MC.

После упругой разгрузки характер распределения напряжений по толщине становится более сложным – верхние волокна полосы растягиваются, а волокна, расположенные на высоте от 0,5 мм до 1,5 мм от поверхности, – сжимаются и, наоборот, нижние волокна сжимаются, а далее – на высоте от 0,5 мм до 1,5 мм от нижней поверхности – растягиваются. В середине толщины полосы также происходит смена знака напряжений. При этом максимальные отклонения напряжений наблюдаются в слоях, располагающихся на высоте от 1,1 до 1,4 мм от поверхности – чуть выше и в самой зоне упругих деформаций,

отмечаемых на рисунке 3.14, и составляют от -189 МПа до +184 МПа в полосе из стали S235MC, от +279 МПа до -285 МПа – из стали S355MC. Сравнивая эти значения с напряжениями на верхних и нижних волокнах, которые равны соответственно 125 МПа и -120 МПа в прокате из стали S235MC, а из стали S355MC – 192 МПа и -174 МПа, можно констатировать недостаточный уровень высвобождения напряжений и сохранение в середине толщины горячекатаного проката высокого уровня напряжений.

С целью оценки уровня пластификации полосы в процессе правки были построены графики изменения продольной пластической деформации ε (рисунок 3.17). Оба графика иллюстрируют изменение деформации верхней

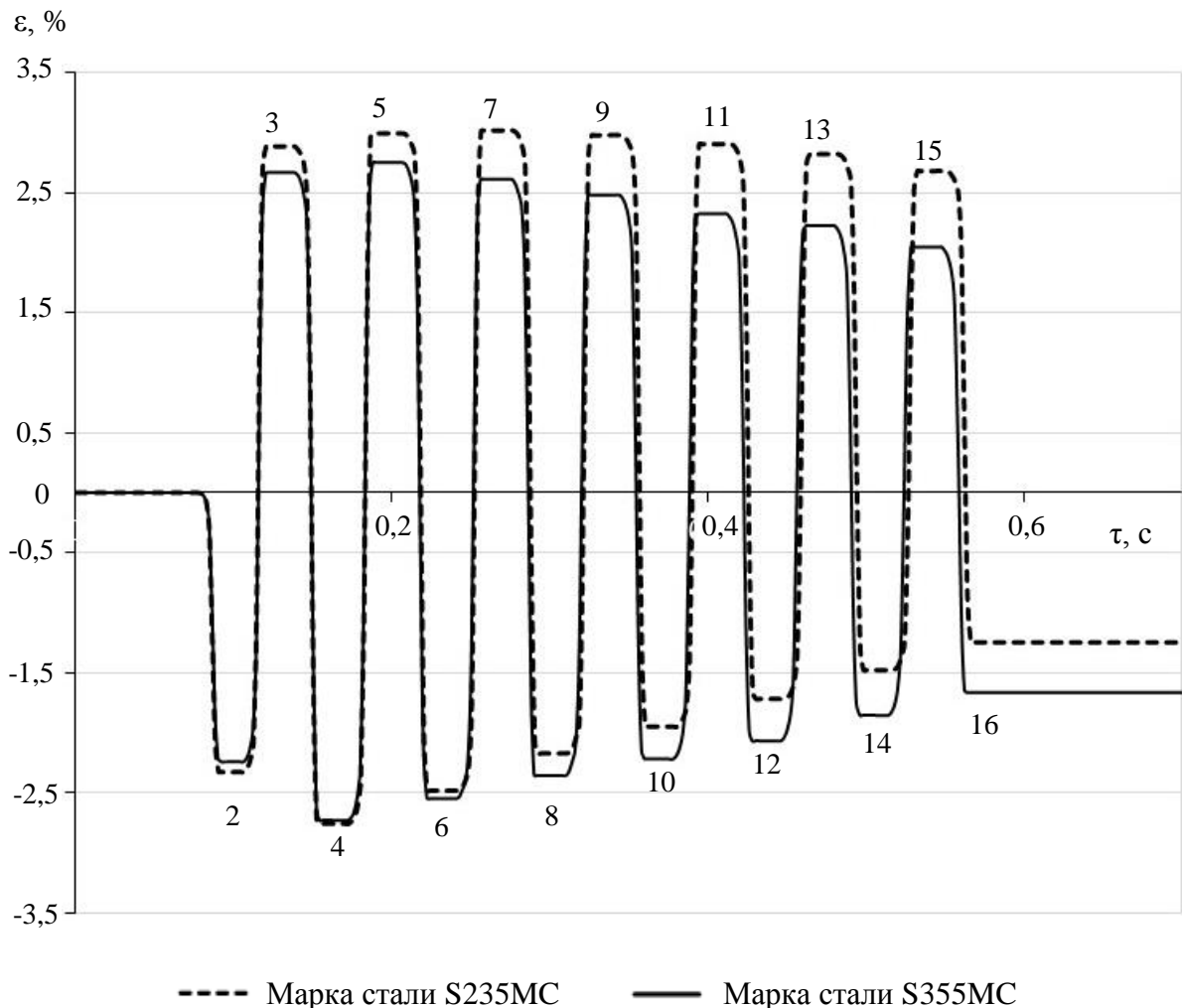


Рисунок 3.17 – Относительные продольные пластические деформации верхнего поверхностного волокна при правке

точки на поверхности полосы из сталей S235MC и S355MC за время правки τ . Поскольку верхние волокна полосы испытывают сжимающие напряжения в контакте с верхними роликами, то им соответствуют отрицательные пиковые значения пластических продольных деформаций, а в контакте с нижними роликами верхние волокна полосы испытывают растягивающие напряжения, то в этом случае им соответствуют положительные пиковые значения продольных деформаций. Цифрами от 2 до 16 обозначены контакты с роликами. Крайние нижние ролики № 1 и № 17 не оказывают влияния на деформации.

Из графиков видно, что максимальные деформации при правке полосы из марки стали S235MC отмечаются в контактах с роликами № 5 и № 7 и составляют 3,02 %, а при правке полосы из стали марки S355MC – в контакте с роликом № 5 – 2,75 %. Уровень пластификации в этом случае было решено определять по формуле [95]:

$$k_{plastic} = \left(1 - \frac{\varepsilon_{0,2}}{\varepsilon_{max}}\right) \cdot 100 \% , \quad (3.8)$$

где $\varepsilon_{0,2}$ – относительная деформация, соответствующая условному пределу текучести материала полосы; ε_{max} – максимальная относительная деформация полосы при правке. Тогда при правке полосы из марки стали S235MC по режиму из таблицы 3.2 уровень пластификации в начале процесса составил 93,4 %, а полосы из марки стали S355MC – 92,7 %. При правке в последующих роликах, начиная с ролика № 8, наблюдается уменьшение деформации полосы. При этом в контакте с роликом № 16 деформирование верхних волокон составляет 1,24 % и 1,67 % соответственно для сталей S235MC и S355MC. Полученные результаты совместно с анализом графиков рисунков 3.15 и 3.16 позволяют сделать вывод, что режим правки таблицы 3.2, несмотря на высокую пластификацию полосы в начале, не обеспечивает плавного уменьшения деформации полосы в остальных роликах и не приводит деформацию в контакте с роликом № 16 близкой к нулю, а значит и не снижает уровень напряжений по толщине полосы после правки.

Для оценки потенциальной энергии, накопленной при правке, были построены графики ее изменения в зависимости от времени процесса (рисунок 3.18). Цифрами от 2 до 16 обозначены контакты с роликами. В контакте с роликами наблюдается рост потенциальной энергии, а при выходе полосы из контакта с роликами – ее уменьшение. С ростом прочности полосы при одних и тех же параметрах правки потенциальная энергия возрастает, значения ее остаются больше и во время прохождения полосы между роликами. Из графика видно, что после правки в прокате из марки стали S235MC осталась накопленная потенциальная энергия 0,29 Дж, а из стали S355MC – в 1,8 раза больше – 0,52 Дж. Эта оставшаяся потенциальная энергия может высвободиться при последующей обработке листа.

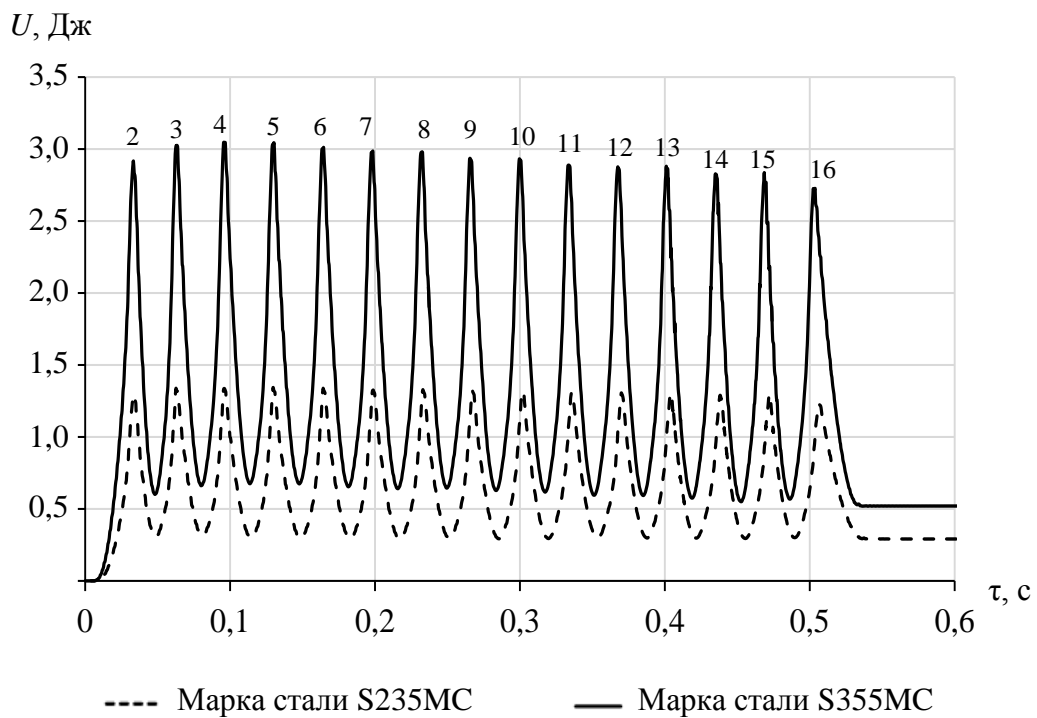


Рисунок 3.18 – Потенциальная энергия при правке

На основе разработанной модели процесса правки также можно определять геометрические и энергосиловые параметры процесса. В качестве примера на рисунке 3.19 представлен прогиб полосы из марки стали S235MC при правке с измеренными значениями радиусов кривизны нейтральной линии

полосы $R_{\text{крив}}$ под роликами, а на рисунке 3.20 показано изменение кривизны нейтральной линии полосы $\rho = 1/R_{\text{крив}}$. Точки локальных экстремумов кривизны на рисунке 3.20 соответствуют точкам касания полосы с роликами. Видно, что режим правки сводит кривизну полосы на выходе практически к нулю, а значит обеспечивается высокая плоскостность полосы. Кроме того, установлено, что правка полос разных категорий прочности при одних и тех же технологических параметрах не приводит к изменению значений радиуса кривизны нейтральной линии полосы.

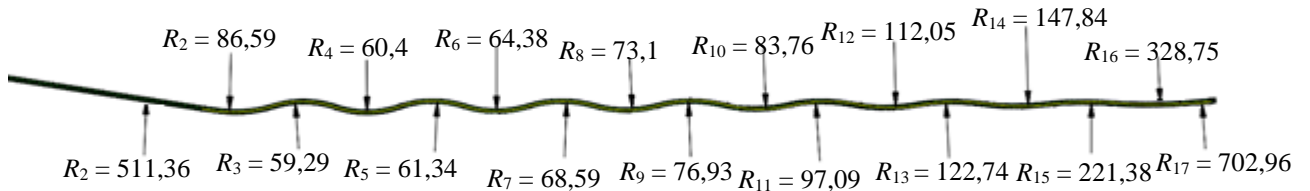


Рисунок 3.19 – Прогиб полосы при правке в 17-роликовой правильной машине с измеренными значениями радиусов кривизны нейтральной линии полосы, мм

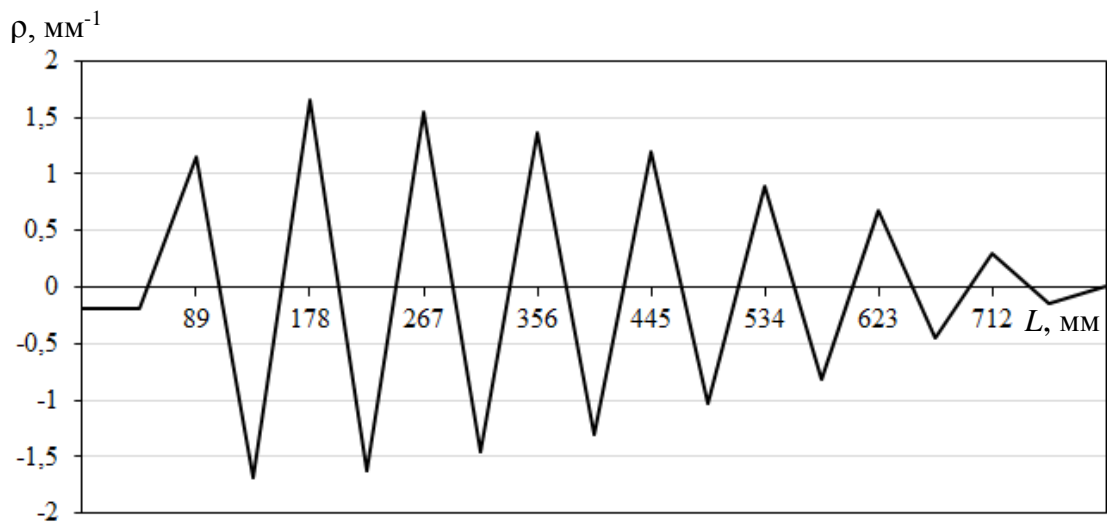


Рисунок 3.20 – Кривизна полосы при правке в 17-роликовой правильной машине

В таблице 3.3 приведены значения усилий и моментов, действующих на ролики при правке полос из сталей S235MC и S355MC по режиму, представленному в таблице 3.2. Из расчетных данных следует, что при правке полос толщиной $h = 3$ мм из стали S355MC возрастают энергосиловые параметры в среднем в 1,5 раза в сравнении с процессом правки полосы из стали S235MC.

Таблица 3.3 – Деформационные и энергосиловые параметры процесса правки полос из сталей S235MC и S355MC на 17-роликовой правильной машине

Параметр	Номер ролика																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Марка стали S235MC																	
P , кН	47.7	100.9	110.3	106.4	106.2	105.7	105.5	103.7	104.3	104	103.9	103.7	103	101.6	97.8	90.9	44.5
M , Н·м	73.4	155.2	177.6	240.6	240.3	239.5	243.5	236.5	222.0	214.7	196.7	174.9	160.8	157.5	150.5	125.2	102.7
Марка стали S355MC																	
P , кН	36.5	156.8	179.5	168.8	167.7	166.6	165.5	162.2	162.6	162.1	159.7	158.0	155.4	154.2	146.3	126.1	64.59
M , Н·м	66.4	285.1	326.4	306.9	304.9	302.9	300.9	294.9	295.6	294.7	290.4	287.3	282.5	280.4	266.0	229.3	117.4

3.3.3 Оценка адекватности модели процесса правки полосы

Адекватность модели 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 [95]. Рассматривался процесс правки полосы толщиной 1,5 мм из марки стали TRIP700 с пределом текучести 491 МПа и пределом прочности 800 МПа. Диаметры рабочих роликов 45 мм, шаг роликов 48 мм, перемещение первого верхнего ролика на входе РПМ составляло $y_2 = 2,6$ мм, на выходе – $y_{12} = 0,22$ мм.

В результате расчета на основе кинематической модели материала получены максимальные значения продольных деформаций $\varepsilon_{\max} = 1,319$ % и уровня пластификации полосы $k_{plastic} = 82,56$ %. В результате эксперимента на лабораторной 13-роликовой правильной машине значения этих показателей

составили – $\varepsilon_{\max} = 1,271 \%$ и $k_{plastic} = 81,57 \%$. А значит погрешность расчета уровня пластификации полосы не превышает 1,2 %.

