

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
Высшего профессионального образования
«Южно-Уральский государственный университет» (НИУ)
Факультет «Физико-металлургический»
Кафедра «Обработка металлов давлением»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент

Копылов А.С.
2016 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

В.Г. Шеркунов

2016 г.

«Совершенствование технологии правки рельсов типа Р65 на ПАО «ЧМК» в
прокатном цехе №3 на универсальном рельсо-балочном стане»

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ (ДИССЕРТАЦИИ)
ЮУрГУ – 22.04.02.68.2016.887 ПЗ ВКР

Руководитель работы,
доцент

Широков В.В.
8.06 2016 г.

Автор работы
студент группы МиМТ - 213м

Тимаков Е.В.
08.06. 2016 г.

Нормоконтролер

Широков В.В.
8.06 2016 г.

Челябинск 2016

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
Высшего профессионального образования
«Южно-Уральский государственный университет» (НИУ)
Факультет «Материаловедение и металлургические технологии»
Кафедра «Обработка металлов давлением»

Факультет «Физико-металлургический»
Кафедра «Машины и технологии обработки материалов давлением»
Направление 22.04.02 «Металлургия»

УТВЕРЖДАЮ:
Заведующий кафедрой


В.Г. Шеркунов
2016 г.

З А Д А Н И Е

на научно-исследовательскую работу студента
Тимакова Евгения Викторовича

Группа: МиМТ-213м

1 Тема выпускной работы: «Совершенствование технологии правки рельсов типа Р65 на ПАО «ЧМК» в прокатном цехе №3 на универсальном рельсобалочном стане»

2 Срок сдачи студентом законченной работы 9.06.2016 г.

3 Исходные данные к работе

3.1 Технологические инструкции ЧМК

3.2 Периодическая литература, монографии, патенты

3.3 Материалы технологической практики

4 Содержание расчетно-пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов):

ВВЕДЕНИЕ

1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

2 АНАЛИЗ ТЕКУЩЕЙ СИТУАЦИИ

3 ТЕОРИЯ ПРАВКИ

4 МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ABAQUS

5 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРАВКИ НА РОЛИКО-ПРАВИЛЬНОЙ МАШИНЕ

6 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРАВКИ И ПОРЕЗКИ РЕЛЬСОВ НА ЛИНИИ ПРАВИЛЬНЫХ ПРЕССОВ GEISMAR

7 ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ
ЗАКЛЮЧЕНИЕ
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

7 Дата выдачи задания: 01.02. 2016 г.

Руководитель (Ф.И.О.): _____ Широков В.В. |  |

Задание принял к исполнению:

(Ф.И.О. студента): _____ Тимаков Е.В. |  |

АННОТАЦИЯ

Тимаков Е.В. Совершенствование технологии правки рельсов типа Р65 на ПАО «ЧМК» в прокатном цехе №3 на универсальном рельсо-балочном стане. Выпускная квалификационная работа (диссертация) – Челябинск: ЮУрГУ, 2016 г. – 59 с., 15 рис., 9 табл., библиогр. список – 17 наименований.

В данной выпускной квалификационной работе (диссертации) рассмотрена технология правки на ролико-правильной машине и на правильных прессах. Даны рекомендации по изменению режимов правки на ролико-правильной машине, рекомендации по изменению режимов правки и порезки на участке правильных прессов и сверлильно-отрезных станков «GEISMAR», проведено моделирование процесса правки в программном комплексе ABAQUS, а так же оценен экономический эффект от внедрения данного предложения.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	6
2 АНАЛИЗ ТЕКУЩЕЙ СИТУАЦИИ	12
3 ТЕОРИЯ ПРАВКИ.....	17
3.5 РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА ПРОЦЕССА РОЛИКОВОЙ ПРАВКИ	27
4 МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ АВАQUS.....	35
5 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРАВКИ НА РОЛИКО-ПРАВИЛЬНОЙ МАШИНЕ	40
7 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРАВКИ И ПОРЕЗКИ РЕЛЬСОВ НА ЛИНИИ ПРАВИЛЬНЫХ ПРЕССОВ GEISMAR.....	47
8 ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ	53
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	58

ВВЕДЕНИЕ

Рассматриваемый процесс реализуется на роликовых правильных машинах (РПМ), и на рисунке 1.1 показана принципиальная схема правки проката на такой машине. Рис. 1.1 дает самое общее представление о процессе правки, детали которого будут рассмотрены далее.

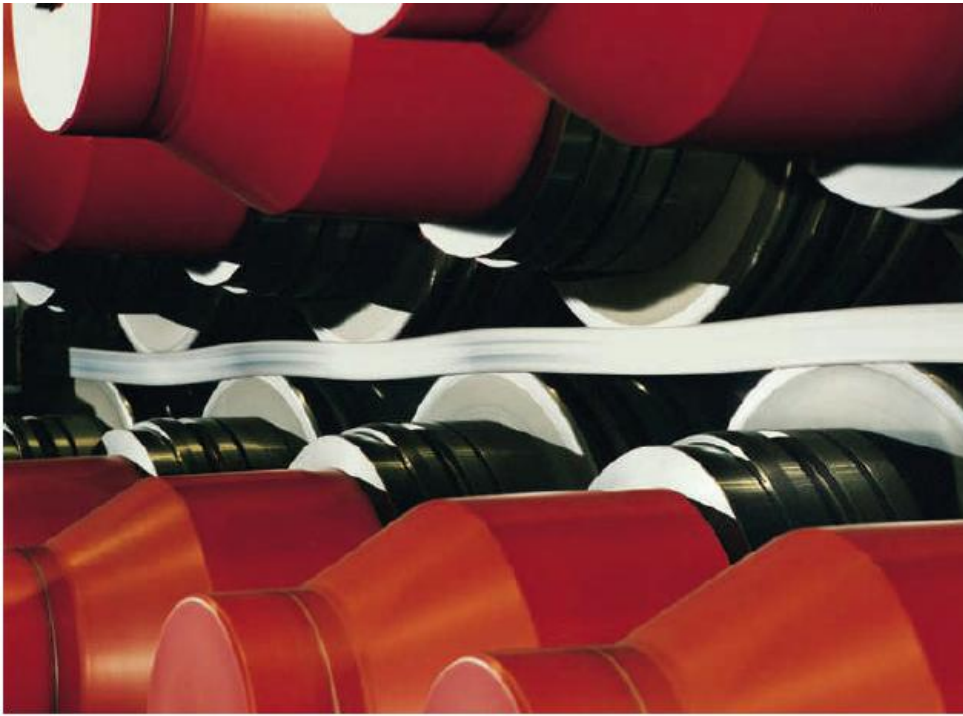


Рисунок 1 - Принципиальная схема процесса правки

В настоящее время все требования к российским железнодорожным рельсам сведены в одном стандарте.

Выполненный анализ показывает, что в рельсовых стандартах различных стран мира, подлежат контролю две основные группы свойств готовых рельсов. К первой группе относится качество рельсового металла, которое оценивается химическим анализом, контролем структуры и однородности (отсутствие несплошностей), контролем твёрдости, механических свойств при растяжении, копровыми испытаниями кусков рельсов.

Вторая группа включает качество внешней поверхности рельса: наличие поверхностных дефектов, размеры поперечного сечения, длина рельса,

прямолинейность его средней части и концов, скрученность, качество обработки торцев, болтовых отверстий и т.п.

С точки зрения влияния на выбор оборудования и технологий, на расчет и моделирование процесса роликовой правки следует выделить следующие параметры рельса, которые представлены в порядке значимости их влияния на процесс роликовой правки:

1. Производимый сортамент рельсов и номинальные размеры их поперечного сечения.
2. Механические свойства рельсовой стали (в первую очередь предел текучести и предел прочности).
3. Прямолинейность средней части подаваемых на правку рельсов и требования к этому параметру после роликовой правки.
4. Допуски на номинальные размеры поперечного сечения рельсов.
5. Скрученность рельса.

Для выполнения корректных расчетов желательно знать реальные статистические распределения этих параметров у конкретного производителя рельсов, изменение их по длине одного рельса и от рельса к рельсу, от партии к партии, а для механических свойств – их распределение по сечению рельса. Стандартами же оговариваются наиболее общие требования и предельные ограничения к разным типам и классам рельсов, методы контроля их качества. Отметим, что требования к искривленности рельсов до правки исключены из всех стандартов, хотя ранее по российским стандартам на правку допускались рельсы, имеющие равномерную искривленность не более $1/60$ длины рельса[9].

Методы измерения величины «скрута» применяются следующие:

1. По Российскому стандарту – величина зазора между одним краем подошвы торца рельса и контрольным стеллажом при положении рельса «стоя на подошве».
2. Согласно Европейскому стандарту[11], измерения «скрута» проводятся на каждом конце рельса с помощью специального

четырёхопорного шаблона длиной 1 м в точках, расположенных на обратной стороне подошвы на расстоянии 10 мм от краёв последней.

Во многих стандартах приводятся не только требования к качеству готовых рельсов, но и определенные требования к самому процессу производства. В таблице ниже представлены требования к процессам правки рельсов на роликовых машинах и прессах.

Существуют так же требования стандартов к остаточным напряжениям в готовых рельсах. В то же время следует обратить внимание на новый канадский стандарт [11], где требования к правке, остаточным напряжениям и наибольшим усилиям правки взаимосвязаны.

Таблица 1 - Требования к правке рельсов на РПМ и прессах

Россия, 2013[11]	Рельсы должны правиться на двухступенчатой роликовой машине. Чтобы поверхность катания рельсов оставалась гладкой, следует удалять окалину. Дефекты концов рельсов или локальные дефекты могут устраняться с использованием прессы. Рельсы, не удовлетворяющие требованиям по прямолинейности, можно один раз подвергнуть повторной правке на роликовой машине.
США, 2010[14]	Конкретные требования к правке рельсов не приводятся
Европа, 2011[15]	Рельсы должны правиться на двухступенчатой роликовой машине. Чтобы поверхность катания рельсов оставалась гладкой, следует удалять окалину. Дефекты концов рельсов или локальные дефекты могут устраняться с использованием прессы. Рельсы, не удовлетворяющие требованиям по прямолинейности, можно один раз подвергнуть повторной правке на роликовой машине.
Индия, 1996[16]	Холодная правка должна выполняться без удара за счёт ступенчатого увеличения давления. При прохождении рельсов через правильные ролики, рельсы должны правиться только один раз в каждом направлении. Правильные ролики не должны

	оказывать воздействия на клейма.
Канада, 2001[13]	<p>1.Правку рельсов осуществляют на роликотправильной машине, гидравлическом прессе или их комбинацией. Изготовитель отвечает за получение в письменном виде одобрения Канадскими национальными железными дорогами используемого метода правки и оборудования для выполнения всех операций правки.</p> <p>2. Изготовитель ведет запись максимальных усилий, прилагаемых при правке к каждому рельсу. Усилия прилагаемые к рельсам, подвергаемым испытаниям на остаточные напряжения, должны быть приведены в форме отчета об испытаниях на остаточные напряжения.</p> <p>3. Рельс, поврежденный при правке, имеющий трещины или повреждения-вмятины, вызванный правкой, или в процессе правки которого были слышны щелчки или треск, подлежит отбраковке.</p> <p>4. Все рельсы контролируют на наличие трещин после роликотправильной машины и/или правильного пресса. Методы контроля должны быть согласованы между железными дорогами и изготовителем.</p> <p>5. Если рельсы пропускают через роликотправильную машину более одного раза, изготовитель должен показать железным дорогам, что выполняется соответствие критериям приемки по остаточным напряжения.</p>

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Прямолинейность рельсов является одним из основных показателей их качества, влияющим на стойкость и пропускную способность железной дороги.

Ниже приведена таблица из ГОСТ Р 51685-2013 в части прямолинейности рельсов:

Таблица 2 – Разделение рельсов по классам прямолинейности согласно ГОСТ Р 51685-2013

Элемент рельса*	Направление отклонения	Класс А		Класс В		Класс С	
		d , мм	L , м	d , мм	L , м	d , мм	L , м
Основная часть рельса	В вертикальной плоскости	0,30 и 0,20	3 1	0,40 и 0,30	3 1	0,60	1,5
	В горизонтальной плоскости	0,45	1,5	0,60	1,5		
Концевая зона рельса	Длина зоны	2 м		1,5 м			
	В вертикальной плоскости вверх	0,40 и 0,30	2 1	0,50	1,5	0,70	1,5
	В вертикальной плоскости вниз	$e \leq 0,2$ мм при $F \geq 0,6$ м					
	В горизонтальной плоскости	0,60 и 0,40	2 1	0,50	1,5	0,50	1,5
Переходная зона	Длина зоны	2 м		1,5 м			
	В вертикальной плоскости	0,30	2	0,40	1,5	-	-
	В горизонтальной плоскости	0,60	2	0,60	1,5	-	-
Рельс в целом	В вертикальной плоскости	Для рельса длиной более 25 м, лежащего на подошве или на головке, зазор d не более 10 мм					
	В вертикальной и горизонтальной плоскостях	Стрела прогиба не более 1/2500 длины рельса		Стрела прогиба не более 1/2200 длины рельса			

* Элементы рельса приведены в приложении Е.