По результатам моделирования был построен график 1 изменения усилий, действующих на ролики в процессе правки (рисунок 3.21). Сравнение его с графиком 2, полученным в работе [95] при правке полосы в 13-роликовой машине, показывает, что среднее значение погрешности расчета не превышает 10 %. Также на рисунке 3.21 приведен график 3, полученный при моделировании процесса правки в системе Abaqus с изотропной моделью материала. Видно, что в этом случае не происходит снижения усилия на ролики в процессе правки из-за упрочнения материала, последним

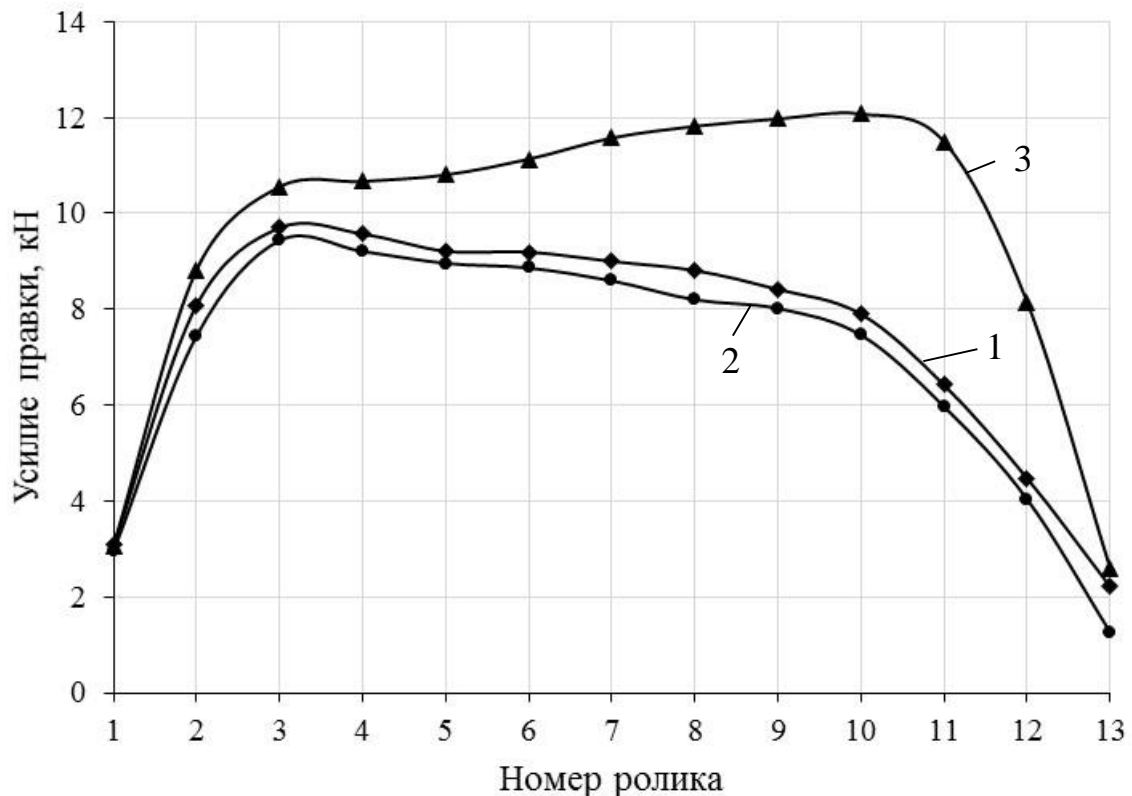


Рисунок 3.21 – Результаты изменения усилия правки, полученные:
 1 – при моделировании с кинематической моделью материала полосы;
 2 – в лабораторном эксперименте; 3 – при моделировании с изотропной моделью материала полосы

объясняется и рост рассчитанных значений продольных деформаций и уровня пластификации полосы – $\varepsilon_{\max} = 1,568 \%$ и $k_{plastic} = 85,33 \%$.

Исходя из полученных результатов, был сделан вывод, что разработанная конечно-элементная модель с кинематическим упрочнением материала, учитывающим эффект Баушингера, с достаточной точностью определяет напряженно-деформированное состояние полосы при правке и может быть использована для исследования и усовершенствования процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации.

3.4 Экспериментальное исследование влияния параметров правки на отклонение листов после плазменной и лазерной резки

Для изучения влияния параметров процесса правки на изгиб листов после плазменной и лазерной 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 АПР-3 ПАО «Северсталь», а также отбор листов и их порезку на машине плазменной резки SatroniK LS3000 и установке лазерной резки BYSPRINT 3015.

С учетом особенностей 15-роликовой машины LDM были выбраны четыре режима правки таблицы 3.4. Варианты № 1 – 3 отличаются величиной наклона верхней кассеты роликов $\Delta = y_2 - y_{14}$ (рисунок 3.22), Δ изменяется от 1 мм до 3 мм, вариант № 4 – режим без наклона верхней кассеты с одинаковым перекрытием всех роликов, равным 3 мм.

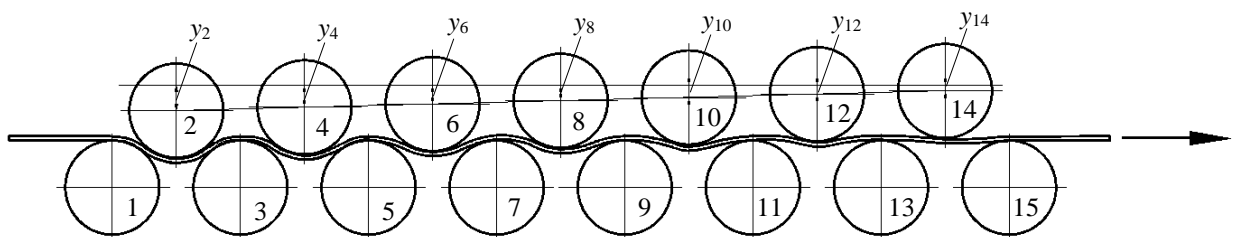


Рисунок 3.22 – Схема перемещения верхних роликов при правке в 15-роликовой РПМ

Первоначально для этих режимов было выполнено моделирование процесса правки согласно этапам, описанным в п. 3.3. В качестве примера на рисунке 3.23 показан график распределения напряжений по толщине после правки полосы с упругой разгрузкой материала по варианту № 1. Точки № 1 – № 4 на графике соответствуют экстремальным отклонениям напряжений по толщине.

Таблица 3.4 – Вертикальные перемещения верхних роликов и скорость правки для 4-х вариантов настройки РПМ

Номер варианта	Перемещения роликов, мм							$\Delta = y_2 - y_{14}$, мм	v, м/с
	y_2	y_4	y_6	y_8	y_{10}	y_{12}	y_{14}		
1	4,0	3,83	3,67	3,5	3,3	3,17	3,0	1	1,6
2	4,5	4,25	4,0	3,75	3,5	3,25	3,0	1,5	
3	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	3	
4	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	0	

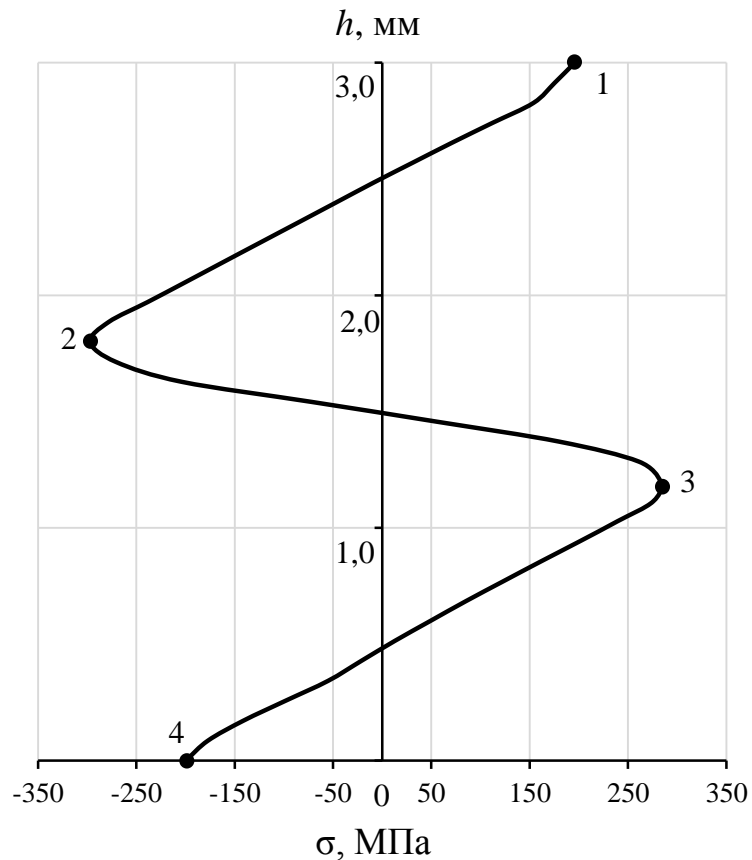


Рисунок 3.23 – График распределения остаточных напряжений по толщине полосы после правки по варианту № 1 таблицы 3.4

В таблице 3.5 для всех вариантов настроек РПМ представлены полученные в результате моделирования максимальные значения пластификации полосы при правке $k_{plastic}$, относительные деформации полосы в последнем треугольнике роликов $\epsilon_{\text{выход РПМ}}$, значения напряжений в точках № 1 – № 4, а также значения накопленной потенциальной энергии U в металле после правки.

Таблица 3.5 – Полученные при моделировании показатели правки

№ варианта	$k_{plastic}$, %	Напряжения, МПа				$\epsilon_{\text{выход РПМ}}$, %	U , мДж
		№ точки					
		1	2	3	4		
1	84,4	-200	+283	-294	+195	0,802	341,1
2	85,5	-200	+293	-297	+191	0,74	324,44
3	87,6	-189	+273	-284	+184	0,661	208,93
4	84,2	-200	+284	-305	196	0,959	342,3

Получено, что все режимы правки характеризуются значительным отклонением остаточных напряжений по толщине (максимальные напряжения от 280 МПа и выше) и недостаточным уровнем пластификации (менее 90 %). При этом варианту № 3 соответствуют лучшие показатели правки – наибольшая величина пластификации полосы $k_{plastic}$ и наименьшие значения деформации под последним верхним роликом $\epsilon_{\text{выход РПМ}}$ и накопленной потенциальной энергии U в сравнении с другими режимами. Худшие результаты у варианта № 4.

В промышленном эксперименте было отобрано восемь листов размерами 3x1500x3000 мм по четыре на каждый вид резки, номер листа совпадал с номером варианта. Отклонения полосок от плоскостности после резки листов определялись согласно методике, изложенной в п. 2.4. Сначала измерялась неплоскостность полосок длиной $L_{\text{п}} = 3000$ мм. Далее после обрезки полосок с торцов длина их составляла $L_{\text{п}} = 2000$ мм. Результаты измерений неплоскостности полосок после плазменной резки листов № 1 – № 4

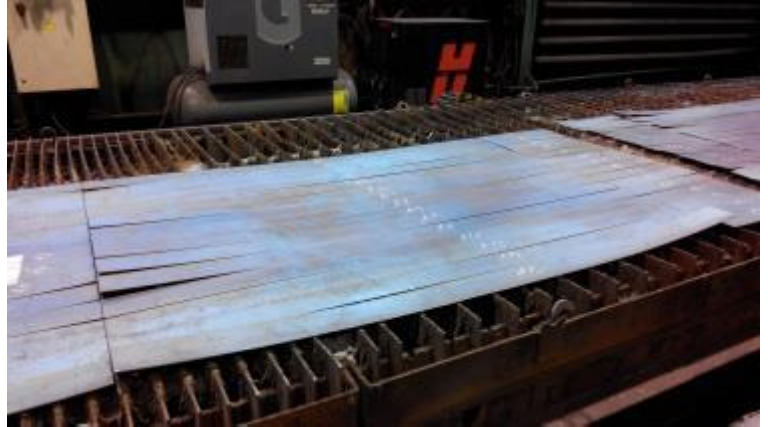
представлены в таблице 3.6, а на рисунке 3.24 приведены фотографии листов после их раскроя.

Результаты измерений показали, что число полосок, имеющих отклонения более 5 мм, после плазменной резки составило: 9 – у листа № 1 (максимальное отклонение было зафиксировано равным 45 мм); 8 – у листа № 2 (максимальное отклонение – 40 мм); 1 краевая полоска с отклонением 35 мм у листа № 3. У листа № 4 из-за сильного изгиба полосок нельзя было отрезать с торцов по 500 мм, поэтому они были разрезаны пополам, но в силу очевидной чрезмерной кривизны полосок измерения не проводились. Концы всех полосок с величиной изгиба более 5 мм были отклонены вверх, исключение составили две полоски листа № 2 ($2V_2$ и $2V_3$), концы которых были отклонены вниз.

Таблица 3.6 – Результаты измерений неплоскостности полосок после плазменной резки листов

Лист № 1			Лист № 2			Лист № 3			Лист № 4	
Номер полоски	Значение изгиба, мм		Номер полоски	Значение изгиба, мм		Номер полоски	Значение изгиба, мм		Номер полоски	Значение изгиба, мм
	$L_{п, мм}$			$L_{п, мм}$			$L_{п, мм}$			$L_{п, мм}$
	3000	2000		3000	2000		3000	2000		3000
$1V_1$	0	0	$2V_1$	0	0	$3V_1$	25	35	$4V_1$	8
$1V_2$	0	12	$2V_2$	30	25	$3V_2$	0	0	$4V_2$	4
$1V_3$	5	30	$2V_3$	30	35	$3V_3$	0	0	$4V_3$	3
$1V_4$	0	5	$2V_4$	30	35	$3V_4$	0	0	$4V_4$	3
$1V_5$	0	0	$2V_5$	0	3	$3V_5$	0	0	$4V_5$	3
$1V_6$	10	10	$2V_6$	0	3	$3V_6$	0	3	$4V_6$	50
$1V_7$	10	5	$2V_7$	15	5	$3V_7$	0	5	$4V_7$	40
$1V_8$	20	25	$2V_8$	15	8	$3V_8$	5	5	$4V_8$	105
$1V_9$	15	25	$2V_9$	15	10	$3V_9$	0	3	$4V_9$	65
$1V_{10}$	15	25	$2V_{10}$	25	20	$3V_{10}$	5	3	$4V_{10}$	65
$1V_{11}$	0	10	$2V_{11}$	20	5	$3V_{11}$	0	0	$4V_{11}$	25
$1V_{12}$	0	3	$2V_{12}$	0	5	$3V_{12}$	0	0	$4V_{12}$	40
$1V_{13}$	0	5	$2V_{13}$	60	40	$3V_{13}$	0	0	$4V_{13}$	0
$1V_{14}$	15	3	$2V_{14}$	20	20	$3V_{14}$	0	0	$4V_{14}$	35
$1V_{15}$	15	45	$2V_{15}$	30	20	$3V_{15}$	0	3	$4V_{15}$	109

Лист № 1 (режим № 1)



Лист № 2 (режим № 2)



Лист № 3 (режим № 3)



Лист № 4 (режим № 4)



Рисунок 3.24 – Деформации полосок после плазменной резки листов

Результаты измерений изгиба полосок после лазерной резки листов № 1 – № 3 приведены в таблице 3.7. Резка листа № 4 из-за сильного изгиба полосок была прекращена досрочно для предотвращения повреждения машины. Чтобы оставить значение ширины полосок, равным 100 мм, их количество было уменьшено до 13 штук, поскольку при раскрое лазером должна сохраняться окантовка по периметру листа. После лазерной резки увеличилось число полосок, концы которых были отклонены вниз – это $1V_3$, $1V_{10}$, $1V_{11}$ и $2V_2$.

Таблица 3.7 – Результаты измерений неплоскостности полосок после лазерной резки листов

Лист № 1			Лист № 2			Лист № 3		
Номер полоски	Значение изгиба, мм		Номер полоски	Значение изгиба, мм		Номер полоски	Значение изгиба, мм	
	$L_{п, мм}$			$L_{п, мм}$			$L_{п, мм}$	
	3000	2000		3000	2000		3000	2000
$1V_1$	0	0	$2V_1$	0	0	$3V_1$	2	0
$1V_2$	5	0	$2V_2$	80	57	$3V_2$	0	0
$1V_3$	60	80	$2V_3$	7	15	$3V_3$	2	1
$1V_4$	0	0	$2V_4$	1	0	$3V_4$	0	0
$1V_5$	0	5	$2V_5$	1	0	$3V_5$	0	0
$1V_6$	4	7	$2V_6$	1	0	$3V_6$	3	0
$1V_7$	8	14	$2V_7$	12	3	$3V_7$	7	2
$1V_8$	9	10	$2V_8$	15	3	$3V_8$	3	0
$1V_9$	3,5	6	$2V_9$	10	0	$3V_9$	0	0
$1V_{10}$	14	3	$2V_{10}$	0	1	$3V_{10}$	0	0
$1V_{11}$	12	2	$2V_{11}$	8	3	$3V_{11}$	0	1
$1V_{12}$	3,5	2	$2V_{12}$	26	40	$3V_{12}$	3	7
$1V_{13}$	3	1	$2V_{13}$	38	5	$3V_{13}$	12	7

Результаты измерений после лазерной резки подтвердили выводы, сделанные после раскроя плазмой, как о влиянии отрезаемых торцевых участков, так и то, что у полосок, получаемых из листа № 3, незначительные отклонения от плоскостности, исключение составляет краевая полоска $2V_{13}$.

Анализ результатов, полученных после двух видов резки, позволяет сделать следующие выводы:

– режимы правки таблицы 3.4 15-роликовой машины LDM не обеспечивают получение листов, пригодных для высокотехнологичной обработки;

– наименьшие отклонения полосок от плоскостности после порезки имели листы, прошедшие правку по варианту № 3, что совпало с результатами моделирования – он отличался лучшими показателями правки;

– полоски, полученные после лазерной резки имеют меньшее отклонение от плоскостности, чем после раскроя плазмой, что можно объяснить меньшим тепловым воздействием, в том числе из-за возможности реза не по замкнутому контуру, а выборочно, в разных местах листа без потери производительности.

На основании полученных результатов был сделан вывод о пригодности разработанной модели правки в среде конечно-элементного анализа SIMULIA Abaqus для исследования напряженно-деформированного состояния горячекатаного проката и проектирования усовершенствованных режимов правки полос с обеспечением минимальных отклонений листов после их обработки лазером или плазмой.

Выводы по главе 3

1. Разработана математическая модель процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации, основанная на методе конечных элементов и отличающаяся от известных возможностью учета неоднородности напряженно-деформированного состояния проката.

2. Установлено, что механизм возникновения остаточных напряжений при правке обусловлен неоднородностью распределения деформаций по толщине.

3. Показано, что на основе разработанной модели правки можно всесторонне оценивать и исследовать процесс знакопеременного изгиба,

включая определение не только известных качественных показателей правки, таких как остаточные напряжения, уровень пластификации полосы, ее прогибы и радиусы кривизны, но и впервые введенных в работе показателей правки, включая изменения относительных пластических продольных деформаций при правке и накопленной потенциальной энергии.

4. Показано, что правка циклическим знакопеременным изгибом, устраняя неплоскостность, создает неравномерно распределенные по толщине и ширине полосы продольные напряжения. Чем больше переходы напряжений по толщине и чем больше их различия в разных сечениях по ширине, тем выше вероятность потери плоскости листов при лазерной и плазменной резке.

5. Моделированием установлено, что одинаковые параметры процесса правки полос разных категорий прочности приводят к разным значениям относительных продольных деформаций и накопленной потенциальной энергии, а также разным отклонениям напряжений по толщине. Расчетами показано, что при правке полос одного профиляразмера из марки стали S355MC энергосиловые параметры в среднем возрастают в 1,5 раза в сравнении с процессом правки полос из стали S235MC, при этом значения радиуса кривизны не изменяются.

6. Установлена адекватность получаемых в результате моделирования значений уровня пластификации и усилий правки стальных полос экспериментальным данным.

7. Экспериментально подтверждена сходимость результатов моделирования с данными измерений неплоскостности полосок, получаемых после раскрытия листов плазмой и лазером.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ГОРЯЧЕКАТАНЫХ ПОЛОС ПРИ ПРАВКЕ В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ

4.1 Исследование влияния процесса знакопеременного упруго- пластического изгиба стальных полос на неоднородность их напряженно-деформированного состояния

Для минимизации неоднородности распределения деформаций и напряжений по толщине металла в условиях циклической знакопеременной деформации требуют изучения два этапа правки полосы в роликовых правильных машинах. Первый этап связан с исследованием особенностей правки в первой половине РПМ, а второй – с особенностями правки в оставшихся роликах (рисунок 4.1).

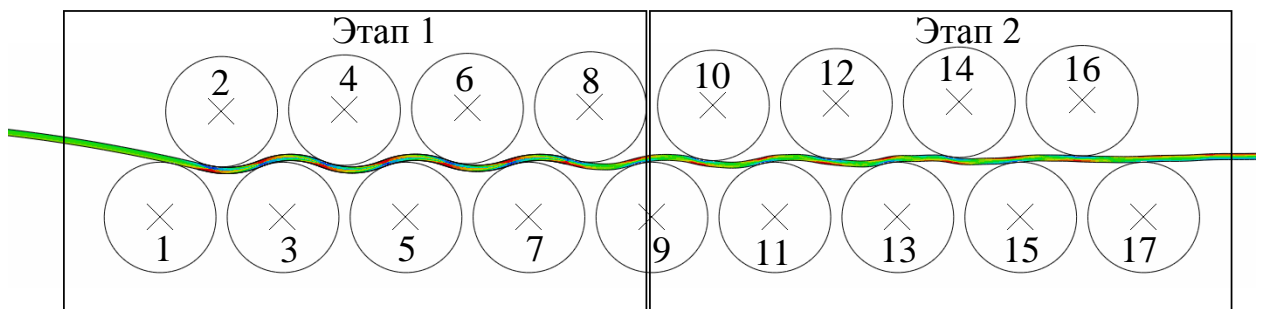


Рисунок 4.1 – Этапы правки полосы в РПМ

Первая фаза правки характеризуется высокими значениями перекрытий роликов, а значит наибольшей проработкой металла по толщине, приводящей к пластической деформации большинства слоев металла, но при этом в средней части по толщине полосы все равно остаются слои металла с упругой деформацией. Исходя из основной задачи, решаемой на первом этапе – устранение исходного неоднородного напряженного состояния материала полосы и дефектов неплоскостности – требуется достижение максимально возможной пластической деформации на этом этапе.

Из-за изгибов полосы на первом этапе возникает значительное отклонение напряжений по толщине полосы. Целью второго этапа правки является понижение градиента напряжений, сформированного на первом. Для этого необходимо плавное уменьшение деформации полосы путем изгиба в достаточном числе роликов.

Исследование влияния наклона верхней кассеты РПМ на уровень пластификации материала полосы на первом этапе процесса правки выполнено на основе разработанной математической модели в системе SIMULIA Abaqus. Рассматривались варианты наклона верхней кассеты Δ в 15-роликовой и 17-роликовой правильных машинах в диапазоне от 1,5 мм до 7 мм (таблицы 4.1 и 4.2) при правке полосы толщиной 3 мм из марки стали 3, также 09Г2С при скорости правки 1 м/с.

Таблица 4.1 – Значения перемещений роликов вниз в верхней кассете 15-роликовой машины

Номер режима	Перемещения роликов, мм							Δ , мм
	y_2	y_4	y_6	y_8	y_{10}	y_{12}	y_{14}	
1	1,50	1,25	1,00	0,75	0,50	0,25	0,00	1,5
2	3,00	2,50	2,00	1,50	1,00	0,50	0,00	3,0
3	5,00	4,17	3,33	2,50	1,67	0,83	0,00	5,0
4	7,00	5,83	4,67	3,50	2,33	1,17	0,00	7,0
5	3,50	3,25	3,00	2,75	2,50	2,25	2,00	1,5
6	5,00	4,50	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	3,0
7	7,00	6,17	5,33	4,50	3,67	2,83	2,00	5,0

Как видно из таблиц 4.1 и 4.2, режимы № 1 и № 5, № 2 и № 6, а также № 3 и № 7 характеризуются одинаковыми значениями наклона верхней кассеты Δ , но при этом в режимах № 5 – 7 больше значения перекрытий роликов.

Таблица 4.2 – Значения перемещений роликов вниз в верхней кассете 17-роликовой машины

Номер режима	Перемещения роликов, мм								Δ , мм
	y_2	y_4	y_6	y_8	y_{10}	y_{12}	y_{14}	y_{16}	
1	1,50	1,29	1,07	0,86	0,64	0,43	0,21	0,00	1,5
2	3,00	2,57	2,14	1,71	1,29	0,86	0,43	0,00	3,0
3	5,00	4,29	3,57	2,86	2,14	1,43	0,71	0,00	5,0
4	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	2,00	1,00	0,00	7,0
5	3,50	3,29	3,07	2,86	2,64	2,43	2,21	2,00	1,5
6	5,00	4,57	4,14	3,71	3,29	2,86	2,43	2,00	3,0
7	7,00	6,29	5,57	4,86	4,14	3,43	2,71	2,00	5,0

Результаты моделирования показали, что наибольшие деформации полоса получает, находясь в контакте с третьим рабочим роликом. Уровень пластификации, в зависимости от режима и марки стали представлен в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Уровень пластификации полосы

Номер режима	Уровень пластификации $k_{plastic}$, %			
	15-роликовая правильная машина		17-роликовая правильная машина	
	Сталь 3	09Г2С	Сталь 3	09Г2С
1	58,3	53,8	64,7	61,0
2	75,0	72,7	83,3	80,3
3	86,4	83,3	90,6	90,0
4	89,7	88,0	92,1	91,0
5	78,6	72,7	86,4	83,3
6	87,5	85,7	91,2	90,3
7	90,6	88,9	92,7	91,4

По данным таблицы 4.3 были построены графики, представленные на рисунке 4.2 и 4.3.

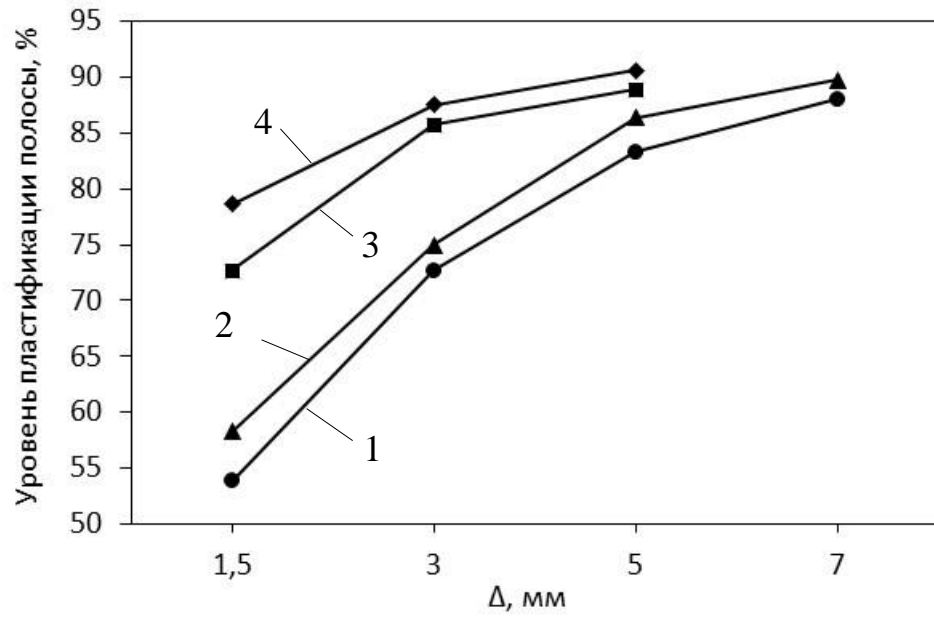


Рисунок 4.2 – Уровень пластификации полосы в 15-роликовой машине в зависимости от наклона верхней кассеты роликов: 1 и 2 – $y_{14} = 0$; 3 и 4 – $y_{14} = 2$ мм; 1 и 3 – марка стали 09Г2С; 2 и 4 – марка стали 3

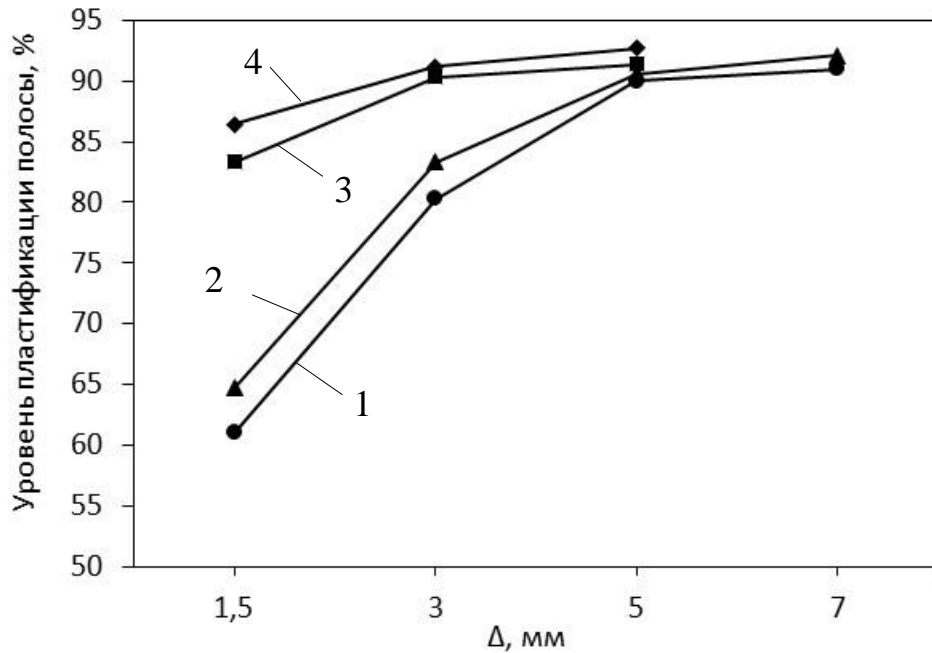


Рисунок 4.3 – Уровень пластификации полосы в 17-роликовой машине в зависимости от наклона верхней кассеты роликов: 1 и 2 – $y_{16} = 0$; 3 и 4 – $y_{16} = 2$ мм; 1 и 3 – марка стали 09Г2С; 2 и 4 – марка стали 3

Из таблицы 4.3 и графиков на рисунках 4.2 и 4.3 видно, 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 РПМ. 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 при правке полос из марок стали 09Г2С и стали 3. Увеличение значений перемещений роликов на 2 мм при одинаковых наклонах 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. Все это позволило сделать вывод о возможности поиска величины наклона верхней кассеты с обеспечением высокого уровня пластификации металла (90 % и выше) в начале процесса правки без значительного увеличения значений перекрытий роликов, являющихся ограничением по мощности привода правильных машин.

Изучение закономерностей изменения остаточных напряжений в горячекатаных листах на втором этапе правки в зависимости от перемещения верхнего последнего ролика РПМ при одинаковых перемещениях первого верхнего ролика ($y_2 = \text{const}$) выполнено на основе моделирования знакопеременного деформирования в 17-роликовой правильной машине (рисунок 3.1).

В таблице 4.4 приведены данные режимов правки полос толщиной $h = 3$ мм из марки стали 09Г2С. 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 мм до 2 мм, а значит и величины наклона верхней кассеты Δ – от 5,5 мм до 3,5 мм.

Таблица 4.4 – Значения перемещений роликов вниз в верхней кассете 17-роликовой машины

Номер режима	Перемещения роликов, мм								Δ , мм
	y_2	y_4	y_6	y_8	y_{10}	y_{12}	y_{14}	y_{16}	
1	5,5	4,71	3,93	3,14	2,36	1,57	-0,79	0	5,5
2		4,76	4,01	3,27	2,53	1,79	1,04	0,3	5,2
3		4,79	4,07	3,36	2,64	1,93	1,21	0,5	5,0
4		4,86	4,21	3,57	2,93	2,29	1,64	1,0	4,5
5		5,0	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	3,5

На рисунке 4.4 представлены результаты расчета остаточных напряжений по толщине проката после правки. Из графиков следует, что у режимов правки

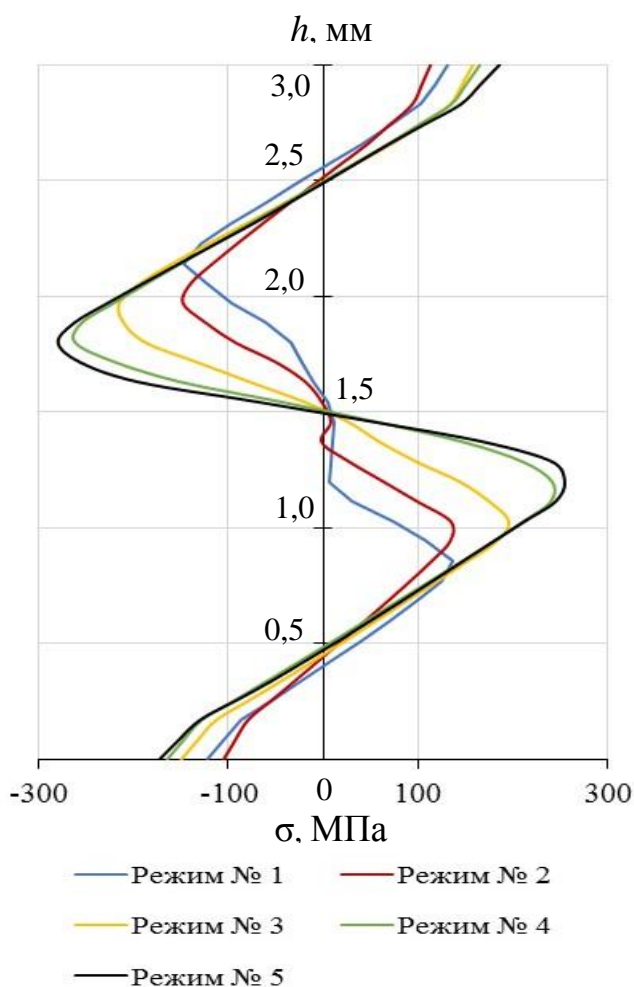


Рисунок 4.4 – Распределения остаточных напряжений по толщине полосы после правки по режимам таблицы 4.4

№ 1 и № 2 отклонения напряжений по толщине составляют 146 МПа и 148 МПа соответственно. 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.