Примечание – Обозначения:

d – нормируемая величина отклонения (стрелы прогиба, зазора);

L – базовая длина, для которой установлена нормируемая величина отклонения;

e – нормируемая величина отклонения конца рельса вниз;

F – расстояние от торца до начала отклонения конца рельса вниз.

Для оценки прямолинейности обычно применяется метод измерения прогиба рельса относительно контрольной линейки, имеющей длину 1,0 м, 1,5 м, 2,0 м или 3,0 м. Причем контролируется наибольший прогиб (зазор) между контрольной линейкой и соответствующей поверхностью рельса. Общая прямолинейность рельса складывается из прямолинейности его средней части и концевых участков, длина которых обычно равна длине применяемой линейки. Различают прямолинейность рельса в плоскости большей жесткости, которая измеряется по поверхности катания головки рельса и по нижней поверхности подошвы, прямолинейность рельса в плоскости меньшей жесткости (измеряется по обеим боковым поверхностям головки) и скрученность рельсов.

Прямолинейность средней части рельса зависит от изменения продольной кривизны по длине рельса, наличия местных изломов или местных концентраторов кривизны, наличия и глубины местных дефектов, точности прокатанного профиля, скрученности. Прямолинейность концевых участков кроме этого зависит от местного подгиба торцев (так называемых «крючков»), смятия торцев на головке и подошве (так называемая «фаска» из-за захода рельса в ГРПМ), наличия перепадов высоты («ступенек»), искривленности переходных концевых участков.

Формируется прямолинейность рельсов на всех переделах прокатного производства, начиная с нагрева под прокатку. Однако основной вклад принадлежит роликовым правильным машинам (РПМ) и прессам для правки концов, которые стоят практически в самом конце любого рельсопрокатного цеха. Поэтому предлагаемая классификация факторов, влияющих на прямолинейность рельсов, основана именно на отношении рассматриваемых факторов к процессу правки.

Рассматривая этот сложный вопрос, предлагается выделять 6 основных групп параметров и факторов, из которых 2 группы характеризуют весь цикл и существующий уровень производства рельсов до их правки, а остальные 4 группы параметров относятся непосредственно к правке рельсов [1].

Факторы, влияющие на прямолинейность готовых рельсов:

- статистический разброс прямолинейности рельсов до правки;
- статистический разброс значений механических свойств, высоты и других геометрических размеров поперечного сечения рельсов до правки;
- основные неизменяемые параметры рельсоправильного оборудования;
- характеристики применяемой технологии правки;
- параметры оборудования и технологической оснастки, которые влияют на стабильность поддержания технологического режима правки;
- автоматизация процесса правки и контроля прямолинейности готовых рельсов.

К первой группе параметров относятся показатели прямолинейности рельсов до правки, а точнее – отклонения от среднего значения прямолинейности рельсов по его длине и от рельса к рельсу. Прямолинейность подлежит непосредственному улучшению в процессе правки, и поэтому чем меньше будет её разброс до правки, тем более стабильным будет процесс правки и тем более высокой прямолинейности можно достичь на готовых рельсах при прочих равных условиях. Наличие большого разброса искривлённости рельсов до правки, и особенно плохо выправляемых местных изломов, говорит о нестабильности, недостатках или нарушениях существующей технологии производства, а так же о предельной изношенности оборудования, имеющегося до правильных машин.

Ко второй группе параметров относится разброс значений механических свойств, высоты и других геометрических размеров поперечного сечения вдоль длины рельса и от рельса к рельсу. Дело в том, что выбор режима правки и настройка правильных машин выполняются исходя из средних значений этих параметров. Поэтому отклонение механических свойств, высоты и других геометрических размеров поперечного сечения рельсов от средних значений влияет на изменение основных параметров процесса правки. Вследствие этого

ухудшается стабильность процесса, и следовательно, прямолинейность выправленных рельсов.

К третьей группе относятся основные, неизменяемые параметры рельсоправильного оборудования: количество, шаг и диаметры рабочих роликов, диапазон скоростей правки, тип и мощность привода, допускаемые радиальные и осевые усилия правки при статической и динамической работе машины, количество нерегулируемых роликов, заложенный диапазон регулировок роликов или бойков, тип привода прессы и т.п. Эти параметры определяют диапазон технологических возможностей оборудования, внутри которого возможно искать оптимальные технологические решения. Они накладывают и непосредственные ограничения на прямолинейность выправленных рельсов. Так, например, шаг роликов РПМ определяет длину невыправляемых, пластически недеформируемых концов рельсов, участков некачественной правки и местоположение «ступенек».

К четвёртой группе относятся параметры, характеризующие применяемый технологический режим правки рельсов. Среди этих параметров:

- распределение радиальных прогибов рельса вдоль роликовой машины;
- использование обычного [2], комбинированного [3], безмоментного [3], универсального [2], идеального [3] или других способов правки;
- возможность использования повторной правки и смазывания бандажей;
- значения осевых перекрытий калибров РПМ;
- диаметры и форма используемых бандажей;
- скорость правки;
- форма бойков прессы;
- допускаемые величина прогиба рельса под бойком прессы и место приложения бойка относительно торца;
- допускаемая неравномерность износа бойков прессы и бандажей роликов по их окружности и вдоль образующей.

Хорошо подобранные режимы способны обеспечить более высокую стабильность правки и более высокое качество выправленных рельсов.

К пятой группе параметров относятся такие конструктивные параметры оборудования и технологической оснастки, которые влияют на отклонение технологического режима или прогибов рельса внутри РПМ (пресса) от заданных значений. К таким параметрам относятся величины люфтов и жёсткость всей системы машины, биение и эксцентриситет правильных роликов и бандажей, прочность и износостойкость бандажей роликов и бойков прессы.

К последней, шестой группе факторов, относится наличие автоматизированных средств измерения и контроля прямолинейности рельсов, а также уровень автоматизации процессов правки рельсов на РПМ и прессах. Развитость этих систем позволяет организовать более оперативную обратную связь, своевременно выявлять и устранять причины ухудшения прямолинейности готовых рельсов, а следовательно, увеличить процент рельсов с повышенной прямолинейностью. Важным фактором является возможность организации рассортировки рельсов на разные классы по прямолинейности.

Если суммировать указанные выше группы факторов, влияющих на прямолинейность готовых рельсов, то получается, что прямолинейность рельсов определяется следующим:

- составом всего оборудования и существующей схемой производства рельсов в целом;
- степенью изношенности всего оборудования рельсобалочного стана и установки термоупрочнения, объемом и оперативностью их ремонта;
- существующим уровнем технологии и технологической дисциплины в РБЦ;
- конструкцией правильных машин и принятой технологией правки;

- наличием средств автоматизации процесса правки и средств контроля прямолинейности готовых рельсов.

Отдельно необходимо выделить особенности, связанные с органическими недостатками правки концов рельсов на роликовых правильных машинах и прессах, которые возможно устранить, только отрезая концы рельсов после правки.

На каждом конце проката после правки появляются два участка. Первый участок примыкает к торцу, имеет длину примерно $0,7x$ (шаг ролика), и РПМ в принципе не может создать в нём пластические деформации, поэтому этот участок полностью не правится. Второй участок располагается между первым участком и серединой рельса, является переходным, имеет длину примерно $1,0 \dots 1,5x$ (шаг ролика) и правится не совсем качественно.

Ситуация осложняется тем, что прямолинейность концов несколько ухудшается в самом процессе правки за счёт появления, «накатывания» так называемых «ступенек» (перепада высоты рельсов), которые связаны с изменением усилия правки по мере захода переднего конца рельса в ГРПМ и по мере выхода заднего конца рельса из машины. При обычном способе правки накатывается 4 «ступеньки» (2 на переднем и 2 на заднем концах рельса). Так, на НТМК величина их составляла 0,1-0,5 мм на нетермообработанных рельсах и увеличивалась в некоторых случаях до 0,9 мм при правке термоупрочненных рельсов. При внедрении безмоментного способа правки, накатывается 2 «ступеньки» (по одной с каждого конца рельса), а величина их равна 0,05 – 0,2 мм на нетермообработанных рельсах и увеличивается на 0,1 – 0,2 мм при правке термоупрочненных рельсов. Причём из-за влияния динамических процессов «ступеньки» более заметны на переднем конце рельса, чем на заднем [1].

2 АНАЛИЗ ТЕКУЩЕЙ СИТУАЦИИ

Ниже приведена принципиальная схема горизонтальной роlikо-правильной машины, установленной на ПАО «ЧМК» в Прокатном Цехе №3.

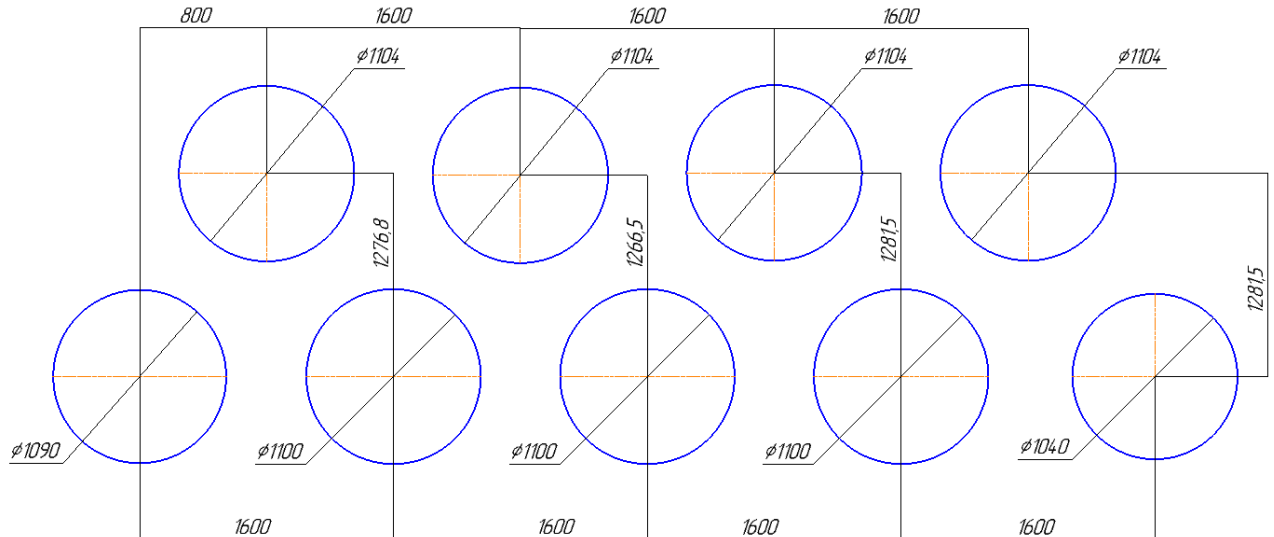


Рисунок 2 – Принципиальная схема горизонтальной роlikо-правильной машины

С начала освоения рельсового профиля Р65, имела место проблема с получением необходимого класса прямолинейности. Стан был спроектирован и построен, в основном, для получения рельсов ДТ350СС для железнодорожных путей совмещенного скоростного движения, которые по ТУ 0921-231-01124323-2014 должны иметь класс прямолинейности «А». Основные проблемы в получении данного класса прямолинейности оставались за правильной машиной и правильными прессами, так как окончательную прямолинейность рельсу придают именно на этих двух участках. Изначально, рельсы правились по технологии, предложенной фирмой DANIELLI. Режим правки приведен в таблице 3:

Таблица 4- Режим правки в ГРПМ по версии фирмы DANIELLI

Номер ролика	№ 2	№ 4	№ 6	№ 8
Уставка	10.0	10.0	4.0	-2.0

Как позже выяснилось на практике, после приемосдаточных испытаний стана – данный режим не обеспечивает необходимую прямолинейность и

остаточные напряжения в рельсах. В процессе моей работы на ПАО «ЧМК», а так же в прокатном цехе №3 был проведен ряд работ, направленных на улучшение технологии правки.