Также по результатам моделирования были построены графики изменения потенциальной энергии деформации в горячекатаной полосе U (рисунок 4.5) и графики изменения относительных продольных пластических

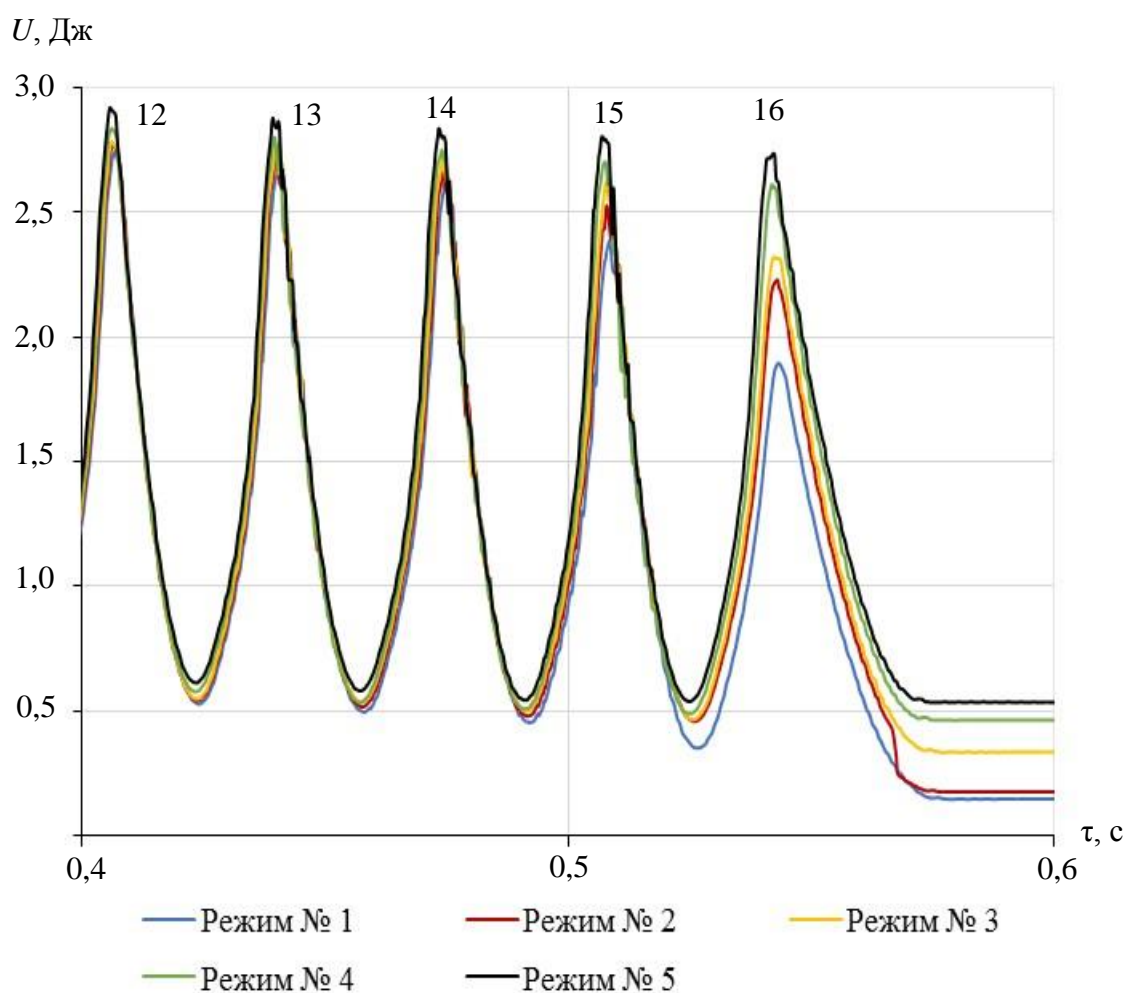


Рисунок 4.5 – Изменение потенциальной энергии деформации в горячекатаной полосе при ее прохождении через ролики № 12 – № 16 при правке по режимам таблицы 4.4

деформаций ε (рисунок 4.6) при правке по режимам № 1 – № 5 таблицы 4.4. На рисунке 4.5 представлены фрагменты полученных графиков на завершающей стадии деформирования в роликах № 12 – № 16. Цифрами от 12 до 16 обозначены контакты с роликами. Согласно данным рисунка 4.5, минимальные значения накопленной потенциальной энергии деформации после правки у режимов № 1 и № 2 составляют 0,15 Дж и 0,175 Дж соответственно, что значительно меньше в сравнении с результатами, полученными при правке по режимам № 3 – № 5.

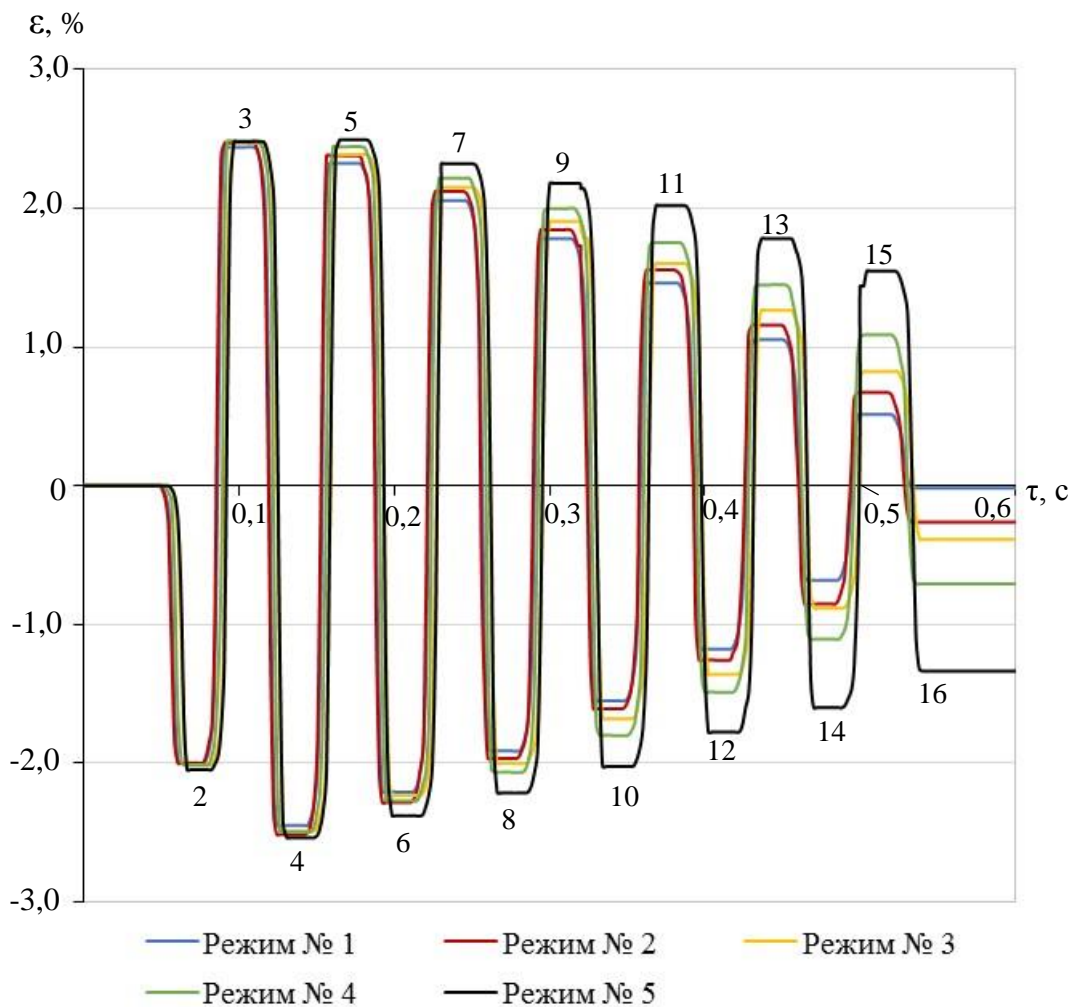


Рисунок 4.6 – Графики относительных продольных пластических деформаций верхнего поверхностного слоя полосы при правке по режимам таблицы 4.4

Из графиков рисунка 4.6 видно, что при правке по режиму № 1 отсутствует пластическое деформирование полосы под последним верхним роликом № 16, при правке по режиму № 2 пластическая деформация равна $\varepsilon = -0,3 \%$, по режиму № 3 – $\varepsilon = -0,4\%$, 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. При этом во всех вариантах максимальная пластификация полосы в начале правки под третьим роликом составляла 92 %.

На основании полученных результатов был сделан вывод, что в аспекте обеспечения постепенного и плавного уменьшения деформации полосы при ее изгибе в роликах (рисунок 4.6), следует минимизировать значение перекрытия в последних трех роликах. Однако необходимо учитывать особенности работы роликовых правильных машин. Так, практика работы РПМ в линиях АПР-3 и АПР-4 ЦОМ-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 с $y_{16} = 0,3$ мм на выходе.

Таким образом, выполненные исследования позволили дать оценку влияния режимов правки на неоднородность распределения деформаций на этапах правки, а также на уровень и распределение напряжений по толщине металла. При этом можно констатировать, что уменьшение значений таких показателей правки, как остаточные напряжения по толщине и накопленная потенциальная энергия деформации после правки, может быть достигнуто множеством вариантов из рекомендованных диапазонов перекрытий роликов с одновременным уровнем пластификации полосы в начале правки не менее 90 %, а значит требуется методика выбора оптимального режима правки, учитывающая все особенности формирования внутренних напряжений при

правке полос в условиях циклической знакопеременной деформации.

4.2 Исследование влияния исходной неплоскостности горячекатаных полос на показатели правки

Исследование выполнено при правке полосы с исходной неплоскостностью волна высотой 14 мм и длиной 200 мм. С целью использования разработанной модели процесса правки в 2D-постановке было решено условно разделить полосу на полоски по ширине, как предложено в ряде работ [45 – 47], и выполнить моделирование правки крайней полоски с дефектом и полоски в середине без дефекта, сравнив полученные результаты. В качестве режима правки были взяты настройки 17-роликовой РПМ из таблицы 3.2, материал полосы толщиной 3 мм из марки стали S235MC. В этом случае результаты, полученные в п. 3.3 при правке полосы из марки стали S235MC, можно было рассматривать как результаты правки полоски, взятой из середины и не имеющей дефекта неплоскостности. Настройка модели при правке краевой полоски с дефектом волна представлена на рисунке 4.8.

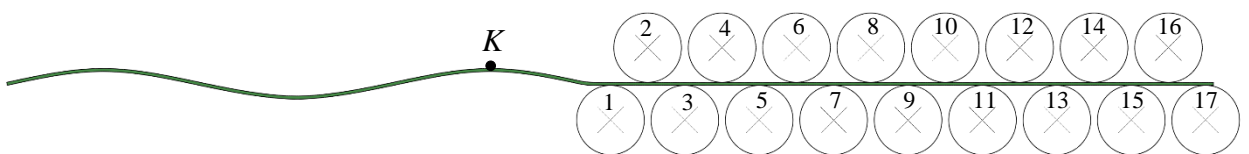


Рисунок 4.8 – Настройка модели при правке краевой полоски с дефектом волна

На рисунке 4.9 показаны графики изменения остаточных деформаций в процессе правки: *A* – график, полученный при правке полоски без дефекта неплоскостности, *B* – с дефектом волна. График *B* иллюстрируют изменение деформации верхней точки *K* на поверхности полосы, местоположение этой точки показано на рисунке 4.8. Для варианта с исходной неплоскостностью

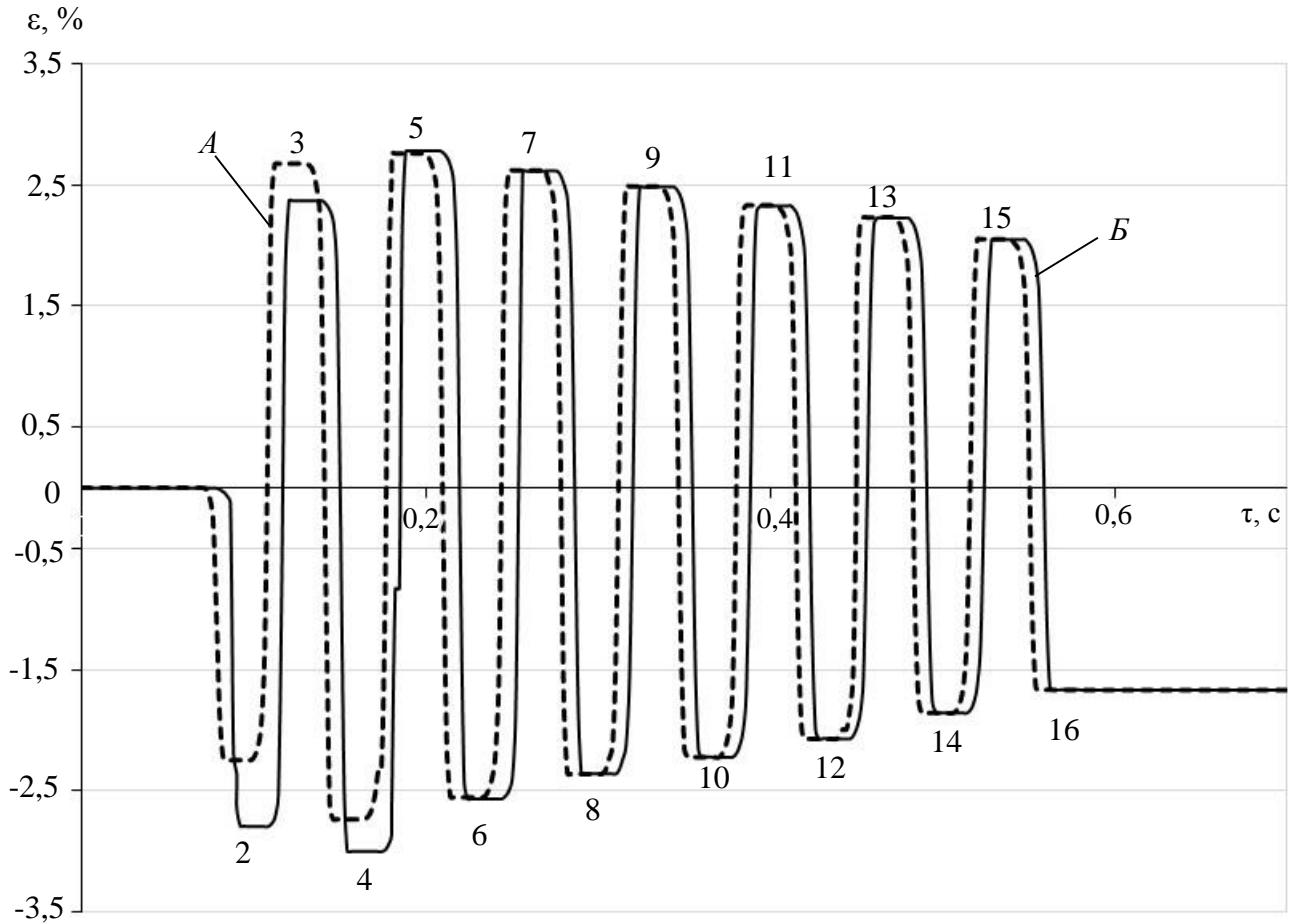


Рисунок 4.9 – Относительные продольные пластические деформации верхнего поверхностного волокна при правке полосы: *A* – без дефекта неплоскостность, *B* – с дефектом волна

волна (график *B*) наблюдается большее обжатие полосы в контакте роликами № 2 и № 4, но меньшее обжатие под роликом № 3, в контактах с роликами № 5 и № 6 происходит выравнивание деформаций, которое сохраняется дальше при правке в последующих роликах.

Анализ графиков остаточных напряжений (рисунки 4.10) показал, что из-за высокой пластификации полосы в начале процесса правки, исходная неплоскостность не оказывает существенного влияния на этот показатель правки.

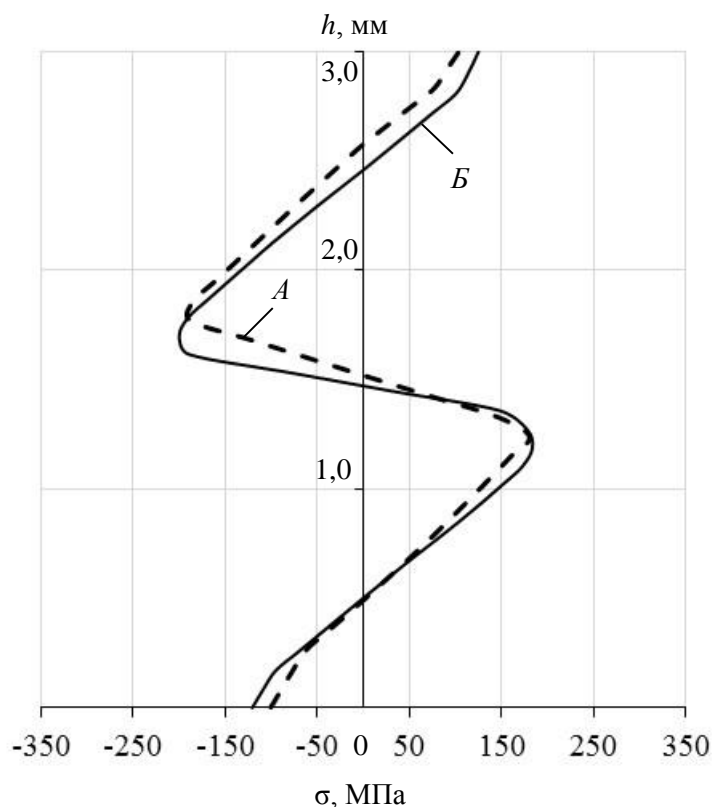


Рисунок 4.10 – Графики распределения напряжений по толщине полосы после правки: *A* – без дефекта неплоскостность, *B* – с дефектом волна

Закономерности распределения потенциальной энергии при правке полосы, не имеющей дефекта, наблюдаются и при знакопеременном упруго-пластическом деформировании полосы с неплоскостностью. В последнем случае накопленная потенциальная энергия составила 0,23 Дж. Аналогичные результаты были получены и при определении прогибов и радиусов кривизны полосы.

4.3 Исследование влияния конструктивных параметров РПМ на распределение напряжений по толщине полос и их деформацию

Для исследования влияния конструктивных параметров РПМ на основные показатели правки, определяющие характер деформаций металла при правке и распределения внутренних остаточных напряжений по толщине листа и, как следствие, отклонения получаемых деталей при раскрое листов

высокотехнологичными методами, было выполнено моделирование процесса правки полос в шести вариантах конструкции роликовых правильных машин (таблица 4.5), отличающихся диаметрами рабочих роликов (D), их шагом (t) и количеством (n).

Таблица 4.5 – 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

Первому варианту таблицы 4.5 соответствуют конструктивные параметры первой РПМ фирмы «LDM», установленной в линии поперечной резки АПР-4. Второй вариант – это 15- роликовая правильная машина фирмы «LDM» линии АПР-3. Четвертому варианту соответствует вторая РПМ фирмы «LDM», также установленная в линии АПР-4. Варианты № 3 – № 5 имеют одинаковые диаметры роликов и шаг, но отличаются числом роликов, что позволит оценить влияние числа роликов на результат правки. В варианте № 6, по сравнению с вариантом № 5, уменьшены диаметры роликов до 50 мм. Во всех вариантах $t = 1,1D$, что соответствует практике и рекомендациям, изложенным в литературе, посвященной машинам для правки листов.