Так был внедрен и освоен на практике безмоментный способ правки [1], сущность которого заключается в уменьшении усилий правки, за счет уменьшения контактных диаметров крайних нижних роликов правильной машины. Так на ПАО «ЧМК» диаметр первого ролика был уменьшен на 10 мм, а диаметр 9 ролика на 60 мм. Безмоментный способ[1] позволил уменьшить остаточные напряжения в рельсах до необходимой величины раскрытия паза в 2 мм. На графике представлены данные по остаточным напряжениям:

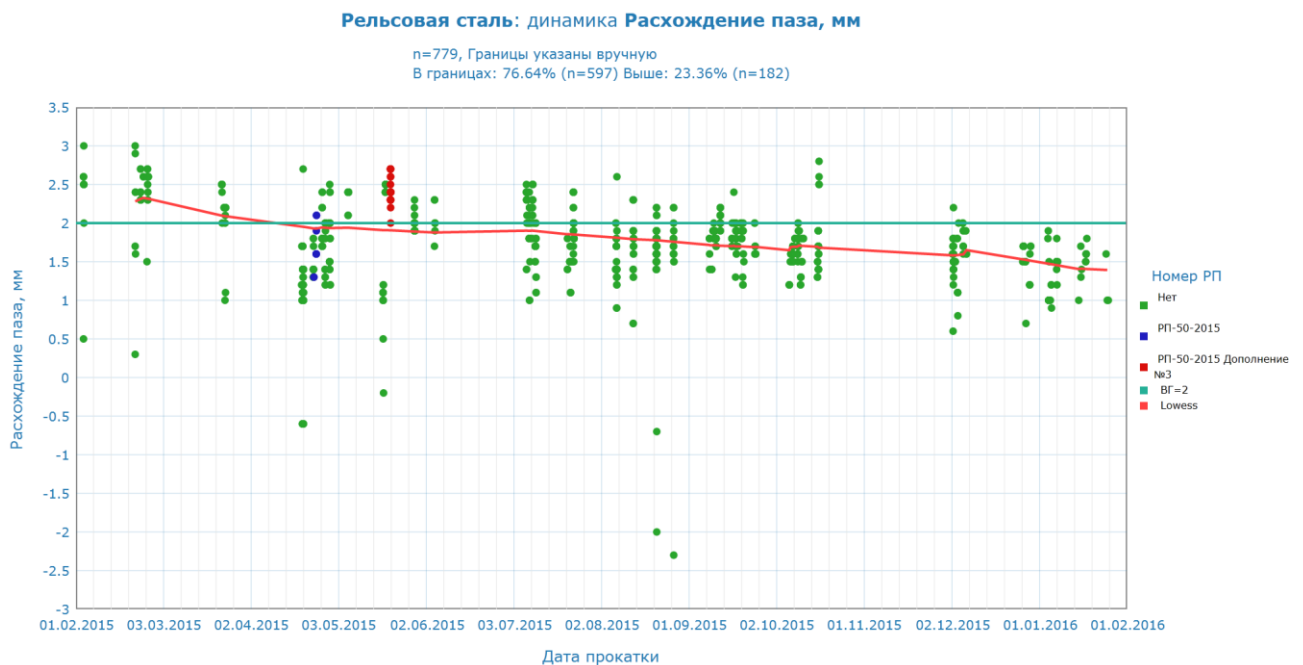


Рисунок 3 - Остаточные напряжения в рельсах.

Как видно из графика, в декабре, после окончательного внедрения безмоментного способа правки рельсов, остаточные напряжения стали удовлетворять ТУ 0921-231-01124323-2014.

Так же на протяжении периода с сентября по декабрь 2015 подбирались оптимальные режимы правки. Как известно из теории правки, для того, чтобы поправить рельс, необходимо создать определенные усилия для его пластической деформации.

После подбора режимов на ГРПМ, в промежутке с сентября 2015 года по декабрь 2015, было разработано и проведено несколько рабочих планов, согласно которым, были получены данные для статистического анализа прямолинейности рельсов.

Так же, на данном этапе были разработаны 3 модели, для расчета усилий правки:

1. Теоретическая модель, для быстрого определения и оценки необходимых усилий на правильной машине, для пластической проработки профиля.

2. Компьютерная модель в программном комплексе ABAQUS, которая позволяет при расчетах оценить степень прямолинейности рельса, усилия правки и остаточные напряжения в рельсе.

3. Компьютерная модель в программном комплексе QForm, которая создавалась совместно со специалистами ОАО «РосНИТИ», которая позволяет оценить усилия правки и прямолинейность рельса.

Так как теория правки является малоизученной областью ОМД, а расчеты возможной прямолинейности и остаточных напряжений занимают слишком много времени, на предприятиях металлургического дивизиона довольно редко применяют методики, рассмотренные в разделе ниже. Это объясняется тем, что для оптимального расчета правки необходим большой массив исходных данных, которые в промышленном масштабе проблематично получить. Необходимы данные по кривизне проката, общие и частные, знать остаточные напряжения, коэффициенты упругой и пластической проработки профиля, напряженно-деформированное состояние профиля. Так например, невозможно полностью оценить прямолинейность 100-метровых рельсов, по причине наследственности. На каждом отдельно взятом рельсе мы имеем разные величины остаточных напряжений, разную прямолинейность и общий прогиб потому что перед правкой на рельс влияет множество факторов, таких как:

1. Исходная заготовка;

2. Температура нагрева;
3. Скорость прокатки;
4. Закалка рельса;
5. Охлаждение рельса на холодильнике.

Все эти факторы оказывают на прямолинейность рельсов непосредственное влияние. Так же, для адекватной оценки прямолинейности рельса необходимо промерить его линейками в двух плоскостях и как минимум на 3-х базах, что в среднем на один рельс занимает около 3 часов. Этого запаса времени на промышленных предприятиях нет.

В связи со сложностью и продолжительностью расчета правки, на заводах все шире начинают применяться программные комплексы компьютерного моделирования, которые позволяют в срок от 3 часов до нескольких суток посчитать предполагаемые режимы для правки проката с точностью до 95%. Теоретические же методы занимают около 2 месяцев расчетов, по методикам приведенным ниже, и не обеспечивают требуемую степень точности.

3 ТЕОРИЯ ПРАВКИ

3.1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ОПИСАНИЕ ПРАВКИ НА РОЛИКО-ПРАВИЛЬНОЙ МАШИНЕ

Горизонтальные РПМ открытого типа имеют от 5 до 12 консольных рабочих роликов (на некоторых старых заводах сохранились машины закрытого типа, которые давно не изготавливаются для правки рельсов). Все верхние (или все нижние) ролики оснащены устройствами индивидуальной их регулировки по высоте, что позволяет реализовывать различные режимы правки. Все рабочие ролики оснащены устройствами осевой регулировки для выставления калибра роликов по оси рельса. Механическая (шпоночная) фиксация бандажа на валу рабочего ролика в последних зарубежных машинах заменяется гидрозажимами, которые резко уменьшают биение бандажей и за счёт этого повышают прямолинейность рельсов. В то же время реализация такого решения требует поставки сопутствующей гидроаппаратуры и насосно-аккумуляторных станций. Регулируемые ролики на последних зарубежных машинах обычно оснащаются месдозами, которые измеряют усилия правки. Уровень автоматизации процесса правки постоянно повышается.

В ГРПМ, как правило, применяется постоянный шаг роликов (1100-1600 мм). Изредка применяются ГРПМ с переменным шагом роликов, что позволяет при широком сортаменте стана подбирать такой шаг для каждого типоразмера проката, который соответствует рациональному соотношению усилия правки и длины направленных концов рельсов. Однако такие машины не нашли широкого применения из-за сложности оборудования и управления. В то же время имеются машины, в которых первый и последний ролики могут сдвигаться вдоль направления правки и тем самым могут изменять свой шаг для улучшения условий захвата рельса и его выдачи.

Практически все современные зарубежные рельсоправильные машины оснащены системой автоматизации, которая запоминает режимы правки

(настройку роликов) на каждом рельсе, позволяет оператору РПМ выбирать, корректировать и задавать на нажимные устройства требуемый режим правки. Обычно система фиксирует основные параметры процесса правки каждого рельса: радиальную и осевую настройку роликов, текущие и максимальные значения измеряемых усилий правки и токи главного привода[1].

3.2 ВВЕДЕНИЕ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ

Введем в рассмотрение две системы координат: глобальную « uOv », связанную с неподвижной станиной машины, и локальную « x, y, z », которая связана с произвольным сечением выправляемого проката и центр которой находится в центре тяжести рассматриваемого сечения. При этом, координата x соответствует ширине проката, координата y его высоте, а координата z направлена вдоль длины выправляемого проката, то есть она перпендикулярна плоскости рассматриваемого сечения.

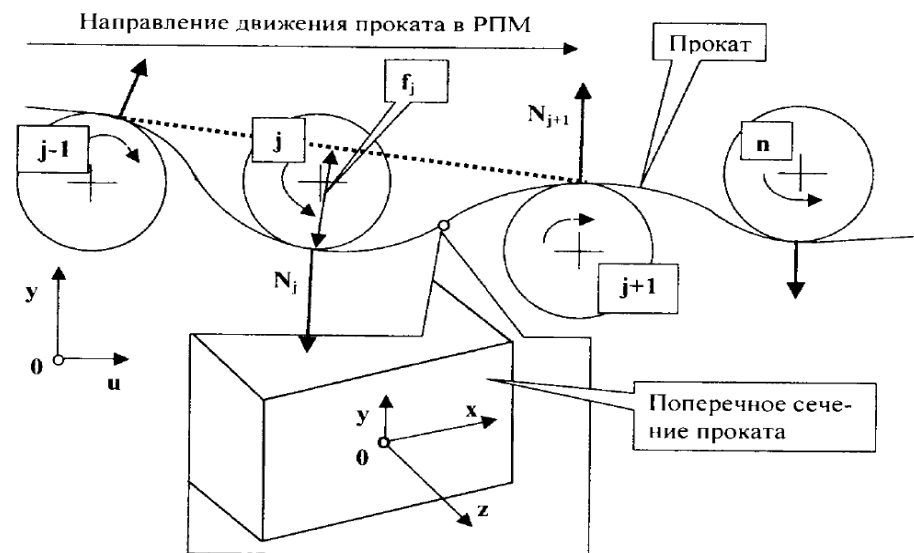


Рисунок 4 – Система координат в теории правки

3.3 ВВЕДЕНИЕ СИСТЕМ ДОПУЩЕНИЙ И УПРОЩЕНИЙ

Ролики машины первоначально настраиваются с помощью имеющихся нажимных устройств, исходя из необходимых технологических условий. Затем включается привод вращения роликов, и в машину задаётся прокат, который необходимо выправить. Вращающиеся ролики протаскивают прокат через машину и одновременно обеспечивают знакопеременный упругоэластический изгиб проката в плоскости правки.

Наибольшие изгибные упругоэластические деформации проката реализуются в точках контакта с правильными роликами. Везде далее будем применять термин «точка контакта» проката с роликом, хотя более корректно было бы говорить о линии контакта, которая параллельна оси вращения ролика. Применение исторически устоявшегося термина «точка контакта» оправдано тем, что обычно и часто мы не будем рассматривать третье направление глобальной системы координат (вдоль ролика).

Для того чтобы понять, что происходит с прокатом и оборудованием машины во время правки, следует начать с основных зависимостей между деформациями и напряжениями при одноосном растяжении-сжатии металла.

Как известно, при постепенном увеличении деформации растяжения металлического образца, сначала происходит его упругое деформирование, а затем пластическое. Кривая деформирования может иметь выраженную площадку текучести или не иметь её.

Математически зависимость напряжения от деформации в упругой области не представляет никаких трудностей, так как является линейной[2]:

$$\sigma_e = E_1 * \varepsilon, \quad (1)$$

где σ_e – упругое напряжение в образце, Мпа;

E_1 – модуль упругости, Мпа;

ε – относительная деформация образца.

В пластической области нагружения используются в основном три способа описания зависимости «напряжение – деформация». В модели жестко –

пластического тела напряжения принимаются постоянными и равными пределу текучести σ_s независимо от деформации[2]:

$$\sigma_p = \pm\sigma_s, \quad (2)$$

Где σ_p – напряжение при пластическом деформировании образца («+» относится к растяжению, а «-» - к сжатию образца).

В модели тела с линейным упрочнением принимается, что напряжения линейно нарастают при увеличении деформаций[2]:

$$\sigma_p = \pm\sigma_s + E_2 * (\varepsilon - (\pm\varepsilon_s)), \quad (3)$$

где E_2 – модуль упрочнения металла, Мпа;

ε_s - деформация, соответствующая пределу текучести и определяемая по формуле[4]:

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_1}, \quad (4)$$

В модели тела со степенным упрочнением принимается более сложная зависимость[3]:

$$\sigma_p = \pm\sigma_s + b * (\varepsilon - (\pm\varepsilon_s))^\alpha, \quad (5)$$

где b, α – эмпирические коэффициенты.

Таким образом, зависимость $\sigma = f(\varepsilon)$ состоит из трёх участков, и например, для модели тела с линейным упрочнением имеет вид[1]:

$$\sigma = f(\varepsilon) = \begin{cases} +\sigma_s + E_2 * (\varepsilon - \varepsilon_s), & \text{при } \varepsilon > \varepsilon_s \\ E_1 * \varepsilon, & \text{при } |\varepsilon| < \varepsilon_s \\ -\sigma_s + E_2 * (\varepsilon + \varepsilon_s), & \text{при } \varepsilon < -\varepsilon_s \end{cases}, \quad (6)$$

Отметим, что во всех рассмотренных моделях, функция $\sigma = f(\varepsilon)$ является симметричной, то есть принимается, что первое сжатие происходит по зависимости, которая с точностью до знака совпадает с зависимостью для первого растяжения.

При правке проката происходит знакопеременное нагружение его каждого волокна, то есть каждое волокно после растяжения подвергается сжатию, а после сжатия – растяжению и так далее. Поэтому для описания

процесса правки наиболее важно знать поведение металла при знакопеременном нагружении.

Наиболее простым является общепринятое допущение, что после одноосного растяжения и разгрузки (снятия нагрузки или напряжения) металл «помнит» только остаточную деформацию и полностью «забывает» наибольшие активные и остаточные напряжения, при которых были достигнуты наибольшие деформации. Поэтому вышеуказанные формулы будут справедливы при втором и последующих нагружениях, если вместо величины ε , использовать разность « $\varepsilon - \varepsilon_{ост}$ », где $\varepsilon_{ост}$ – остаточная деформация от предыдущего нагружения[1]:

$$\varepsilon_{ост} = \varepsilon_{max} - \frac{\sigma_{max}}{E_1}, \quad (7)$$

Где $\sigma_{max}, \varepsilon_{max}$ – экстремальные напряжение и деформация, достигнутые при предыдущем нагружении, после которого знак нагружения сменился.

Более корректной является обобщенная модель среды Мазинга, в которой при каждом последующем нагружении другого знака напряжения рассчитываются по более сложной формуле[3]:

$$\sigma = \sigma_{max} - \mu_2 * f * ((\varepsilon_{max} - \varepsilon) / \mu_2) , \quad (8)$$

где f – функция зависимости «напряжение – деформация», принятая для первого нагружения;

$$\sigma_{max} = f(\varepsilon_{max}); \quad (9)$$

μ_2 – коэффициент Мазинга.

В работах по экспериментальному обоснованию модели среды Мазинга отмечено хорошее совпадение с экспериментальными данными при малых деформациях, составляющих несколько упругих, что характерно именно для процесса правки проката.

Коэффициент μ_2 – определяется экспериментально, в общем случае зависит от номера нагружения, но обычно принимается равным двум, как и было первоначально предложено Мазингом. На рисунке 2, для примера показана модель Мазинга для упруго-пластической среды с линейным

упрочнением и $\mu_2 = 2$. Для сравнения пунктиром показана общепринятая модель, описание которой приведено выше.

Основное достоинство модели Мазинга заключается в том, что она позволяет учесть снижение предела текучести при повторных нагружениях или эффект Баушингера. Кроме этого появляется возможность устранить допущение предыдущей модели среды, то есть построить модель правки, учитывающую влияние напряжений от предыдущего изгиба σ_{max} и остаточных напряжений на напряженно-деформированное состояние (НДС) проката при последующих изгибах.

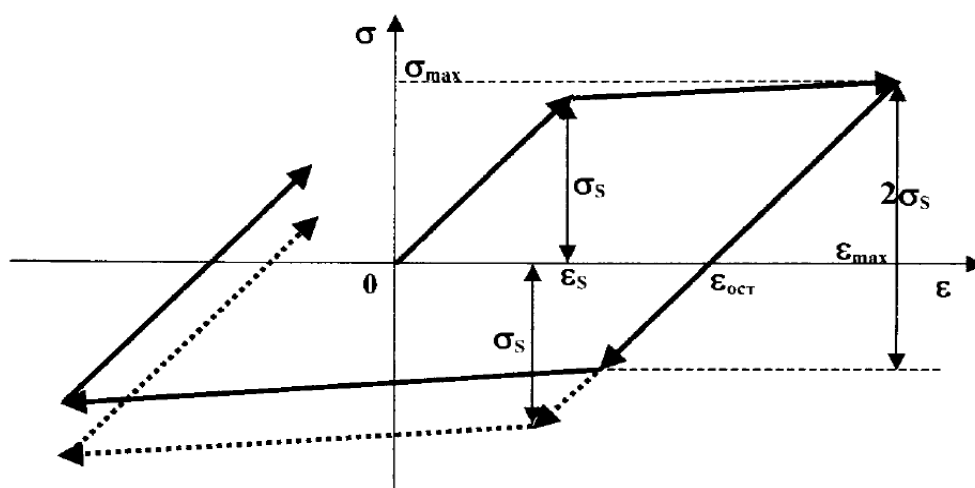


Рисунок 5 - Модель среды Мазинга[5].

В последних работах эту модель среды называют моделью с классическим билинейным кинематическим упрочнением[1].

3.4 ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПРОЦЕССА ПРАВКИ

Практически все прикладные методики расчета процесса правки основаны на двух основных допущениях, которые позволяют резко упростить исследования и получить не только быстродействующие программы расчета, но и понять физику протекающих процессов.

В соответствии с гипотезой плоских сечений принимают, что любое плоское сечение, проведенное внутри проката, остаётся плоским при любом его

изгибе. Второе допущение касается предположения одноосности напряженно – деформированного состояния (НДС) при правке и заключается в том, что при правке рассматриваются только продольные деформации и напряжения, направленные вдоль проката. Все остальные составляющие тензора напряжений и деформаций принимаются равными нулю. Продольными считаются напряжения и деформации, действующие вдоль оси z в локальной системе координат.

Так как остальные составляющие тензора напряжений и деформаций, действующие в плоскости рассматриваемого сечения, отсутствуют и действует гипотеза плоских сечений, то сечение сохраняет свою форму во время всего процесса правки. Поэтому достаточно последовательно рассмотреть поведение и НДС одного сечения при прохождении через РПМ. При этом траектория движения любой точки поперечного сечения проката будет повторять траекторию, по которой движется точка центра тяжести этого сечения внутри РПМ.

В дальнейшем, под термином «траектория проката» будем понимать траекторию, которую описывает в глобальной системе координат точка центра тяжести рассматриваемого сечения проката при его изгибе и движении через ролики правильной машины.

Основным понятием теории изгиба и правки проката является понятие «кривизна изгиба проката», подойти к которому можно двумя способами.

При первом подходе, рассматривается математическое описание «траектории проката», где каждая точка плоской криволинейной линии, помимо глобальных координат (u, v) и угла наклона траектории β к оси ординат « Ou » характеризуется кривизной χ [7]:

$$\chi = \frac{d\beta}{ds}, \quad (10)$$

где S – длина криволинейной дуги вдоль рассматриваемой траектории;

β – угол наклона траектории к оси ординат, определяемый из уравнений:

$$\sin(\beta) = \frac{dv}{ds}, \quad (11)$$

$$\cos(\beta) = \frac{du}{ds}. \quad (12)$$

При этом положительная кривизна χ соответствует увеличению угла β при увеличении дуги S .

Для примера, траектория, которая описывается прямой линией, имеет нулевую кривизну в любой своей точке, для окружности радиуса R кривизна $\chi = 1/R$. В работах Целикова А.И. и ВНИИметмаша[5] принято кривизну обозначать как « $1/\rho$ », где ρ – радиус кривизны «траектории проката».

При втором подходе, рассматривается изгиб произвольного плоского поперечного сечения проката малой толщины dS , находящегося внутри РПМ. На рисунке 3.2, верхние волокна растягиваются, а нижние сжимаются прямопропорционально расстоянию до центра тяжести u , так как граничные сечения (левое и правое) должны оставаться плоскими по гипотезе плоских сечений.

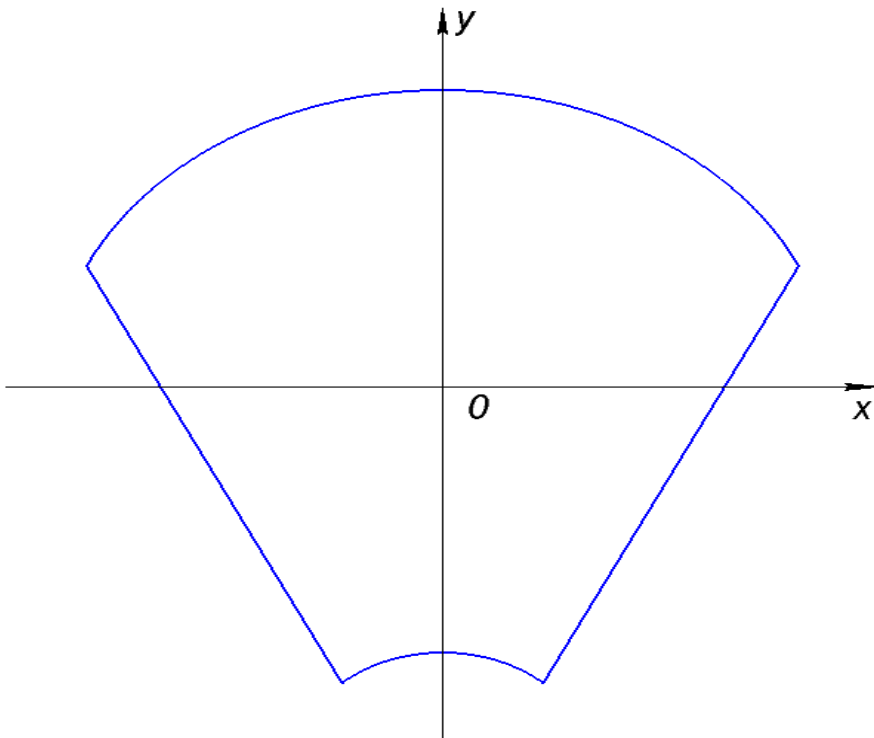


Рисунок 6 - Схема растяжения и сжатия волокон при правке

Поэтому продольные деформации ε в любом волокне линейно зависят от локальной координаты u [5]:

$$\varepsilon = \chi * u * \varepsilon_w \quad (13)$$

где χ – коэффициент пропорциональности, который и называется текущей кривизной проката;

ε_u – текущее удлинение оси центра тяжести, которое появляется при одновременном воздействии растяжении или при пластическом изгибе несимметричного сечения проката.

Таким образом, кривизна изгиба рассматриваемого сечения проката χ является связующим звеном между траекторией изгиба проката и продольными деформациями в рассматриваемом сечении. Отметим, что кривизна сечения меняется вдоль РПМ и зависит от того места внутри машины, где находится рассматриваемое сечение.

При отсутствии величины ε_u получаем, что[5]:

$$\chi_s = \frac{\sigma_s}{(E_1 * |y_{max}|)}, \quad (14)$$

где χ_s – предельно упругая кривизна изгиба проката, при которой напряжения на крайне – удаленной от центра тяжести поверхности проката достигают величины σ_s ;

y_{max} – вертикальная координата уточки сечения, максимально удаленная от центра тяжести или от центра локальной системы координат.

Очень часто в рассмотрение вводится относительная кривизна проката[5]:

$$\tilde{\chi} = \frac{\chi}{\chi_s}, \quad (15)$$

Понятно, что величина $\tilde{\chi}$ при упругом деформировании проката меньше 1, а при появлении зон пластического деформирования – больше 1.

При рассмотрении формы проката перед или после правки обычно оперируют величиной наибольшего прогиба f_L , измеренного на базе L . Для того, чтобы перейти к наибольшей или наименьшей кривизне этого проката (или обратно к прогибу f_L), рекомендуется использовать следующую приближенную формулу[8]:

$$\chi = \frac{a * f_L}{L^2}, \quad (16)$$

где коэффициент «а» зависит от способа представления формы проката:

$a = 8$, если форма проката близка к дуге окружности;

$a = 2 \cdot \pi^2 = 19,72$, если форма проката близка к синусоиде[1].

Везде далее принимается $a = 8$, если не оговорено обратное.

Для характеристики зон упругих и пластических деформаций, возникающих в прокате при кривизне изгиба χ (или $\tilde{\chi}$), вводят в рассмотрение два коэффициента[1]:

$$K_{уп} = \frac{|Y_s|}{|y_{max}|'} \quad (17)$$

$$K_{пл} = 1 - K_{уп}, \quad (18)$$

где $K_{уп}$ – коэффициент упругой деформации или коэффициент упругой зоны;

$K_{пл}$ – коэффициент пластической деформации;

Y_s – граница упругой и пластической зон деформирования, которая определяется по формуле $Y_s = |y_{max}|/|\tilde{\chi}|$.

Таким образом, коэффициент $K_{уп}$ показывает, какую часть по высоте проката занимает упругая деформация, а коэффициент $K_{пл}$ – какую часть по высоте занимают пластические деформации при рассматриваемой кривизне изгиба. Оба коэффициента изменяются от 0 до 1, так как принимается, что при упругих деформациях проката $K_{уп} = 1$, а $K_{пл} = 0$. Поэтому часто эти коэффициенты представляют в виде процентов.

Учитывая вышеприведенные формулы, коэффициент $K_{уп}$ можно определять по формулам:

$$K_{уп} = \frac{1}{\tilde{\chi}'}, \quad (19)$$

Еще одним важным показателем процесса правки считается коэффициент правки, который показывает, во сколько раз роликовая правка уменьшает диапазон кривизны проката[4]:

$$K_{пр} = \frac{\max(\chi_0) - \min(\chi_0)}{\max(\chi_{ост}) - \min(\chi_{ост})}, \quad (20)$$

где χ_0 – кривизна проката до правки;

$\chi_{\text{ост}}$ – остаточная кривизна проката после правки.

Максимум и минимум берутся как по всей длине проката, так и по всем штукам проката в одной партии. Видно, что чем больше коэффициент правки, тем лучше идет процесс правки на РПМ. Величина этого коэффициента может определяться как теоретически, так и экспериментально.