Значения вертикальных перемещений рабочих роликов $y_2 \dots y_{14}$ (y_{16} или y_{18}) для каждого варианта приведены в таблице 4.6. Величина наклона верхней кассеты роликов Δ во всех вариантах одинаковая и составляет 5 мм. Толщина полосы $h = 4$ мм, марка стали S355MC, скорость правки $v = 1$ м/с.

Таблица 4.6 – Вертикальные перемещения верхних роликов
для 6-ти вариантов соотношений конструктивных параметров РПМ

Номер варианта	Перемещения роликов, мм								
	y_2	y_4	y_6	y_8	y_{10}	y_{12}	y_{14}	y_{16}	y_{18}
1	5,5	4,5	3,5	2,5	1,5	0,5	-	-	-
2, 3	5,5	4,67	3,83	3,0	2,17	1,33	0,5	-	-
4	5,5	4,79	4,07	3,36	2,64	1,93	1,21	0,5	-
5, 6	5,5	4,88	4,25	3,63	3,0	2,38	1,75	1,13	0,5

Анализ графиков распределения остаточных продольных напряжений по толщине металла после правки (рисунок 4.11) показывает, что максимальные напряжения в поверхностных верхних и нижних волокнах при правке по варианту № 1 в 13-роликовой машине с наибольшим диаметром роликов, а минимальные – в варианте № 5 при правке в 19-роликовой машине. Несмотря на чуть большие отклонения напряжений по толщине по сравнению с вариантом № 5 (~ 20 МПа), в варианте № 6 характер профиля напряжений более однородный – перепад остаточных напряжений сверху и снизу с напряжениями, возникающими в остальной части сечения металла, минимальный.

Увеличение числа роликов при неизменных диаметрах и шаге роликов позволяет существенно снизить отклонения остаточных напряжений как на поверхности, так и по толщине полосы, что подтверждает сравнение графиков вариантов № 3 – №5.

Результаты моделирования продольной пластической деформации ε , уровня пластификации $k_{plastic}$ и остаточной потенциальной энергии U с максимальными значениями отклонений напряжений по толщине σ_{max} представлены в таблице 4.7.

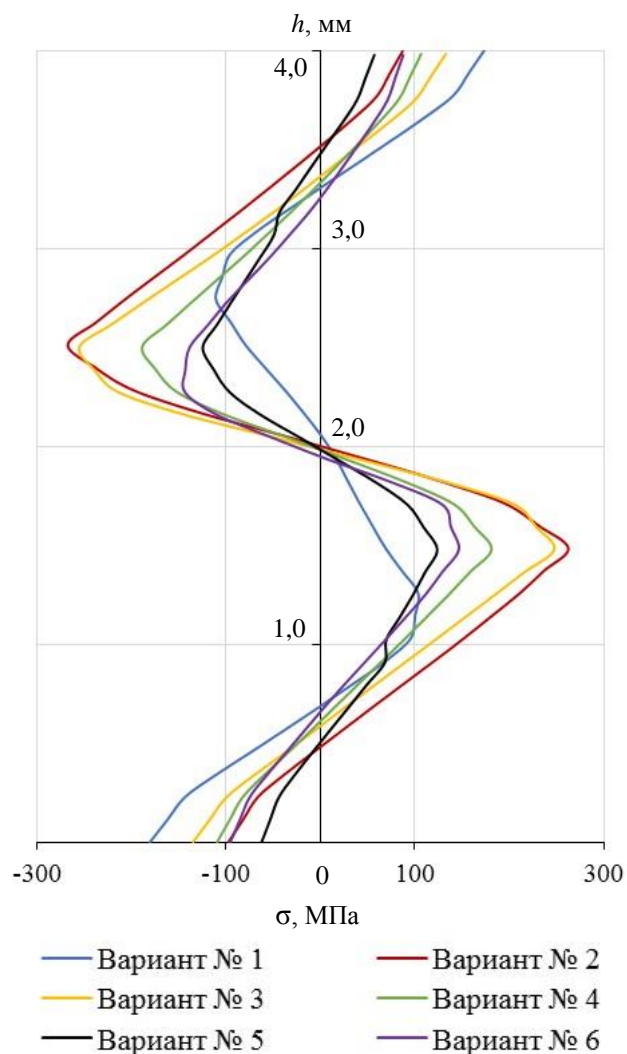


Рисунок 4.11 – Графики распределения остаточных продольных напряжений по толщине металла после правки в шести вариантах конструкции РПМ

Анализ результатов моделирования дает основание для следующих выводов:

1. Уменьшение диаметров роликов с сохранением соотношения между шагом и диаметром роликов, равным $t = 1,1D$, приводит к росту уровня пластификации полосы по толщине. Максимальная продольная пластическая деформация полосы ϵ_{\max} отмечается в варианте № 6 с наименьшим диаметром

роликов, равным 50 мм, пластификация в этом случае достигает значения $k_{plastic} = 95 \%$.

Таблица 4.7 – Показатели правки

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

2. Увеличение числа роликов без изменения диаметра и шага роликов при одном и том же наклоне верхней кассеты ведет к росту пластификации полосы, снижению перепада напряжений по толщине и остаточной потенциальной энергии в металле. Из трех вариантов № 3 – № 5 с одинаковыми конструктивными параметрами наилучшие результаты демонстрирует вариант № 5 с наибольшим числом роликов $n = 19$.

Кроме того, показатели правки, полученные для варианта конструкции РПМ № 6 с диаметром роликов 50 мм, могут быть улучшены в сравнении с вариантом № 5 путем использования режима с меньшим перекрытием роликов на входе.

На основании изложенных результатов моделирования рекомендуется для установки в линию АПР-3 машины с диаметром роликов 70 – 50 мм и их числом не менее 19. В этом случае можно снизить перепад напряжений по толщине и увеличить уровень пластификации при правке сортамента толщиной 3 – 4 мм. После правки на такой машине вероятность сохранения плоскостности листов при последующей обработке существенно повысится.

Выводы по главе 4

1. Впервые на основе математического моделирования процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации установлена взаимосвязь распределения остаточных напряжений по толщине проката от величины деформации при правке.

2. Установлены закономерности изменения показателей напряженно-деформированного состояния горячекатаных полос при правке в зависимости от технологических параметров процесса. Показано, что максимальный уровень пластических деформаций вначале правки с минимальным их уровнем на выходе обеспечивают уменьшение значений остаточных напряжений, потенциальной энергии в листах после правки и отклонений от плоскостности листов при высокотехнологичной резке.

3. Показано, что исходная неплоскостность полосы из-за высокого уровня пластификации на входе не оказывает существенного влияния на качественные показатели правки.

4. Установлено, что уменьшение диаметров роликов с сохранением соотношения между шагом и диаметром роликов, равным $t = 1,1D$, приводит к росту уровня пластификации полосы по толщине, а увеличение числа роликов без изменения диаметра и шага роликов при одном и том же наклоне верхней кассеты ведет к росту пластификации полосы, снижению перепада напряжений по толщине и остаточной потенциальной энергии в металле.

5. Даны практические рекомендации по установке в линию агрегата поперечной резки ПАО «Северсталь» машины с диаметром роликов 70 – 50 мм и их числом не менее 19 для снижения перепада напряжений по толщине и увеличения уровня пластификации при правке сортамента толщиной 3 – 4 мм.

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА РЕЖИМА ПРАВКИ ГОРЯЧЕКАТАНЫХ ПОЛОС В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРАВКИ

5.1 Описание методики выбора режима правки

Исследование процесса правки на основе разработанной модели, основанной на методе конечных элементов, позволяет получить эффективные рекомендации для разработки технологии правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации. Однако разработка научно обоснованной методики выбора режима правки даст возможность определять настройки РПМ, устраняющие исходное неоднородное напряженное состояние горячекатаной полосы и дефекты неплоскостности с обеспечением минимального уровня остаточных напряжений в готовом прокате. Предлагаемая методика позволит с меньшими затратами времени и высокой точностью описать технологию правки, обеспечивающую получение проката, пригодного для лазерной резки.

Последовательность применения методики состоит в следующем (рисунок 5.1).

Этап 1. Анализ исходных данных – параметров роликовой правильной машины и требований к листовому горячекатаному прокату. Основными параметрами РПМ являются число роликов n , их диаметр D , шаг роликов t и скорость правки v , ограничениями могут быть диапазоны перекрытий роликов и значений показателей правки. Основными параметрами горячекатаного проката являются геометрические размеры, химический состав и механические свойства.

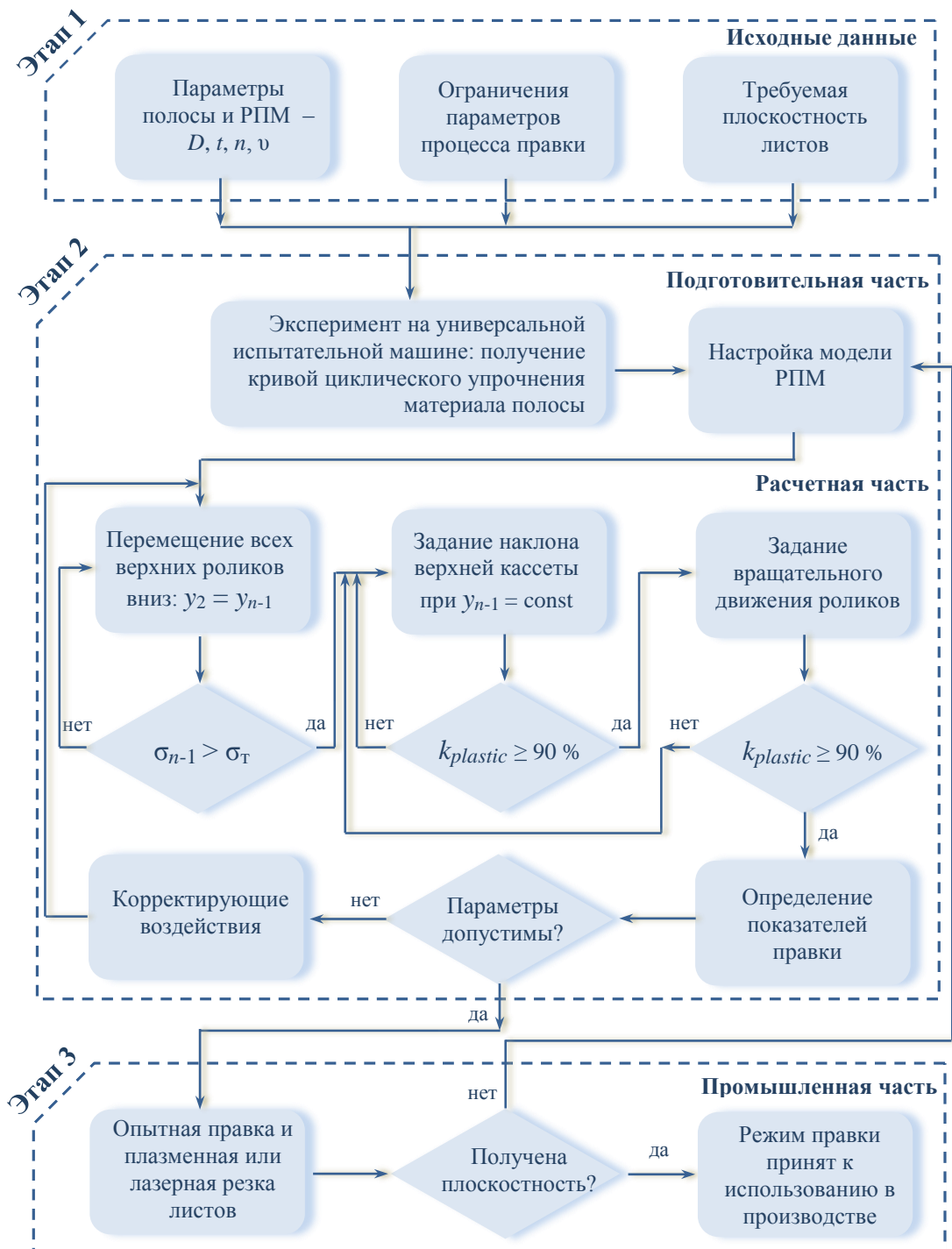


Рисунок 5.1 – Схема реализации методики выбора режима правки

Этап 2. Расчетная часть содержит определение поведения материала полоса в условиях циклической знакопеременной деформации на универсальной испытательной растяжной машине и моделирование в SIMULIA Abaqus, включая следующие стадии:

– Настройка модели РПМ с размещением полосы между верхними и нижними роликами.

– Перемещение всей верхней кассеты роликов вниз параллельно нижней кассете до появления в поверхностных слоях полосы под последним верхним роликом напряжений σ_{n-1} , превышающих предел текучести материала полосы. Многократное моделирование процесса правки показало, что верхняя кассета должна опускаться вниз на величину, не превышающую 15 % от толщины полосы.

– Задание наклона верхней кассеты при неподвижном последнем верхнем ролике ($y_{n-1} = \text{const}$). Вначале перемещения первого верхнего ролика кассеты y_2 рекомендуется задавать с шагом 1 мм. Тогда перемещение i -го ролика верхней кассеты при известных значениях перемещений y_2 и y_{n-1} определяется из уравнения:

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

где n_i – номер i -го ролика верхней кассеты РПМ; n – число роликов РПМ; t – шаг роликов.

Выбирается наклон верхней кассеты, обеспечивающий пластификацию материала полосы под роликом № 3, близкую к 90 %.

Уровень пластификации полосы рассчитывается по формуле (3.8).

– Задание вращательного движения роликов. При этом будет смещение контактов роликов и полосы, а значит и изменение уровня ее деформации. Если он будет недостаточным и пластификация материала полосы под роликом № 3 будет ниже 90 %, то потребуются корректировка величины наклона верхней кассеты, а значит возврат на предыдущую стадию, пока не будет получен режим, обеспечивающий нужную пластификацию.

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

5.2 Применение методики для усовершенствования процесса правки горячекатаных полос

5.2.1 Разработка режимов правки горячекатаных полос из марки стали S355

Получение горячекатаных листов с минимальным градиентом напряжений по толщине, а значит с минимальными отклонениями после дальнейшей высокотехнологичной обработки может быть достигнуто на основе применения предложенной методики выбора режима правки.

Рассматривалась правка полос в условиях АПР-3 и АПР-4 ПАО «Северсталь». Правке подвергались полосы из марки стали S355MC толщиной 4 мм на 17-роликовой правильной машине с диаметрами роликов 70 мм и шагом 77 мм, толщиной 8 мм на 15-роликовой правильной 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. Скорость правки составляла 1 м/с.

При определении режима правки полосы толщиной 4 мм было получено, что перемещение всей верхней кассеты роликов вниз параллельно нижней кассете на величину 0,4 мм привело к появлению напряжений в поверхностных слоях полосы под последним верхним роликом РПМ, превышающих предел текучести материала полосы (рисунок 5.2).

Далее в соответствии с методикой проводилась оценка влияния наклона верхней кассеты при неподвижном последнем верхнем ролике РПМ. При перемещении первого верхнего ролика вниз на 1 мм при $y_{16} = 0,4$ мм

отмечалась недостаточная пластификация полосы в начале правки –

$$k_{plastic} = \left(1 - \frac{0,2}{1,42}\right) \cdot 100 \% = 85,9 \% \text{ (рисунок 5.3).}$$

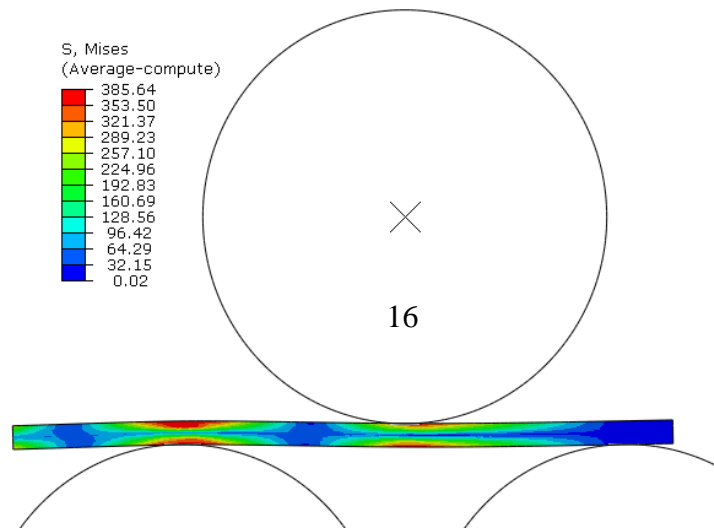


Рисунок 5.2 – Распределение продольных напряжений по толщине полосы под последним роликом № 16 РПМ

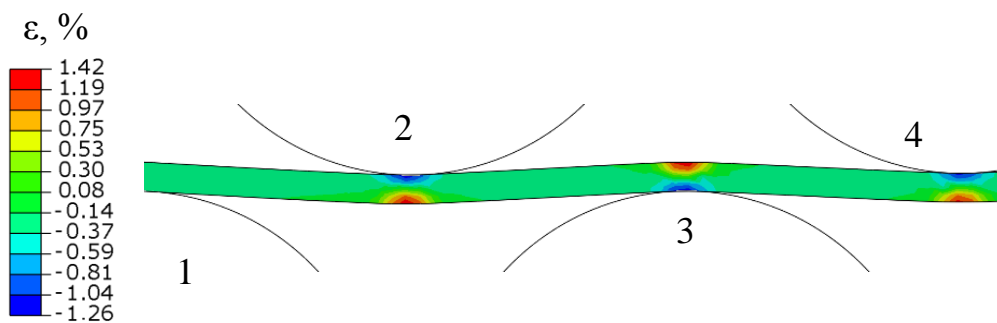


Рисунок 5.3 – Распределение относительных деформаций по толщине полосы при ее прохождении через первые четыре ролика ($y_2 = 1$ мм; $y_{16} = 0,4$ мм)

Далее было получено, что при перемещении первого верхнего ролика вниз на 1,8 мм уровень пластификации составил

$k_{plastic} = \left(1 - \frac{0,2}{2,36}\right) \cdot 100 \% = 91,5 \%$ (продольные пластические деформации составили 2,36 % под роликом № 3 – рисунок 5.4).