Так как кривизна прямопропорциональна прогибам $f_{\text{на}}$ фиксированной и одинаковой базе измерения L , то коэффициент правки может толковаться и как отношение соответствующих прогибов[4]:

$$K_{\text{пр}} = \frac{\max(f_0) - \min(f_0)}{\max(f_{\text{ост}}) - \min(f_{\text{ост}})}, \quad (21)$$

Иногда вместо коэффициента правки удобно пользоваться обратной величиной, которую назовем коэффициентом стабильности:

$$K_{\text{с}} = \frac{1}{K_{\text{пр}}}, \quad (22)$$

Чем меньше коэффициент $K_{\text{с}}$, тем более стабилен исследуемый режим правки к колебаниям исходной искривленности проката и тем меньше необходимо регулировать положение последнего ролика машины для получения прямолинейности готового проката в требуемых допусках.

Отметим, что эти коэффициенты отражают влияние колебаний только исходной искривленности проката и не учитывают возможных изменений других параметров процесса и свойств проката.

3.5 РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА ПРОЦЕССА РОЛИКОВОЙ ПРАВКИ

Предлагаемая комплексная методика ориентирована на расчет процесса правки рельсового сортамента. Рассматривается только точечный контакт проката с правильными роликами, что реализуется при правке толстых листов, профильного проката и рельсов. Поперечное сечение проката может быть

произвольным, а не только прямоугольным. Реализовано решение всех трех типов задач правки.

В задаче первого типа определяются все параметры правки при известном, заранее заданном взаимном расположении роликов. В задаче второго типа определяются параметры правки и настройка роликов РПМ, при которых возможно поддержание требуемых и заданных в начале расчета кривизн изгиба, остаточных кривизн или моментов изгиба под всеми роликами машины. Под параметрами правки понимаются моменты и кривизны изгиба под роликами, их распределение вдоль РПМ или значения в каждом сечении проката, усилия правки и крутящие моменты, траектория рельса внутри РПМ и углы контакта рельса с роликами. В задаче третьего типа граничные условия задач первого и второго типа смешаны, так как на части роликов известны требуемые значения кривизны проката, а для другой части роликов известны настройки.

При разработке методики использованы проанализированные достижения различных исследователей в области правки, в первую очередь, работы школ ВНИИметмаша и ОАО «УралМаш»[1].

Приняты следующие основные допущения:

1. Гипотеза плоских сечений.
2. Предположение одноосного НДС.
3. Продольные напряжения и деформации не зависят от координаты «х» проката (по ширине).
4. Контакт проката с роликами является точечным (точнее осуществляется по линии, параллельной оси вращения ролика).
5. Сталь принята в виде идеально упругопластической среды с линейным упрочнением.
6. Сталь описывается моделью среды Мазинга с $\mu_2 = 2$ [2].
7. Касательные напряжения деформируют прокат упруго и не влияют на изгибные напряжения.

8. Заранее известно соотношение между крутящими моментами на двигателях роликов, которое задаётся.

9. Вес проката внутри РПМ не учитывается.

10. Изгибающие моменты на первом и последнем роликах заранее известны и определяются стыковкой РПМ с примыкающим оборудованием.

Первые 5 допущений являются обычными: первые два из них позволяют оперировать известными понятиями – кривизна χ , момент M и осевая сила T , которые приложены в центре локальной системы координат сечения. Гипотеза плоских сечений позволяет определить траекторию только одной произвольной точки сечения профиля, например, центра тяжести или центра локальной системы координат ($y = 0$), остальные же точки сечения будут проходить по подобным траекториям. Допущение 7 позволяет, с одной стороны учесть влияние поперечной силы на прогибы рельса, а с другой стороны, не усложнить значительно задачу за счёт снятия первых трёх допущений. Допущение 8 необходимо для определения загрузки привода и усилий T_i . Отметим, что для холостых роликов это соотношение равно нулю, а для идеальных условий и индивидуального привода роликов это соотношение стремится к единице, если двигатели имеют «мягкие» характеристики. Допущения 9 и 10 в комментариях не нуждаются.

Условия равновесия внешних нагрузок и внутренних напряжений в произвольном сечении с площадью F [6]:

$$M = \iint_{Y_H}^{Y_B} \sigma(y) * y dF; \quad (23)$$

$$T = \iint_{Y_H}^{Y_B} \sigma(y) dF; \quad (24)$$

где M , T – внешние момент и продольные усилие, приложенные в точке начала локальной системы координат сечения (усилие T перпендикулярно плоскости сечения и направлено вдоль оси z).

Взаимосвязь между усилиями правки и моментом изгиба в точке с координатами (V, U) , расположенной между линиями действия усилий правки на роликах $j-1$ и j [6]:

$$M(U, V) = F_{1j} * U + F_{2j} * V + F_{3j}, (25)$$

$$F_{1j} = \sum_{i=j}^n N_i * [f_i * \sin(\varphi_i) + s_i * \cos(\varphi_i)] \quad (26)$$

$$F_{2j} = \sum_{i=j}^n N_i * [f_i * \sin(\varphi_i) - s_i * \cos(\varphi_i)] \quad (27)$$

$$F_{3j} = M_n - \sum_{i=j}^n N_i \{ [f_i * \sin(\varphi_i) + s_i * \cos(\varphi_i)] * (U_{pi} + s_i * R'_i * \sin(\varphi_i)) + (f_i * \sin(\varphi_i) - s_i * \cos(\varphi_i)) * (V_{pi} + s_i * R'_{pi} * \sin(\varphi_i)) \}, \quad (28)$$

где все суммы берутся по i от j до n;

n – число роликов в РПМ;

U_{pi} , V_{pi} – соответственно горизонтальные и вертикальные координаты центров вращения ролика i;

N_i , φ_i – усилие правки на ролике i и угол его наклона к вертикали;

$S_i = -1$; $R'_{pi} = R_{pi} - Y_v$ для верхних роликов;

$S_i = 1$; $R'_{pi} = R_{pi} + Y_n$ для нижних роликов;

$f_i = T_i / N_i$ – реализуемый коэффициент трения на ролике i;

T_i – продольная сила, передаваемая приводом ролика i к рельсу;

M_n – внешний момент на ролике n (как правило, $M_n = 0$).

Проекция сил на вертикальную ось [2]:

$$\sum_{i=1}^n N_i * \cos(\varphi_i) + T_i * \sin(\varphi_i), (29)$$

Где сумма берется по всем роликам (по i от 1 до n).

Зависимость между кривизной χ и углом наклона α к горизонтали траектории, которую описывает при правке центр поперечного сечения проката в глобальной системе координат $u0v$ [6]:

$$d\alpha = \chi * dS, \quad (30)$$

где S – криволинейное расстояние (путь) вдоль траектории центра тяжести от начала расчета до рассматриваемой точки траектории (рассматриваемого сечения).

Зависимость между углом поворота α и координатами траектории центра локальной системы координат сечения:

$$dU = \cos(\alpha) * dS, \quad (31)$$

$$dV = \sin(\alpha) * dS. \quad (32)$$

Условия при прохождении прокатом точки контакта[1]:

$$\Delta T = T_j,$$

$$\Delta \alpha = -N_j * \frac{\omega}{E_1}, \quad (33)$$

где ω – коэффициент учета поперечных сил.

$\Delta T, \Delta \alpha$ – изменение продольного усилия в сечении и угла траектории проката при прохождении точки контакта с роликом j .

Условия гладкого контакта проката и ролика j , определяемые с учетом расстояний Y_v и Y_n от центра тяжести до крайнего верхнего и нижнего края проката.

Теперь обратимся к граничным условиям. Общие граничные условия для задач правки имеют вид[1]:

$$T_{\text{входа}} = T_{\text{выхода}} = 0,$$

$$M_{\text{входа}} = M_1,$$

$$M_{\text{выхода}} = M_n,$$

$$E_n = \varepsilon_n(y),$$

где $T_{\text{входа}}, T_{\text{выхода}}$ – продольные усилия перед первым и после последнего ролика РПМ, приложенные к прокату в центре локальной системы координат сечения;

$M_{\text{входа}}, M_{\text{выхода}}$ – моменты изгиба перед первым и после последнего ролика РПМ, приложенные к прокату в центре локальной системы координат сечения;

M_1, M_n – внешние моменты изгиба проката, обусловленные воздействием веса заднего и переднего концов проката, находящихся вне РПМ, или воздействием примыкающего оборудования.

Кроме этого необходимо задать:

- механические свойства проката: E_1, E_2, σ_s ;
- форму поперечного сечения проката: Y_v, Y_n и функцию $b = b(y) = x_{\max}(y) - x_{\min}(y)$;
- радиусы R_{pj} и горизонтальные координаты центров роликов U_{pj} .

В задаче первого типа в граничных условиях в каждой точке контакта рельса с роликами (кроме первого и последнего) следует задать один из трёх параметров – момент изгиба, активную или остаточную кривизну проката. При этом вертикальные положения любых двух правильных роликов должны быть зафиксированы. В задаче второго типа граничные условия включают вертикальные координаты центров всех правильных роликов V_{pj} . В смешанной задаче третьего типа для части роликов задаются координаты V_{pj} , а для части роликов – моменты, активные или остаточные кривизны проката. Причем, общее число этой части граничных уравнений должно быть равно числу роликов.

Для решения задач любого типа выбран итерационный метод последовательных приближений. При использовании этого метода, сначала задается начальное приближение основных искомых параметров процесса, выполняется расчет, анализируются полученные невязки или несовпадения, выполняется корректировка искомых параметров процесса и расчет выполняется до тех пор, пока все невязки не будут занулены с требуемой точностью. В основе этого метода заложена методика определения траектории проката по известным усилиям правки, углам контакта и положениям роликов.

Пусть в произвольном шаге итерации нам известны усилия правки N_j , T_j , углы контакта φ_j и положения всех роликов V_{pj} . Приведем методику построения траектории проката внутри РПМ с целью последующего уточнения параметров. Рассмотрим произвольное сечение проката А-А внутри РПМ, для которого известны все параметры внутреннего состояния, а именно:

- координаты U_a , V_a и угол α_a наклона к оси O_u траектории центра локальной системы координат сечения;
- кривизна χ_a и удлинение оси центра тяжести ϵ_{ua} ;
- предыдущая история деформирования каждого волокна с координатой u в сечении А-А.

Тогда известны продольные усилия T_a и моменты M_a от внутренних напряжений в данном сечении.

Для нахождения интегралов для любого сечения используется метод Абрамова В.В.[7], развитием которого является метод конечных элементов[8]. Метод Абрамова В.В. состоит в том, что поперечное сечение профиля разбивается на ряд прямоугольников, в каждом из которых напряжения и деформации считаются постоянными. В предлагаемой методике этот метод усовершенствован в двух направлениях. Во-первых, принято, что деформации и напряжения внутри каждого элемента меняются линейно, что более корректно при принятых допущениях. И, во-вторых, при прохождении сечением точки контакта или при достижении наибольших деформаций к точкам разбиения проката по высоте автоматически добавляются новые точки, в которых наблюдается переход от упругого нагружения к пластическому. Таким образом, напряжения и деформации в рельсе меняются монотонно по высоте, по мере продвижения сечения рельса через РПМ, а сетка разбиения сечения постоянно сгущается.

Для упрощения методики перед началом расчета определяются значения моментов изгиба $M_j = M(U_{tkj}, V_{tkj})$ под всеми роликами из условия $M(U, V) = F_{1j} * U + F_{2j} * V + F_{3j}$, которые являются экстремумами. Также можно пренебречь влиянием сил трения T_j от привода и продольных сил трения на траекторию проката и его историю деформирования.

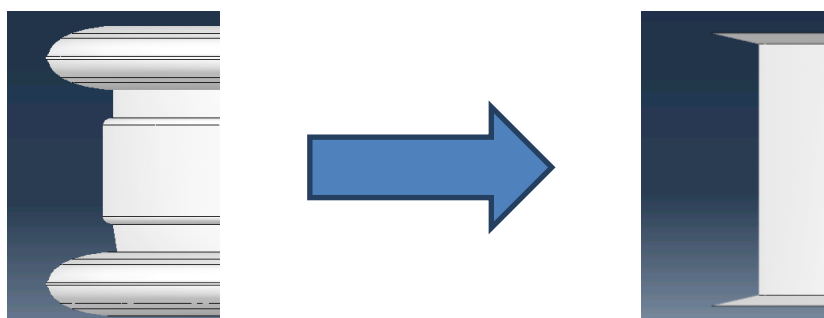
При решении задачи первого типа, под каждым роликом известен один из трёх параметров: кривизна изгиба χ_j , остаточная кривизна $\chi_{остj}$ (после ролика) или момент изгиба M_j .

При решении задачи второго типа, когда известно взаимное расположение всех роликов РПМ, условие гладкого контакта обеспечивается путём подбора усилий N_j и углов контакта ϕ_j , которые основаны на практических данных.

4 МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ABAQUS

Модели строились на основе чертежей и документации поставщика оборудования (фирма Danielli). Для ускорения расчета геометрия роликов была упрощена, за счет исключения тех элементов, которые не контактируют с поверхностью рельса.

Рисунок 7 - Упрощение геометрии роликов ГРПМ



Угловая скорость роликов рассчитывается исходя из заданной скорости правки (1,1 м/с) и их диаметра по формуле:

$$n = \frac{60V}{\pi D}, \quad (34)$$

где V – скорость правки;

D – диаметр роликов.

Начальная скорость рельса задавалась для обеспечения захвата металла роликами. Как только происходит контакт металла с роликом – условие начальной скорости отменялось и поле скоростей определялось для каждого узла в отдельности.

Так как упругопластические данные рельсовой стали в холодном состоянии определяют напряжения в теле рельса, нагрузки на ролики правильной машины, а так же геометрию рельса после правки необходимо точно задать их.

Так же для построения геометрии правильной машины и рельса использовалась программа КОМПАС 3D. Сама модель изображена на рисунке 8.

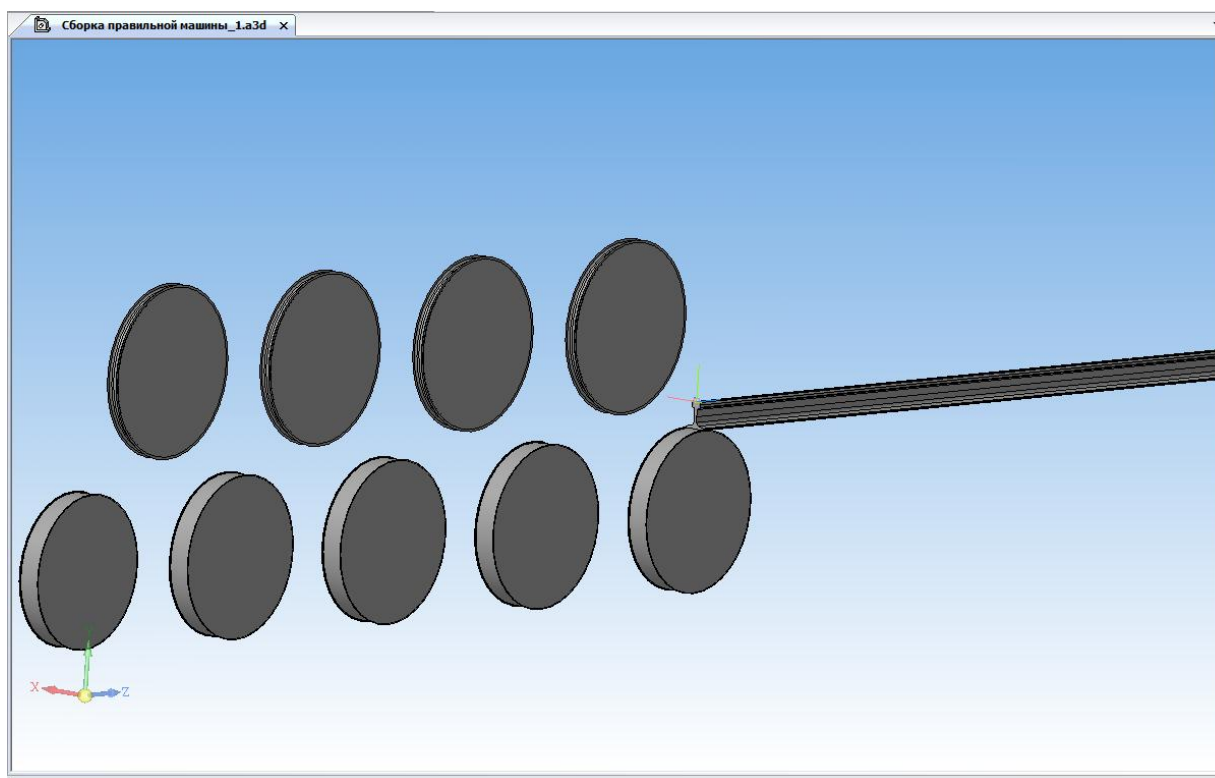


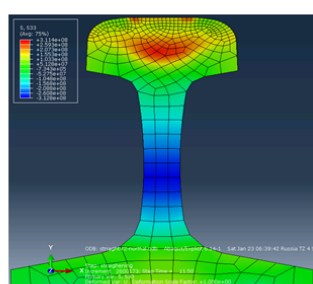
Рисунок 8 - Общий вид правильной машины для моделирования

Так же, в Abaqus были заданы следующие данные для рельса из справочной литературы [1]:

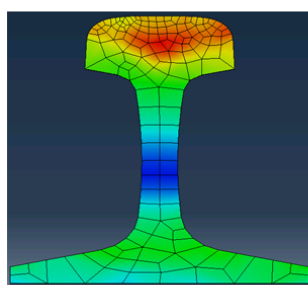
- модуль Юнга;
- коэффициент Пуассона;
- зависимость напряжений в пластической области от степени деформации.

Из-за большой продолжительности расчета процесса правки на 100 метровом рельсе, было принято решение использовать 12 метровый участок рельса, так как он удовлетворяет условиям схемы заземления рельса в правильной машине. Так же необходимо было выбрать оптимальное число конечных элементов. При большом количестве конечных элементов в модели,

продолжительность расчета увеличивается, но так же повышается и точность расчета. При малом количестве конечных элементов, процесс расчета проходит гораздо быстрее, но уменьшается точность. Необходимо было выбрать такое количество конечных элементов, которое бы удовлетворяло и по скорости расчета, и по точности результата. В итоге была выбрана модель с 18000 конечных элементов. Время расчета при данном количестве КЭ составило 12 часов. Ниже приведено сравнение моделей с разным количеством конечных элементов.



84960 элементов.
Расчет 32 ч 10 мин



17520 элементов.
Расчет 9 ч 10 мин



18000 элементов.
Расчет 12 ч

**ВЫБРАН ДЛЯ
ДАЛЬНЕЙШИХ
РАСЧЕТОВ**

Рисунок 9 - Разница времени расчета при большом и малом количестве конечных элементов

Построение модели допускает возможность расчета с тремя основными параметрами:

1. Задан исходно прямой рельс, без остаточных напряжений (такие исходные данные принято использовать при расчетах на зарубежных предприятиях). Эта методика позволяет оценить при известной кривизне и остаточных напряжениях то, как поведет себя рельс после правки на РПМ.

2. Задана исходная геометрия рельса после прокатки, а остаточные напряжения в рельсе принимаются равными «0».

3. Так же возможно использование данных, основанных на исследованиях остаточных напряжений и кривизны готовых рельсов ВНИИМетМаша и Уралмашат [1], и моделировать процесс правки опираясь на них. Однако в 1989-2000 г. в России еще не была освоена ни технология дифференцированного упрочнения головки рельса, как не было прокатки длинномерных рельсов.

Было построено 2 модели правки. Первая с известной местной кривизной рельса и литературными данными по остаточным напряжениям. Вторая с исходно прямым рельсом и без остаточных напряжений. Данные приведены на рисунке ниже.

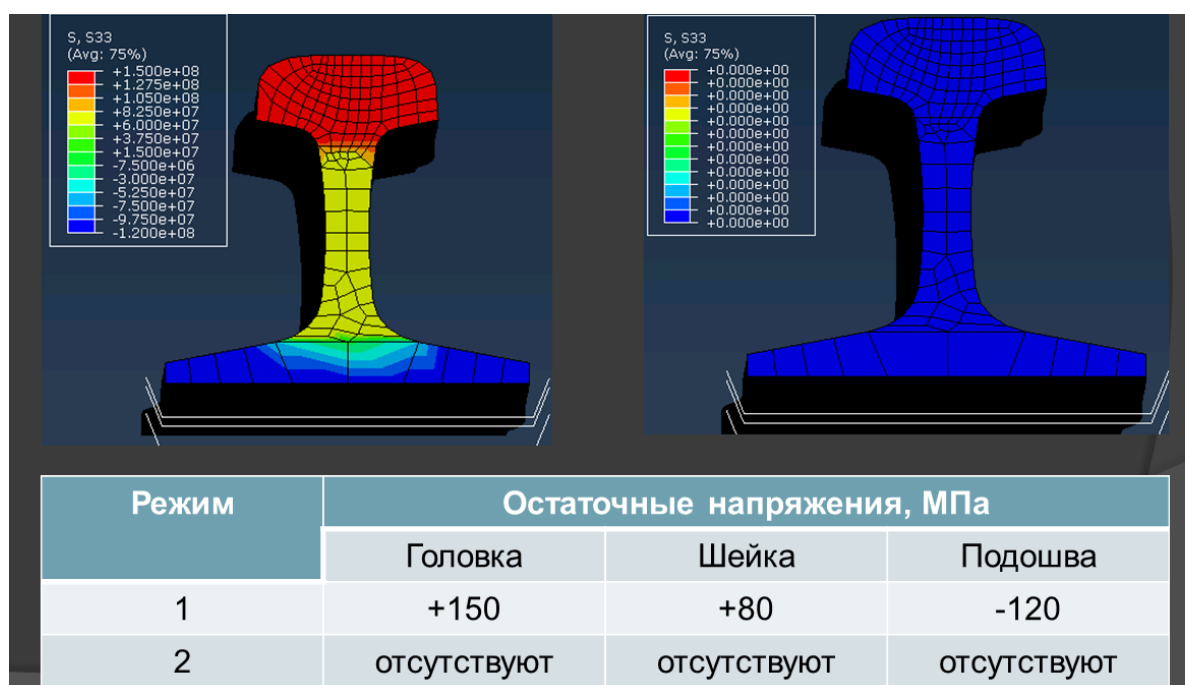


Рисунок 10 - Остаточные напряжения в рельсах

По результатам расчета двух разных моделей были сделаны следующие выводы:

1. Результаты моделирования правки сильно зависят от исходных данных. Так, отличия по прямолинейности между рельсом с остаточными напряжениями и местной кривизной и исходно прямым рельсом без остаточных напряжений существенны (Рис 11).

2. Моделирование процесса правки без остаточных напряжений с исходно прямым рельсом может использоваться в случаях настройки РПМ, для

определения поведения рельса в самом процессе правки, и после него. И для определения изменения его прямолинейности и остаточных напряжений в процессе правки.

3. Необходимо установить остаточные напряжения в рельсах непосредственно на ПАО «ЧМК», что бы модель была приближена к реальным производственным условиям.

4. В целом, данные полученные при моделировании, основанные на режимах, применяемых на ПАО «ЧМК» были удовлетворительны. Кривизна рельса после правки изменялась в пределах 0,2 – 0,35 мм, что соответствует изменениям, полученным на практике.

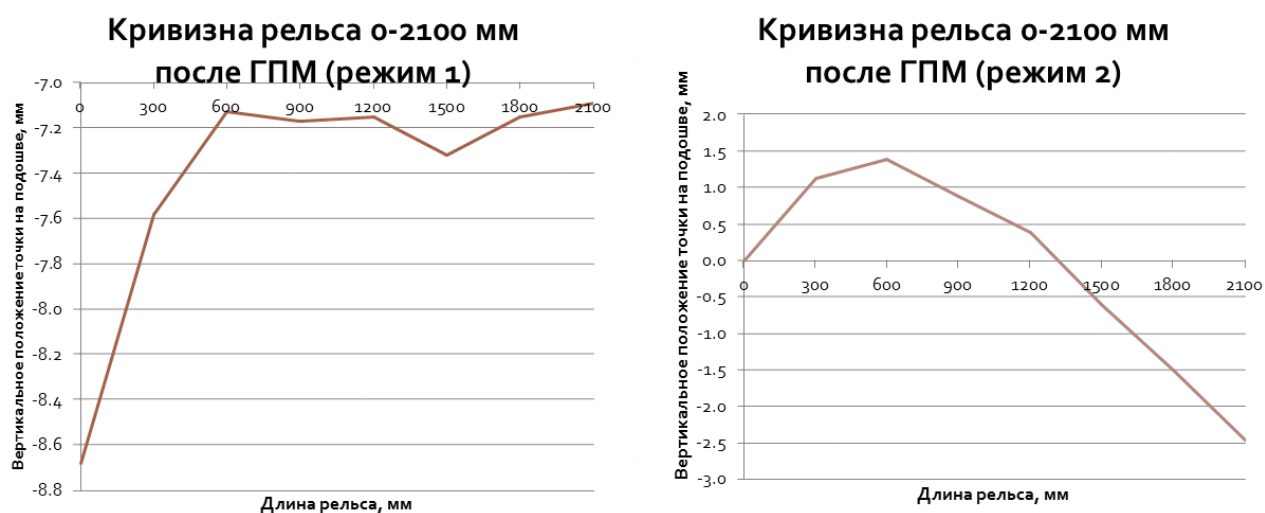


Рисунок 11 -Разница в прямолинейности рельсов, смоделированных по разным режимам.

5 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРАВКИ НА РОЛИКО-ПРАВИЛЬНОЙ МАШИНЕ

Рассмотрим подробнее основные параметры, влияющие на прямолинейность рельсов, применительно к ПАО «ЧМК».