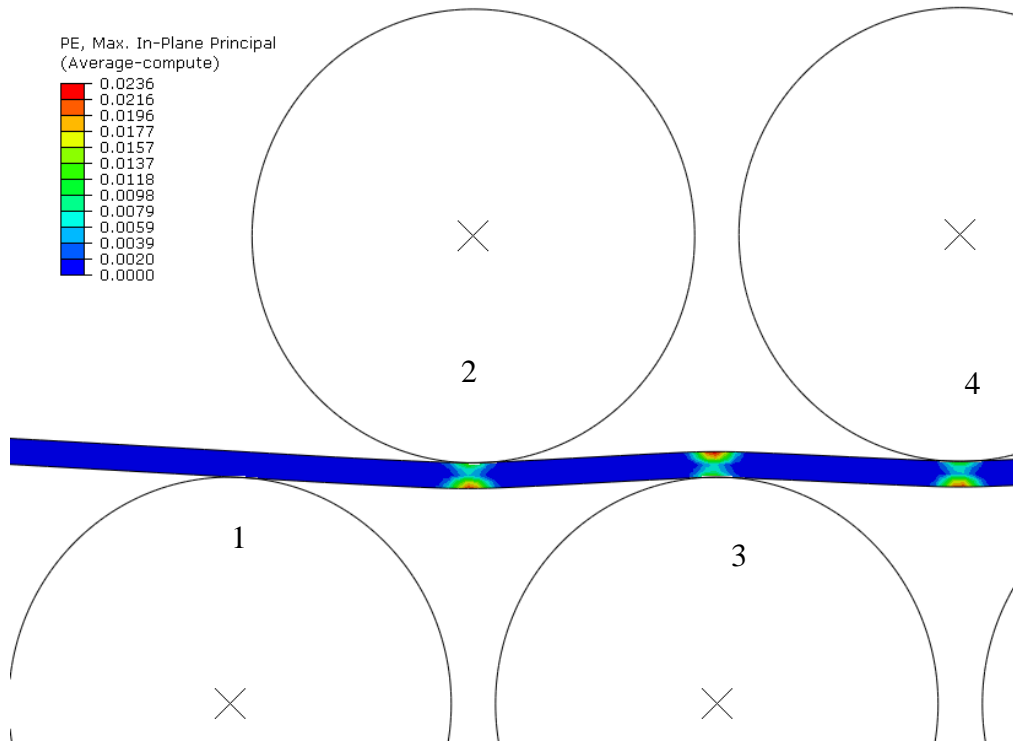


Рисунок 5.4 – Распределение относительных деформаций по толщине полосы при ее прохождении через первые четыре ролика ($y_2 = 1,8$ мм; $y_{16} = 0,4$ мм)

На стадии задания вращательного движения роликов было отмечено снижение значений продольных пластических деформаций и уровня пластификации до

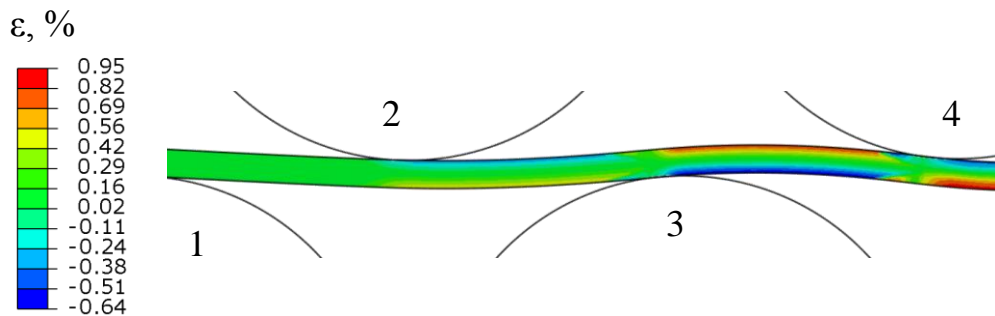


Рисунок 5.5 – Распределение относительных деформаций по толщине полосы при задании вращения роликов ($y_2 = 1,8$ мм; $y_{16} = 0,4$ мм)

78,9% ($k_{plastic} = (1 - \frac{0,2}{0,95}) \cdot 100 \% = 78,9 \%$) (рисунок 5.5). Чтобы при задании

скорости правки выполнялось условие $k_{plastic} \geq 90 \%$, за несколько итераций было подобрано перемещение первого верхнего ролика и его значение составило $y_2 = 4,5$ мм. Пластификация во время процесса получилась равной 91 % (рисунок 5.6). Следует отметить, что до начала вращения в случае $y_2 = 4,5$ мм и $y_{16} = 0,4$ мм пластификация составляла 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.

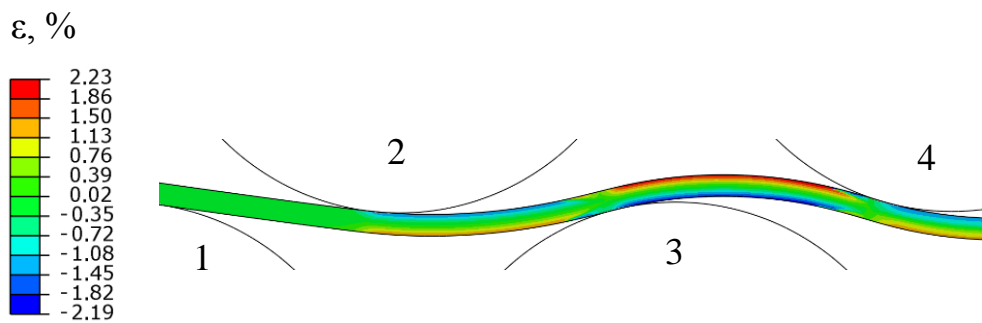


Рисунок 5.6 – Распределение относительных деформаций по толщине полосы при задании вращения роликов ($y_2 = 4,5$ мм; $y_{16} = 0,4$ мм)

Результаты определения показателей правки, включая уровень остаточных напряжений по толщине листа для полученного режима правки, относительную пластическую деформацию и остаточную потенциальную энергию представлены на рисунках 5.7 – 5.9. Видно, что после правки остаточные напряжения в листе не превышают 80 МПа, а остаточная энергия – 0,26 Дж. Анализ графиков показывает, что разработанный режим характеризуется плавным убыванием продольных пластических деформаций при правке и уравновешенным распределением остаточных напряжений по толщине.

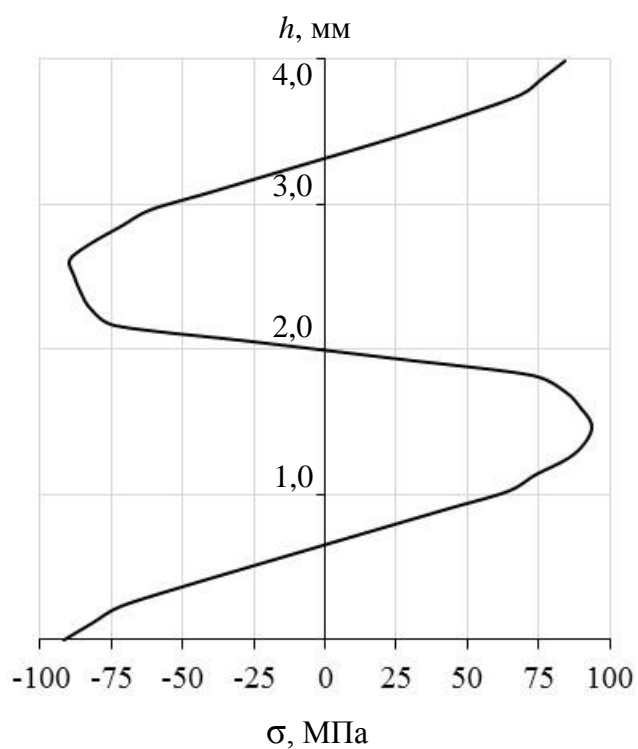


Рисунок 5.7 – График распределения остаточных напряжений по толщине листа ($h = 4$ мм) после правки

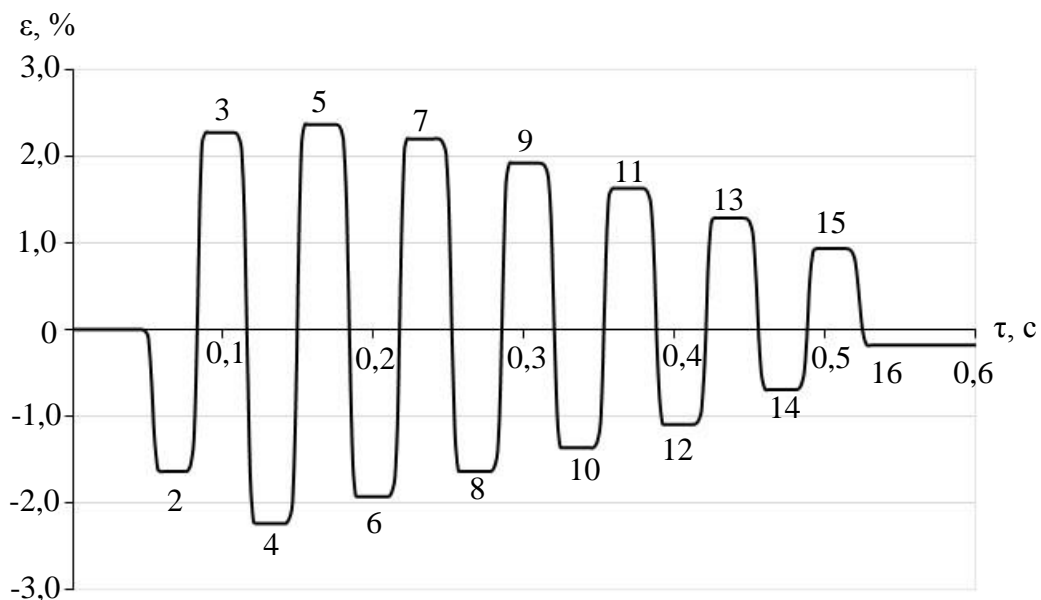


Рисунок 5.8 – Относительные продольные пластические деформации верхнего поверхностного волокна при правке полосы толщиной 4 мм (цифрами от 2 до 16 обозначены номера роликов 17-роликовой машины)

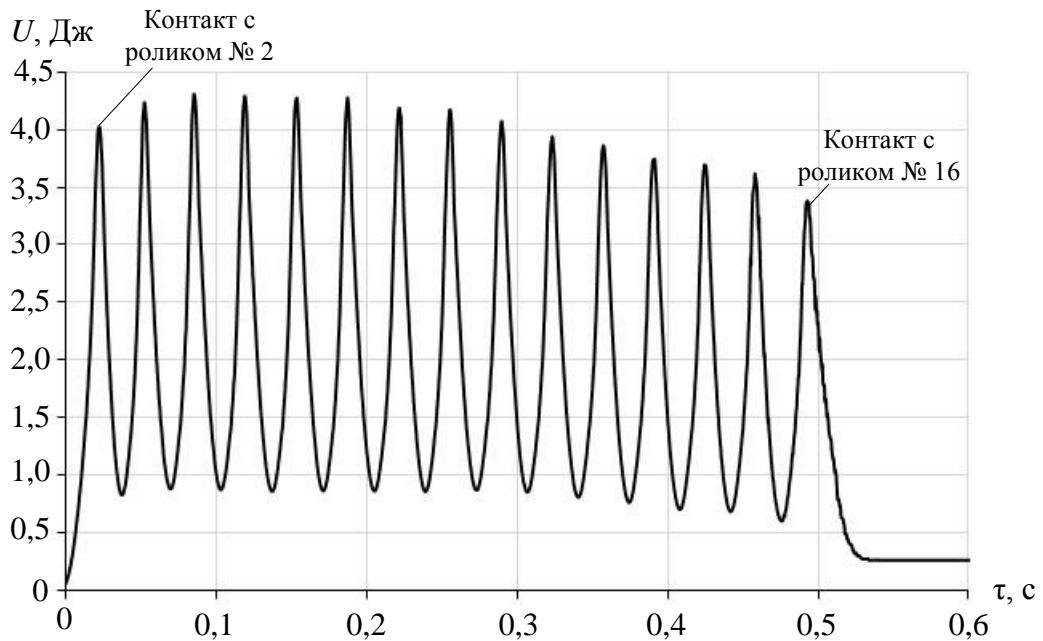


Рисунок 5.9 – Изменение потенциальной энергии деформации в горячекатаной полосе толщиной 4 мм при ее прохождении через ролики № 2 – № 16

Аналогично были определены режимы правки полос толщиной 8 мм и 10 мм. Перемещение всей верхней кассеты роликов вниз параллельно нижней до появления напряжений, превышающих предел текучести материала полосы, для толщины 8 мм составило 1 мм, а для толщины 10 мм – 1,3 мм. Перемещение первого верхнего ролика вниз при правке полосы толщиной 8 мм рассматривалось в диапазоне 4 – 6,5 мм, а при правке полосы толщиной 10 мм – 5 – 8 мм. Уровни пластификации в конечном итоге для полос толщиной 8 мм и 10 мм составили 93,3 % и 90,9 % соответственно. Результаты моделирования процесса правки представлены на рисунках 5.10 – 5.14.

Из рисунка 5.10 видно, что после правки внутри толщины полосы остаются напряжения, превышающие напряжения в поверхностных волокнах. При этом перепад напряжений по толщине не превышает 50 МПа.

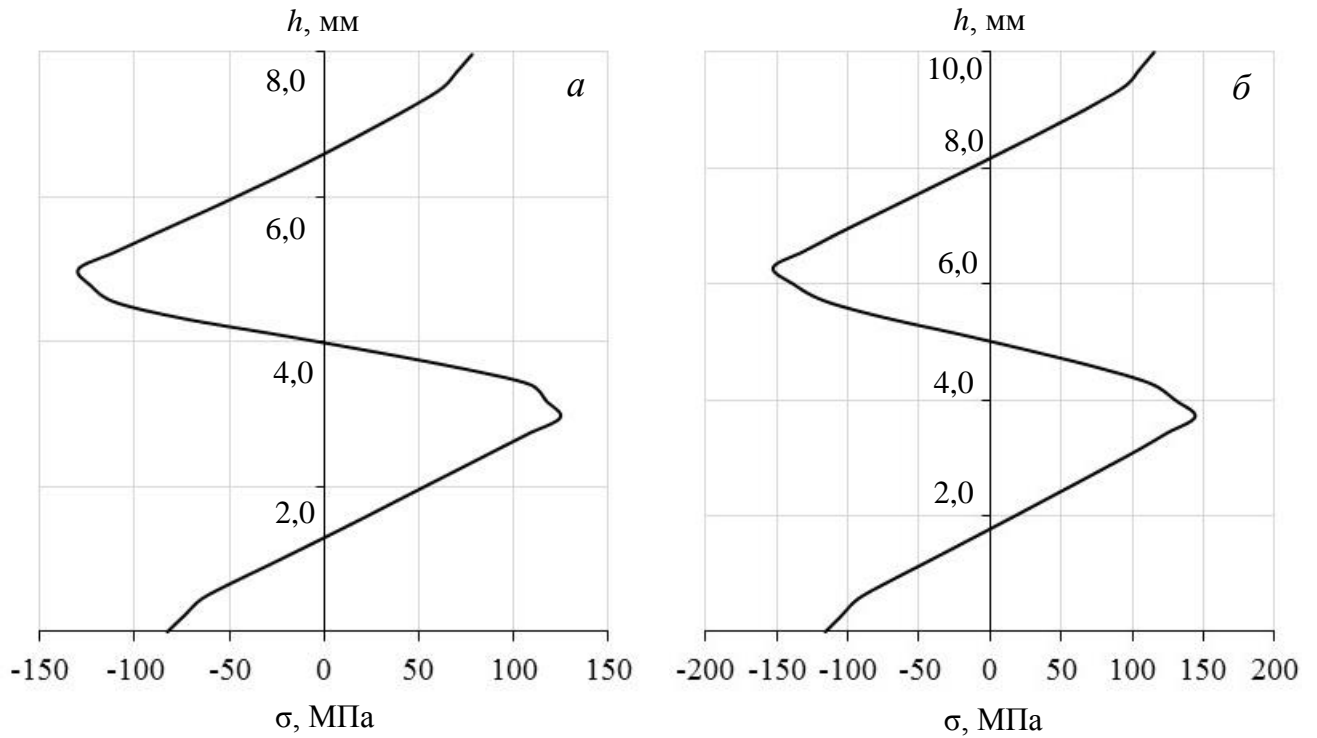


Рисунок 5.10 – Графики распределения остаточных напряжений после правки по толщине листа: $a - h = 8$ мм; $б - h = 10$ мм