Прямолинейность подлежит непосредственному улучшению в процессе правки, и поэтому чем меньше будет её разброс до правки, тем более стабильным будет процесс правки и тем более высокой прямолинейности можно достичь на готовых рельсах при прочих равных условиях. Наличие большого разброса искривлённости рельсов до правки, и особенно плохо выправляемых местных изломов, говорит о нестабильности, недостатках или нарушениях существующей технологии производства, а так же о предельной изношенности оборудования, имеющегося до правильных машин. На ПАО «ЧМК» отклонения от среднего значения прямолинейности рельсов по его длине и от рельса к рельсу, является наименее стабильным параметром. За период наблюдения за рельсами до правки, отклонения от среднего значения прямолинейности не составляли более чем 1 мм за все время.

Выбор режима правки и настройка правильных машин выполняются исходя из средних значений этих параметров. Поэтому отклонение механических свойств, высоты и других геометрических размеров поперечного сечения рельсов от средних значений должно учитываться при настройке основных параметров процесса правки. Вследствие отклонений механических свойств ухудшается стабильность процесса, а следовательно и прямолинейность выправленных рельсов. Данный параметр на ПАО «ЧМК» отличается стабильностью механических свойств готовых рельсов. Данные по геометрии готовых рельсов будут приведены ниже на рисунке 12. Из-за высоких требований, предъявляемых к рельсовой продукции, данный набор параметров исследуется постоянно. Разбросы фактических значений геометрических размеров поперечного сечения и механических свойств

находятся в пределах допуска, согласно ГОСТ Р 51685-2013. Данные по геометрии профиля рельса будут представлены ниже.

Так же стоит учесть неизменяемые параметры рельсоправильного оборудования: количество, шаг и диаметры рабочих роликов, диапазон скоростей правки, тип и мощность привода, допускаемые радиальные и осевые усилия правки при статической и динамической работе машины, количество нерегулируемых роликов, заложенный диапазон регулировок роликов или бойков, тип привода пресса и т.п. Эти параметры определяют диапазон технологических возможностей оборудования, внутри которого возможно искать оптимальные технологические решения. Они оказывают непосредственно влияние на прямолинейность выправленных рельсов. Так, например, шаг роликов ролико-правильной машины определяет длину невыправляемых, пластически недеформируемых концов рельсов, участков некачественной правки и местоположение «ступенек».

Ролико-правильная машина, установленная на ПАО «ЧМК» имеет 9 роликов на горизонтальной ролико-правильной машине, 7 роликов на вертикальной ролико-правильной машине. Шаг роликов на ГРПМ составляет 1600 мм, на ВРПМ 1100 мм, диаметры рабочих роликов можно варьировать от 1000 до 1180 мм. В данный момент для правки рельсов используются ролики с диаметрами: 1100 мм нижние ролики №3, 5, 7 ГРПМ, 1090 мм нижний ролик №1 ГРПМ, 1040 мм нижний ролик №9 ГРПМ, 1104 мм верхние ролики ГРПМ, 1050 все ролики ВРПМ.

Скорость правки ограничена максимальной скоростью на ВРПМ, которая составляет 1,1 м/с (для рельсов, для остального проката ВРПМ выводится из работы и скорость правки может достигать 4,5 м/с).

Автоматика при превышении 3 МН на горизонтальной ролико-правильной машине и при превышении 1,7 МН на вертикальной правильной машине выключает ток главного привода и выводит оборудование в аварийный режим работы.

Так же, автоматика выключает ток главного привода при превышении 500 кН/м на валу двигателя.

Остальные технологические параметры полностью обеспечивают производство всех необходимых профилей, предусмотренных проектом данного цеха, вне зависимости от их высоты, ширины и механических свойств.

Так же стоит учесть параметры, характеризующие применяемый технологический режим правки рельсов. Среди этих параметров:

- распределение радиальных прогибов рельса вдоль роликовой машины;
- использование различных методов правки (на ПАО «ЧМК» например используется «безмоментный» метод[1] правки, благодаря которому удалось уменьшить осевые и радиальные усилия на РПМ);
- возможность использования повторной правки и смазывания бандажей (согласно ГОСТ Р, рельс может правиться повторно единожды; возможности смазывания бандажей на ПАО «ЧМК» нет);
- значения осевых перекрытий калибров РПМ;
- диаметры и форма используемых бандажей;
- скорость правки;
- форма бойков пресса;
- допускаемые величина прогиба рельса под бойком пресса и место приложения бойка относительно торца;
- допускаемая неравномерность износа бойков пресса и бандажей роликов по их окружности и вдоль образующей.

Хорошо подобранные режимы способны обеспечить более высокую стабильность правки и более высокое качество выправленных рельсов. На данный момент оптимальные режимы по осевым уставкам подобраны и обеспечивают получение рельсов класса прямолинейности «А» согласно ГОСТ Р 51685-2013.

Стоит учитывать и такие конструктивные параметры оборудования и технологической оснастки, которые влияют на отклонение технологического

режима или прогибов рельса внутри РПМ (пресса) от заданных значений. К таким параметрам относятся величины люфтов и жёсткость всей системы машины, биение и эксцентриситет правильных роликов и бандажей, прочность и износостойкость бандажей роликов и бойков прессы.

На ПАО «ЧМК» высокий уровень автоматизации участка отделки рельсов. На нем присутствует несколько станций измерения прямолинейности и профиля рельсов, правка рельсов производится в автоматическом режиме, согласно уставкам, выставленным на пульте управления, с автоматической коррекцией отскока роликов (при незначительном смещении роликов из-за более холодного рельса или более прочного участка происходит регулировка величины прогиба, для поддержания постоянного усилия на данном ролике), а так же участком прессов, на котором оператор получает все необходимые данные о прямолинейности рельса во время правки, для лучшей проработки его сечения. Прессы настроены таким образом, что при неудовлетворительном получении на рельсе фактических значений прямолинейности, не соответствующих классу «А», рельс не отправляется дальше по линии, а правится до получения на нём класса «А».

Технологический режим правки, предложенный фирмой DANIELLI представлен в таблице 4:

Таблица 5 - Режим правки в ГРПМ по версии фирмы DANIELLI

Номер ролика	№ 2	№ 4	№ 6	№ 8
Установка ролика, мм	10.0	10.0	4.0	-2.0

По данному режиму, усилия правки распределялись следующим образом:

Таблица 6 - Усилия правки в ГРПМ по режиму фирмы DANIELLI

Номер ролика	№ 2	№ 4	№ 6	№ 8
Усилие, кН	1200	1200	800	600

На данный момент, режим правки изменен на следующий:

Таблица 7 - Разработанный режим правки в ГРПМ

Номер ролика	№ 2	№ 4	№ 6	№ 8
Установка ролика, мм	0.2	10.5	7.5	-4.5

На данный момент усилия на роликах распределены следующим образом:

Таблица 8 - Усилия правки в ГРПМ по разработанному режиму правки

Номер ролика	№ 2	№ 4	№ 6	№ 8
Уставка, кН	400	1700	1300	308

Данный режим обеспечил получение рельсов категории «В» в более чем 50% случаев. Колебания прямолинейности на рельсах составили не более 0,07 мм. Ниже представлены графики прямолинейности, полученные на разных режимах правки для наглядной демонстрации изменений.

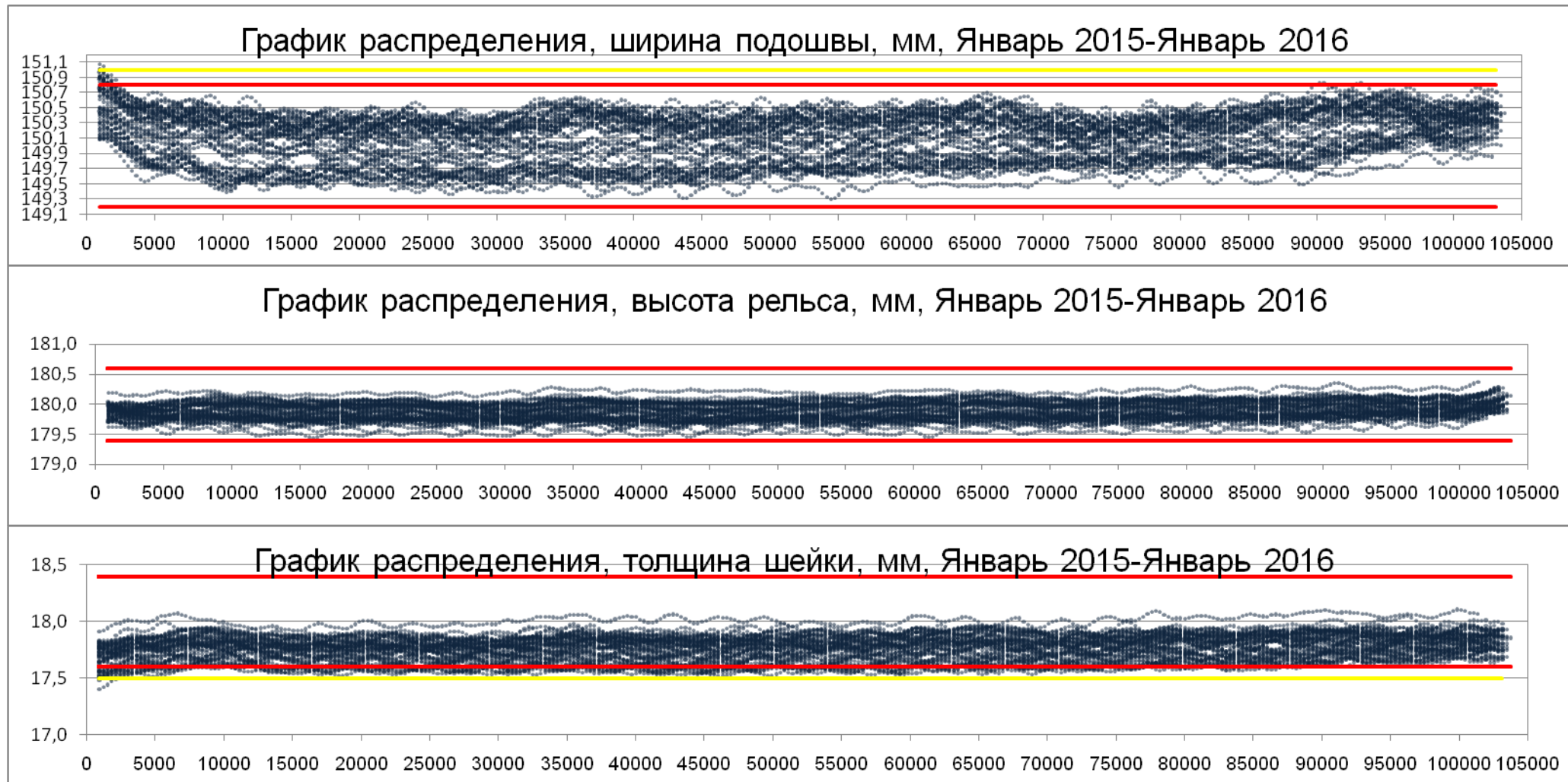


Рисунок 12 - Графики распределения геометрии профиля за период Январь 2015-Январь 2016(Красной линией обозначены допуски профиля рельса «X», желтой – профиля рельса «Y»)

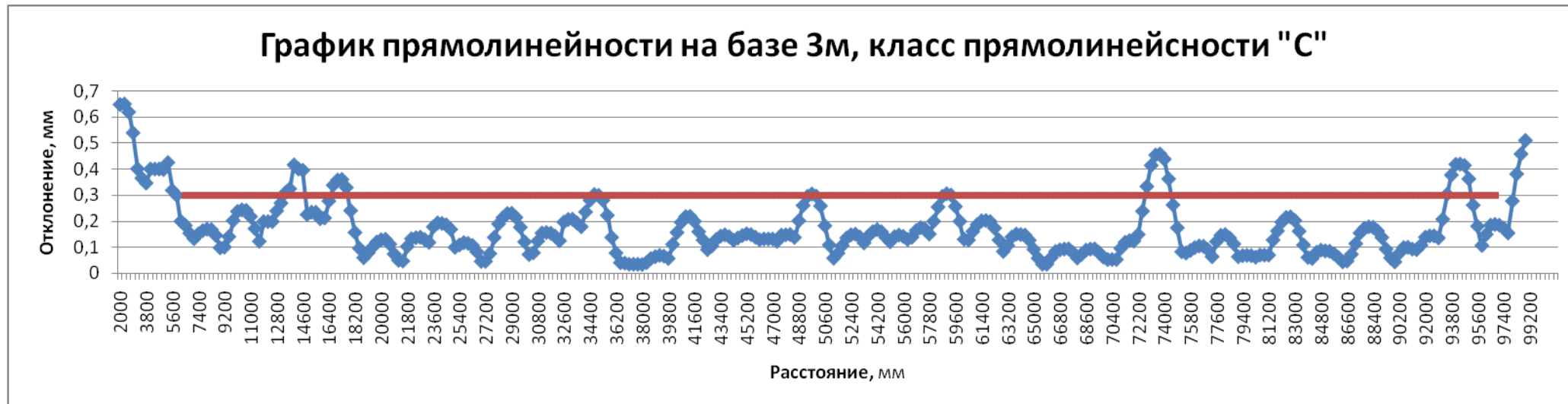
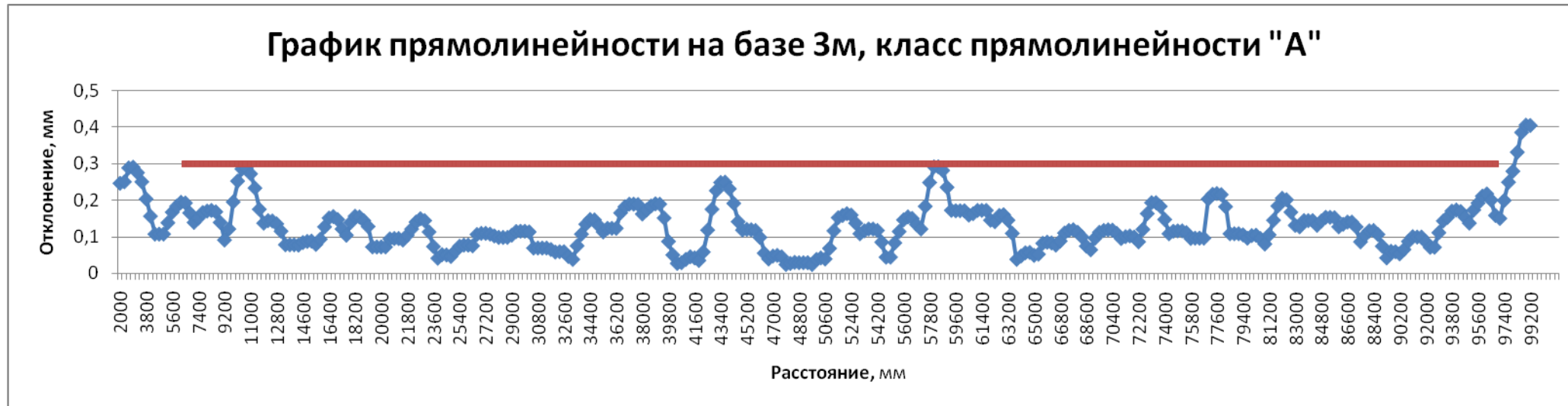