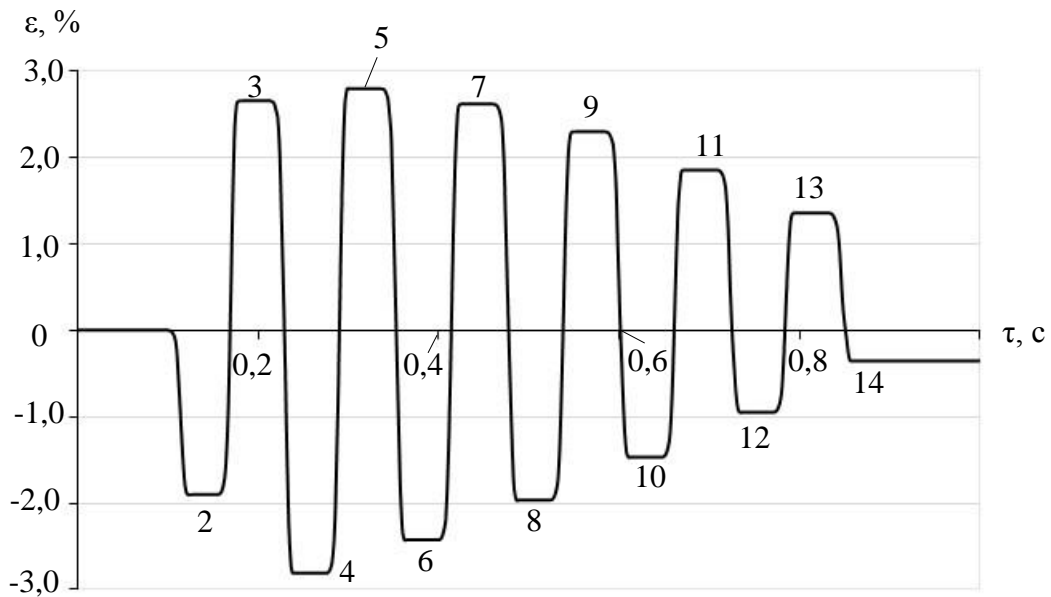


Рисунок 5.11 – Относительные продольные пластические деформации верхнего поверхностного волокна при правке полосы толщиной 8 мм (цифрами от 2 до 14 обозначены номера роликов 15-роликовой машины)

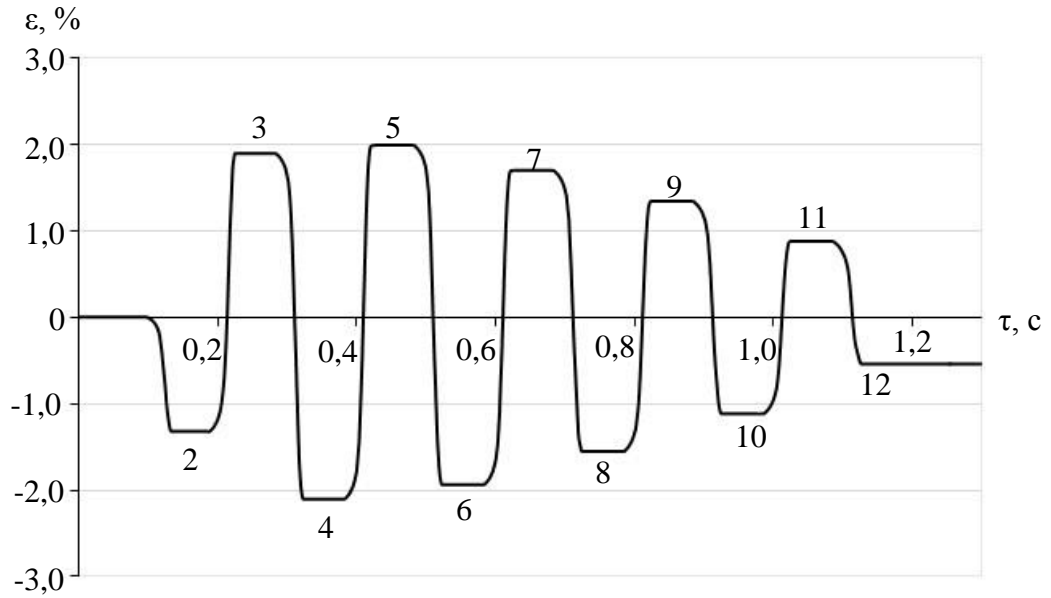


Рисунок 5.12 – Относительные продольные пластические деформации верхнего поверхностного волокна при правке полосы толщиной 10 мм (цифрами от 2 до 12 обозначены номера роликов 13-роликовой машины)

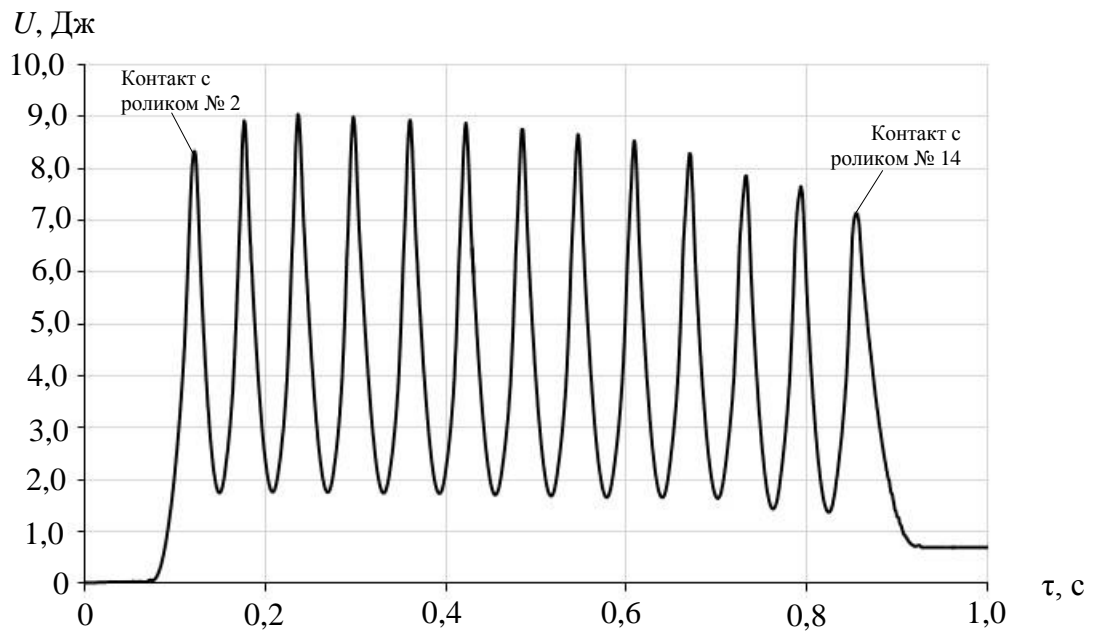


Рисунок 5.13 – Изменение потенциальной энергии деформации в горячекатаной полосе толщиной 8 мм при ее правке в 15-роликовой машине

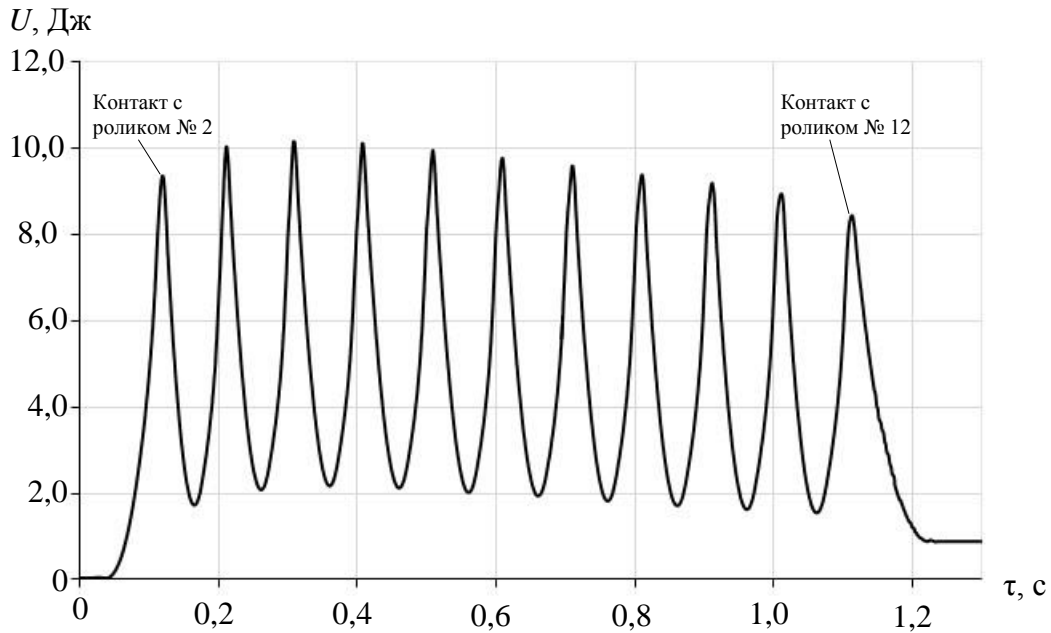


Рисунок 5.14 – Изменение потенциальной энергии деформации в горячекатаной полосе толщиной 8 мм при ее правке в 13-роликовой машине

Анализ рисунков 5.11 – 5.14 показывает, что предложенные режимы правки характеризуются плавным снижением продольных пластических деформаций, а также умеренными значениями остаточной потенциальной энергии, учитывая конструктивные параметры и профила размер полос, подвергаемых правке.

5.2.2 Испытание и внедрение разработанных режимов правки

Результаты разработки режимов правки горячекатаных полос из марки стали S355 были использованы для совершенствования технологии правки в 13- и 17-роликовых правильных машинах, установленных в линии агрегата поперечной резки № 4 и 15-роликовой машины линии агрегата поперечной резки № 3 цеха отделки металла № 2 ПАО «Северсталь».

По полученным режимам выполняли опытную правку полос из марки стали S355 шириной 1500 мм. Были взяты по три рулона из разных плавков на каждую толщину – 4 мм, 8 мм и 10 мм. От каждого рулона отбирался один

лист, на контрольной плите измерялась высота неплоскостности H каждого листа. Порезка листов на продольные полосы шириной 100 мм осуществлялась на машине плазменной резки SatroniK LS3000 и фиксировалась величина фактического изгиба каждой полосы.

Исходные рекомендованные перемещения верхних роликов вниз и перемещения роликов после точной настройки РПМ приведены в таблице 5.1. Из таблицы видно, что после окончательной настройки перемещения роликов изменились незначительно с сохранением величины наклона верхней кассеты Δ . При этом можно отметить, что при настройке РПМ был учтен полученный при моделировании принцип целесообразности уменьшения значений перемещений последних верхних роликов – все реальные значения не превышают рекомендованных методикой.

Таблица 5.1 – Настройки роликовых правильных машин при правке полос толщиной 4 мм, 8 мм и 10 мм (числитель – рекомендованные, знаменатель – реальные)

Толщина полосы h , мм	Перемещения роликов, мм							
	y_2	y_4	y_6	y_8	y_{10}	y_{12}	y_{14}	y_{16}
4	<u>4,5</u>	<u>3,91</u>	<u>3,33</u>	<u>2,74</u>	<u>2,16</u>	<u>1,57</u>	<u>0,99</u>	<u>0,4</u>
	4,45	3,86	3,28	2,69	2,11	1,52	0,94	0,35
8	<u>6,5</u>	<u>5,58</u>	<u>4,67</u>	<u>3,8</u>	<u>2,83</u>	<u>1,92</u>	<u>1,0</u>	-
	6,4	5,48	4,57	3,65	2,73	1,82	0,9	-
10	<u>8,0</u>	<u>6,66</u>	<u>5,32</u>	<u>3,98</u>	<u>2,64</u>	<u>1,3</u>	-	-
	7,8	6,46	5,12	3,78	2,44	1,1	-	-

Полученные результаты промышленного эксперимента представлены в таблице 5.2. «Минус» в значениях измерений означает отклонение концов полосок вниз после порезки плазмой.

Таблица 5.2 – Результаты измерения высоты неплоскостности H отобранных листов толщиной h после правки и отклонений полосок после порезки плазмой

№ листа	h , мм	H , мм	Отклонения полосок после порезки плазмой, мм														
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	4	2	2	1	1	0	0	0	-1	-1	0	-1	-1	-2	0	0	2
2		2	0	0	2	1	1	-1	-2	-2	-1	-1	2	1	0	2	1
3		1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1
4	8	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	1	1
5		1	1	1	0	1	0	-1	-1	-1	-1	0	0	1	0	0	1
6		2	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0
7	10	2	2	0	2	1	-1	1	0	-2	1	0	0	-1	0	0	2
8		2	0	0	0	1	-2	0	0	0	0	1	0	1	2	0	0
9		1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1

Эксперименты показали, что предложенные режимы правки обеспечивают высокую плоскостность отобранных листов не только после правки, но и после раскроя листов на машине плазменной резки. Во всех случаях отклонение полосок не превысило 2 мм.

На основании промышленных испытаний методика расчета режимов правки была внедрена в производство, а разработанные режимы правки приняты к использованию.

Предложенные усовершенствования технологии производства горячекатаного листового проката в условиях ПАО «Северсталь» позволили получать прокат, пригодный для лазерной резки.

Методику расчета режимов правки можно использовать при проектировании технологий правки разнообразного марочного и профильного сортамента на различных РПМ.

Выводы по главе 5

1. Разработана методика расчета режима правки, основанная на результатах моделирования и подтвержденная экспериментальными данными, полученными при правке и последующей резке листов,

отличающаяся от известных учетом неоднородности напряженно-деформированного состояния проката при правке.

2. Установлено влияние вращательного движения роликов РПМ на уровень пластификации полосы. Вращение роликов приводит к уменьшению уровня пластификации полосы.

3. Предложены обоснованные режимы правки полос из марки стали S355MC толщиной 4 мм, 8мм и 10 мм, обеспечивающие минимальные значения отклонений остаточных напряжений, остаточной потенциальной энергии в листах после правки и отклонений от плоскостности листов при высокотехнологичной резке.

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

Заключение

Выполнены исследования факторов технологии и параметров оборудования роликовых правильных машин с целью усовершенствования процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации и повышения плоскостности получаемых листов при их дальнейшей обработке.

Результаты проведенной работы заключаются в следующем:

1. Разработана математическая модель процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации, основанная на методе конечных элементов и отличающаяся от известных возможностью учета неоднородности напряженно-деформированного состояния проката.

2. На основе математического моделирования процесса правки полос в условиях циклической знакопеременной деформации установлено, что:

– механизм возникновения остаточных напряжений обусловлен величиной пластической деформации и неоднородностью распределения деформаций по толщине при правке;

– после правки 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.

3. Установлены закономерности изменения напряженно-деформированного состояния горячекатаных полос при правке в зависимости от технологических параметров процесса. Показано, что максимальный уровень пластических деформаций вначале правки с минимальным их уровнем на выходе обеспечивают уменьшение значений остаточных напряжений, потенциальной энергии в листах после правки и отклонений от плоскостности листов при высокотехнологичной резке.

Исследовано влияние конструктивных параметров процесса правки на напряженно-деформированное состояние горячекатаных полос. Установлено, что

– уменьшение диаметров роликов с сохранением соотношения между шагом t и диаметром роликов D , равным $t = 1,1D$, приводит к росту уровня пластификации полосы по толщине;

– увеличение числа роликов без изменения диаметра и шага роликов при одном и том же наклоне верхней кассеты ведет к росту пластификации полосы, снижению перепада напряжений по толщине и остаточной потенциальной энергии в металле.

Для снижения перепада напряжений по толщине при правке сортамента толщиной 3 – 4 мм даны рекомендации по установке в линию АПР-3 ПАО «Северсталь» машины с диаметром роликов 70 – 50 мм и их числом не менее 19.

4. Разработана научно обоснованная методика выбора режима правки, основанная на результатах моделирования и подтвержденная экспериментальными данными, полученными при правке и последующей резке листов. Методика позволяет определять настройки РПМ, устраняющие исходное неоднородное напряженное состояние горячекатаной полосы и дефекты неплоскостности, с обеспечением минимального уровня остаточных напряжений в готовом прокате.

5. На основе разработанной методики рассчитаны режимы правки полос на роликовых правильных машинах, установленных в линиях АПР-3 и АПР-4 цеха отделки металла № 2 ПАО «Северсталь», обеспечивающие минимальные значения остаточных напряжений, потенциальной энергии в листах после правки и отклонений от плоскостности листов при высокотехнологичной резке.

6. На основании промышленных испытаний методика расчета режимов правки внедрена в производство, разработанные режимы правки приняты к использованию на ПАО «Северсталь». Предложенные усовершенствования технологии производства горячекатаного листового проката в условиях ПАО «Северсталь» позволили получать прокат, пригодный для лазерной резки.

Список литературы

1. Железнов Ю. Д. Прокатка ровных листов и полос. М.: Metallurgia. 1971. 200 с.
2. Григорян Г.Г., Шаталов Р. Л., Скорупский В. И. Регулирование профиля и планшетности тонких полос на широкополосном стане 2000 горячей прокатки // Черная металлургия. Бюл. научно-техн. инф., 1977. № 22. 48 с.
3. Григорян Г.Г., Железнов Ю.Д., Черный В.А. Настройка, стабилизация и контроль процесса тонколистовой прокатки. М.: Metallurgia, 1975. 368 с.
4. Беньковский М.А., Богоявленский К.Н., Виткин А.И. Технология прокатного производства. В 2 книгах. Кн. 2. М.: Metallurgia, 1991. 423 с.
5. Максимов Е.А., Шаталов Р.Л., Босхамджиев Н.Ш. Производство планшетных полос при прокатке. М.: Теплотехник, 2008. 336 с.
6. Хлопонин В.Н., Полухин П.И., Погоржельский В.И., Полухин В.П. Горячая прокатка широких полос. М.: Metallurgia, 1991. 198с.
7. Коновалов Ю.В. Справочник прокатчика. Книга 1. Производство горячекатаных листов и полос. М.: Теплотехник, 2008. 640 с.
8. Flat-rolled steel processes: advanced. CRS Press, Taylor and Francis Group, 2009, 372 p.
9. 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.
10. Гарбер Э.А., Мишнев П.А., Шалаевский Д.Л., Палигин Р.Б., Михеева И.А., Болобанова Н.Л. Улучшение плоскостности горячекатаных полос на широкополосных станах с использованием математической модели идентификации неплоскостности по параметрам режима прокатки // ОМД-2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии: Сборник докладов международного научно-технического прогресса. Москва, 2014. С.342-347.

11. Мишнев П.А., Гарбер Э.А., Шалаевский Д.Л., Михеева И.А., Палигин Р.Б., Николаев Н.Ю. Моделирование и уменьшение неплоскостности при горячей прокатке широких полос на непрерывном стане // Научно-технический прогресс в черной металлургии: Материалы I Международной научно-технической конференции, 2013г., г. Череповец: ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет». С.239-244.

12. Гарбер Э.А., Мишнев П.А., Шалаевский Д.Л., Михеева И.А. Прогнозирование и уменьшение неплоскостности горячекатаных полос на стадии настройки широкополосного стана // Евразийский союз ученых IV международная научно-практическая конференция «Современные концепции научных исследований» (часть 3). г. Москва, 2014. С.79-83.

13. Михеева И. А. Комплексная модель идентификации и устранения неплоскостности полос на широкополосном стане горячей прокатки. // Труды конференции молодых ученых и специалистов ФГУП ЦНИИ КМ "Прометей", Санкт-Петербург, 2013. СПб. 2014. С. 29-33

14. Гарбер Э.А., Шалаевский Д.Л., Мишнев П.А., Михеева И.А., Кухтин С.А. Исследование, моделирование и уменьшение неплоскостности при горячей прокатке стальных широких полос. Монография. Череповецкий гос.университет. М.: Теплотехник, 2016. 112 с.

15. Ginzburg, V. B., Ballas, R. Flat Rolling Fundamentals. CRC Press, Marcel Dekker, 2000. P. 1536.

16. Jelali M., Müller U. Advanced measurement and flatness control for hot strip mills // Revue de Métallurgie. 2002. Vol. 99. No. 6. P. 517-522.

17. 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.

18. Салганик В.М., Полецков П.П. Способы и устройства регулирования профиля и формы листового проката // Новости черной металлургии России и

зарубежных стран. Черная металлургия: Бюл. науч.-техн. и экон. информации. 2000. Вып. 11-12 (1211-1212). Часть I. С. 15-30.

19. Салганик В. М., Полецков П. П., Омельченко Б. Я. Моделирование и совершенствование четырехвалковых систем. // Труды 4 Конгресса прокатчиков, Магнитогорск, 2001 М.: ОАО «Черметинформация», 2002. С. 152-155.

20. 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 // Вест. МГТУ (Магнитогорск). 2010. №1. С. 59-62.

21. 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: 3 European Rolling Conference, Dusseldorf, 2003: Proceedings. Dusseldorf: Stahlinst. VDEh. 2003. С. 275-281.

22. Полецков П. П. Разработка профилировок валков широкополосных станов горячей прокатки. // Металлург. 2011, №8. С. 57-61.

23. Алдунин А. В., Русаков А. Д., Трайно А. И. Исследование и разработка технологий производства стальных полос // Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing. 2014.

24. 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.

25. Мухин, Ю. А., Бельский, С. М., Шопин, И. И. Модель изменения плоскостности полосы в процессе охлаждения рулона после горячей прокатки // Современная металлургия нового тысячелетия. 2016. С. 78-80.

26. Целиков А. И., Полухин, П. И., Гребеник, В. М. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х томах. Т. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки прокат. М.: Металлургия, 1988. 576 с.

27. Недорезов И. В. Моделирование процессов правки проката на роликовых машинах. Екатеринбург: АКВА-пресс, 2003. 255 с.

28. Полецков П. П. Об изменении показателей профиля и плоскостности тонколистового проката в процессе правки растяжением с изгибом // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. ГИ Носова. 2011. №. 3. С. 60-62.

29. Дьяконов В.А., Буданов А.П., Корнилов В.Л., Антипанов В.Г., Полецков П.П., Крюков Д.М. Устройство для правки широких горячекатаных полос и способ их правки. Патент № 2390396 В21D 1/02.

30. Слоним А. З., Сонин Л. А. Машины для правки листового и сортового проката. М.: Металлургия, 1987. 232 с.

31. Данько В.М. Конспект лекций по курсу «Механическое оборудование прокатных цехов» Алчевск: ДонДТУ, 2007. 167с.

32. Семененко Ю. Л. Машины для правки проката. М.: Metallurgizdat, 1961. 209 с.

33. Остринский А. С. Определение расчетных параметров листовых роликовых правильных машин // Сборник трудов ВНИИМЕТМАШ. 1966. №18. С. 7-32.

34. Исследование и совершенствование процессов и машин для обработки проката: сб. науч. тр. под ред. Дунаевского В.И. Москва, 1990. 189 с.

35. Дунаевский В.И., Нотченко В.Д., Сатонин А.В., Самойлов В.А., Егоров А.Б., Ворона В.В. Методика и программные средства по автоматизированному расчету и проектированию технологических режимов процесса правки листов и полос на роликоточильных машинах. Краматорск: Донбас. гос. машиностроит. акад., 1996. 17 с.

36. Шинкин В. Н. Расчет сил и моментов семироликовой правильной машины при предварительной правке стального листа // Известия Высших учебных заведений. Черная Metallургия. 2017. Т. 59. №. 12. С. 870-874.

37. Шинкин В. Н. Приближенные методы расчета $(2n+1)$ -роликовой листопрямительной машины. Часть 1. Первое приближение // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2017. №. 2-1. С. 40-44.

38. Шинкин В. Н. Приближенный метод расчета кривизны листа при правке на семироликовой машине // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2017. №. 1-3. С. 44-47.

39. 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 роликотравильных машинах // Производство проката. 2016. №. 7. С. 2-8.

40. Грибков Э. П., Завгородний, А. В., Гаврильченко, Е. Ю., Горбенко, А. С. Программное обеспечение для проектирования технологических параметров настройки многороликовых листопрямительных машин // Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. 2015. № 2. С. 33-38.

41. 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.

42. Зайцев Д.А. улучшение плоскостности толстого листа на основе расчета параметров правки в холодном состоянии // Сталь. 2018. №2. С. 22-24.

43. 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.

44. Барабаш А. В., Гаврильченко, Е. Ю., Грибков, Э. П., Марков, О. Е. Моделирование процесса правки на листопрямительных машинах с исправлением дефекта волнистости проката // Сталь. 2014. №12. С. 62-66.

45. 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. №6. P.1060-1068.

46. Behrens B.A., Krimm R., Controlled sheet metal straightening. TMS Suppl. Proc. 2008. Vol.3. P. 129-136.

47. 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.

48. Liu Z. A New Curvature Analytical Method in Plate Leveling Process // ISIJ International. 2018. Vol. 58. No. 6. P. 1094-1101.

49. Kaiser R. Simulation of the roller straightening process with respect to residual stresses and the curvature trend // Materials Science Forum. Trans Tech Publications, 2014. Vol. 768. P. 456-463.

50. Grüber M., Oligschläger M., Hirt G. Adjusting of roller levellers by finite element simulations including a closed-loop control // Advanced Materials Research. Trans Tech Publications, 2014. Vol. 1018. P. 207-214.

51. 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.

52. 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.

53. 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.

54. Голи-Оглу Е.А., Алистаев А.И., Гоношенко И.В., Порошкова.В. Влияние параметров холодной знакопеременной деформации изгибом на свойства низколегированных трубных сталей классов прочности К56-К65 // Сталь. 2014. № 2. С. 65-70.

55. Бовтало Я. Н., Игнатенко В. Н., Филиппов Ю. К. Зависимость механических свойств стали от величины деформации и схемы напряженного состояния // Обработка материалов давлением. 2009. № 4.

56. Шаргунов А. В., Горшков, С. Н., Денисов, С. В., Титов, А. В., Казаков, О. В., Костюнин, В. Г. Изменение механических свойств проката в процессе правки в АПР-2 ЛПЦ-4 ОАО «ММК» // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. ГИ Носова. 2007. №2. С. 35-37.

57. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232 с.

58. Маталин А.А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин. Киев: Техника, 1971. 122 с.

59. Колмогоров В.Л., Богатов А.А., Мигачев Б.А., Зудов Е.Г., Фрейдензон М.Е. Пластичность и разрушение. М.: Metallurgiya, 1977. 336 с.

60. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В., Тиунов В.В. Технологические остаточные напряжения и их влияние на долговечность и надежность металлоизделий, Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. 226 с.

61. Буркин С.П., Шимов Г.В., Андрюкова Е.А. Metallurgiya. Остаточные напряжения в металлопродукции. М.: Изд-во Юрайт, 2018. 247 с.

62. Павлов В.Ф., Кирпичев В.А., Вакулюк В.С. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочненных образцов с концентраторами напряжений. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. 125 с.

63. Кудрявцев И.В. Влияние остаточных напряжений на усталостную прочность стали. М.: ВИНТИ, 1957. 17 с.

64. Зубаирова Л.Х., Свирщев В.И. Определение остаточных напряжений от действия силы резания при шлифовании. Материалы НТК «Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении». Киев-Одесса, 2013. С. 156-158.

65. Buhler H., Lehmann Th., Schmitt F.I. Untersuchungen iiber die dimensionsanalytische Berechnung vor Eigenspannungen in gezogenen Staben. Archiv fiir das Eisenhiittenwesen, 36, 1965. P. 29-34.

66. Буркин С.П., Картак Б.Р., Щипанов А.А. Расчет остаточных напряжений в холоднотянутой проволоке. Сборник «Обработка металлов давлением». Вып. 3. Свердловск: УПИ, 1976. С. 76-80.

67. Тропотов А.В. Расчет остаточных напряжений после упруго-пластической деформации вариационным методом. Сборник «Обработка металлов давлением». Вып. 8. Свердловск: УПИ, 1981. С. 139-143.

68. Гусенков А. П., Москвитин Г. В. Анализ некоторых подходов к описанию циклических диаграмм деформирования // Машиностроение. 1973. № 4. С. 59-67.

69. Шохин В.А., Недорезов И.В. Внедрение «безмоментного» способа правки рельсов Р65 и Р75 // Конструирование, совершенствование и исследование прокатного оборудования: Сб. науч. тр. НИИТЯЖМАШа ПО «Уралмаш». Свердловск, 1991. С.8-10.

70. Шохин В.А., Недорезов И.В. Модель упругопластической среды для теоретического исследования процесса правки рельсов на роликотправильных машинах // Математическое моделирование технологических процессов обработки металлов давлением. Тезисы Докладов Всероссийской науч.-техн. конф. Пермь, 1990. С. 59.

71. Association of Iron and Steel Engineers. Hot Strip Mill Profile and Flatness Study, Phase I; AISE: Pittsburgh, PA, USA, 1986. 86 p.

72. Koliopoulos, C. L., & Tang, S. U.S. Patent No. 5,471,307. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. 1995.

73. Пат. США № 5471307. Koliopoulos C.L., Tang S. Sheet flatness, measurement system and method, 1995.

74. Пат. США № 6668626. Grefve K. et al. System and a method for measuring and determining flatness, 2003.

75. 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.

76. Пригоровский Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений: Справочник. М.: Машиностроение, 1983. 248 с.
77. Кобаяси А. Экспериментальная механика. В 2-х томах: Т. 1. М.: Мир, 1990. 616 с.
78. Макаров Р.А. Тензометрия в машиностроении. Справочное пособие. М.: Машиностроение, 1975. 288 с.
79. Дайчик М.Л., Пригоровский Н.М., Хуршудов Г.Х. Методы и средства натурной тензометрии. М.: Машиностроение, 1989. 240 с.
80. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник под ред. В.В. Ключева. М.: Машиностроение, 2005. 656 с.
81. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электроннооптический анализ. Учебное пособие для вузов. М.: МИСИС, 2002. 360 с.
82. Дубов А.А., Дубов Ал. А., Колокольников С.М. Метод магнитной памяти металла и приборы контроля. Учебное пособие. М.: ЗАО «Тиссо», 2008. 365 с.
83. Никитина Н. Е., Казачек С. В. Преимущества метода акустоупругости для неразрушающего контроля механических напряжений в деталях машин // Вестник научно-технического развития. 2010. № 4(32) С. 18–28.
84. 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.
85. 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). Vol. 2018, Is. 1, P. 90-94.
86. 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.

87. 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. 2018. № 1. С. 68-73.

88. Steinwender L., Kainz, A., Krimpelstätter, K., Hohenbichler, G., & Zeman, K. FEM-simulation of the tension levelling process with Abaqus/Explicit // Proceedings of the Abaqus Austria Regional Users' Conference. – 2008.

89. Лавриненков А. Д., Якимов И. Д., Левадный Е. В., Бойко А. Б., Остапов А. В., Зигинов Н.В. SIMULIA Abaqus. Решение прикладных задач. [Электронный ресурс] URL: https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/abaqus/abaqus_apltask.pdf (дата обращения 09.06.2019).

90. Abaqus // Инжиниринговая компания ТеСИС. [Электронный ресурс] URL: <http://www.tesis.com.ru/software/abaqus> (дата обращения 09.06.2019).

91. Abaqus Theory Manual. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA, 2018. [Электронный ресурс] URL: <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAETHERefMap/simathe-c-ov.htm> (дата обращения 09.06.2019).

92. Trusov K.A., Mishnev P.A., Kopaev O.V., Nushtaev D.V. Numerical Simulation of roller levelling using SIMULIA Abaqus // IOP Conf. Series: Material Science and Engineering, 2017. 287 012014.

93. Трусов К.А., Копаев О.В., Нуштаев Д.В. Моделирование режимов правки плоского проката // Труды Международного форума «Инженерные системы – 2017». Москва: Инжиниринговая компания «ТЕСИС», 2017. С. 128-133.

94. 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 Vol.1063. 2018.

95. Silvestre E., Sáenz de Argandoña E., Galdós L., Mendiguren J. Testing and Modeling of Roll Levelling Process // Key Engineering Materials. 2014. Vols. 611-612. P. 1753-1762

ИСПОЛНИТЕЛЬ
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Череповецкий государственный университет»
162600, г. Череповец, пр. Луначарского, 5
ИНН 3528051834, КПП 352801001

ЗАКАЗЧИК
ПАО «Северсталь»
162608, г. Череповец
ул. Мира, 30
ИНН 3528000597, КПП 997550001

АКТ СДАЧИ-ПРИЕМКИ

4-го этапа договора № 1040НП/ТД5587 от 16.12.2015 г.

«Разработка специальных методов и режимов правки проката для лазерной резки в условиях ЛПЦ-2 с целью обеспечения его плоскостности»

Мы, нижеподписавшиеся, представитель «Исполнителя» проректор по научной работе **Харахин К.А.**, действующий на основании доверенности № 1 от 09.01.2017 г., с одной стороны, и представитель «Заказчика» ПАО «Северсталь», по доверенности **Мишнев П.А.**, действующий на основании доверенности № 1-1227 от 21.04.2016 г., с другой стороны, составили настоящий акт о том, что выполненная работа удовлетворяет условиям 4-го этапа договора и технического задания.

Краткое содержание выполненной работы:

1. Разработаны на основании методики 3-го этапа специальные методы и режимы правки проката, обеспечивающие минимальную неплоскостность полос и минимальную неравномерность распределения по их объему остаточных напряжений.

ИСПОЛНИТЕЛЬ
Проректор по научной работе ЧГУ
Харахин К.А.
Доверенность № 1 от 09.01.2017 г.
(подпись)



ЗАКАЗЧИК
Представитель ПАО «Северсталь» по доверенности
П.А. Мишнев
Доверенность № 1-1227 от 21.04.2016 г.
(подпись)



2017 г.

(Handwritten signatures of K.A. Kharakhin and P.A. Mishnev)



№ _____
 На № _____ от _____

г. Череповец

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы аспиранта кафедры
 ММиТО Череповецкого государственного университета Котова К.А.

В результате выполнения работ по теме «Исследование и совершенствование процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации» разработаны математическая модель процесса правки и методика выбора режима правки горячекатаных полос, позволившие расширить возможности процесса правки на роликовых правильных машинах, установленных в линиях агрегатов поперечной резки цеха отделки металла №2.

На основе разработанной методики определены режимы правки полос толщиной 3–16 мм на 13-, 15- и 17-роликовых правильных машинах. Предложения по изменению настроек роликовых правильных машин переданы для использования в технологических процессах агрегатов поперечной резки.

Старший менеджер



Кобаев О.В.

АО «Северсталь Менеджмент»
 ул. Мира, д. 30
 г. Череповец
 Вологодская область
 Россия, 162608

Т: +7 (8202) 53 09 00
 Ф: +7 (8202) 53 09 15
 severstal@severstal.com
 www.severstal.com

Достичь большего вместе