Рисунок 13 – Сравнительные графики прямолинейности для рельсов класса «А» и «С»

7 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРАВКИ И ПОРЕЗКИ РЕЛЬСОВ НА ЛИНИИ ПРАВИЛЬНЫХ ПРЕССОВ GEISMAR

После правки на правильных машинах, рельс поступает на участок отделки рельсов. Схема участка представлена на рисунке 14.

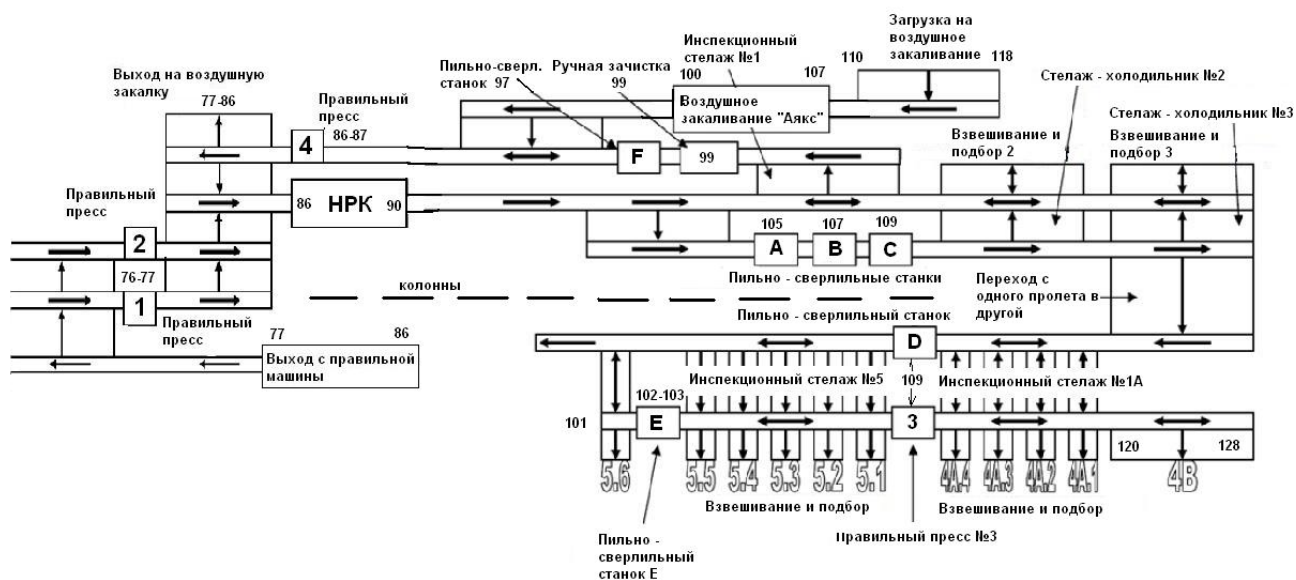


Рисунок 14 - Схема участка рельсоотделки РБЦ

Рельс, через воздушный переключатель поступает в накопитель слоев. Далее из накопителя слоев, рельс передается на правильный пресс 1 или 2. Производится правка рельса. Затем он с помощью воздушного переключателя передается на линию неразрушающего контроля НПК. После контроля годные рельсы отправляются на пильно-сверлильный станок Fc помощью роликангов и воздушных переключателей. Условно-дефектные рельсы возвращаются на линию НПК для повторного контроля. Если подтверждается дефектность рельса, его передают на пильно-сверлильные станки А-В-С, где он разрезается на мерные длины 25/12,5 м, в зависимости от того, как и в каких местах располагаются дефекты в нем. Годные рельсы, длиной 100 м, отправляются на участок взвешивания и подбора, а затем прогоняются через зеркальные комнаты где происходит их отбраковка по вмятинам, пленам и прочим прокатным дефектам с последующей отгрузкой. Рельсы длиной 25/12,5 м передаются на пильно-сверлильный станок D, где в них просверливаются

отверстия. Затем рельсы перекалываются на инспекционные стеллажи, где происходит их дефектовка по металлургическим дефектам. Так же в этой линии установлен правильный пресс, для получения необходимой прямолинейности. Затем рельсы передаются на склад, для дальнейшей отгрузки потребителю.

Технология порезки и правки рельсов, так же была разработана фирмой DANIELLI и не удовлетворяла предъявляемым стандартам цеха в области прямолинейности. Так обрезь составляла постоянные 900 мм с переднего конца, и переменную величину с заднего конца (в зависимости от длины рельса).

Целью разработки предложения по изменению обрезки концевых участков рельсов, являлось увеличение количества рельсов прямолинейности класса «А», а так же уменьшение затрат рабочего времени на правку рельсов на участке правильных прессов.

Перечень задач, решенных в ходе исследования:

- анализ прямолинейности рельсов за определенный промежуток времени;
- анализ усилий правки и режимов правки за весь период производства;
- анализ временных затрат на правку на участке правильных прессов;
- построение среднего графика по большому массиву рельсов;
- вычисление количества оптимальной обрезки;
- практические испытания.

Для того, что бы провести сравнительный анализ прямолинейности рельсов по всей их длине, было отключено программное ограничение на линии «NDT», так как эта линия регистрировала данные, начиная с 900 мм с переднего конца до отметки 100900 мм. Это позволило регистрировать данные по прямолинейности на всей длине рельса, что упростило построение и анализ массива из 240 графиков в программе Excel.

Для анализа усилий и режимов правки, использовался программный комплекс ТИС УРБС, в котором представлены усилия правки, моменты на двигателях, осевой прогиб рельса и установки валов правильной машины.

Анализ временных затрат на правку рельсов на участке правильных прессов производился с помощью секундомера. Среднее время правки одного рельса составляет 4,5 минуты.

Для построения среднего графика по массиву данных по прямолинейности рельсов были взяты 240 рельсов из февральской рельсовой кампании, после отключения ограничений на линии «NDT». Результаты и графики представлены ниже на рисунке 15 и в таблице 9.

Вычисление количества необходимой обреза производилось по эмпирическим формулам, относительно необходимой 100 метровой длины рельса.

Практические испытания были заложены в рабочий план и проведены в апреле месяце.

Значимость предложения определялась увеличением общего количества рельсов, класса прямолинейности «А» категории СС. В результате анализа графиков прямолинейности по массиву рельсов (240 штук) были выявлены участки рельсов, с переднего и заднего конца, которые необходимо обрезать для получения рельса класса прямолинейности «А». Так же при анализе были учтены опытные данные различных авторов по теории правки, в части непроправа рельса при заходе в правильную машину и выходе из нее. Из-за того, что рельс плохо правится на участке 1,3...1,5х(шаг ролика) на роликоправильной машине УРБС, где шаг составляет 1600 мм, направленный участок может достигать 2400 мм. Рекомендации по обрезке и правке рельсов составлены в таблицу, которую в дальнейшем можно применять на участке рельсоотделки при правке рельсов на участке правильных прессов «GEISMAR» и участке порезки рельсов на мерные длины.

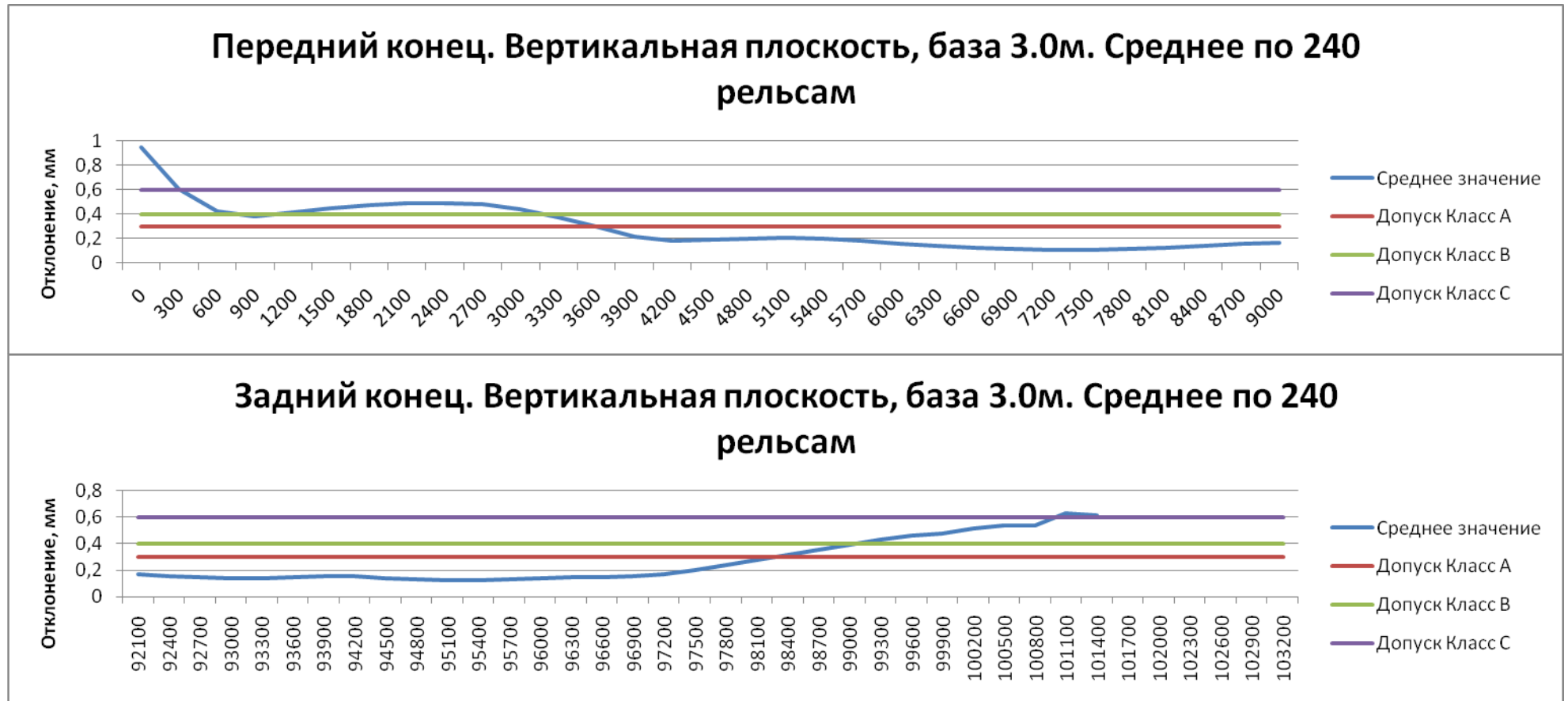


Рисунок 15 – Среднее значение по прямолинейности основанное на анализе 240 рельсов

Длина рельса, который лежит на холодильнике, когда его температура достигает 80°C, измеряется лазерным дальномером и принимается решение о том, сколько нужно отступить оператору правильных прессов от переднего и заднего конца рельса, и какую длину необходимо поправить. Так же на основании этой таблицы выбирается количество обрезки, необходимой к удалению.

Таблица 9 - Количество обреза в зависимости от длины рельса

Исходная длина холодного рельса	Обрезь, удаляемая с переднего конца	Обрезь, удаляемая с заднего конца	Длина участка, подвергающегося правке на переднем конце	Длина участка, подвергающегося правке на заднем конце
105.4	2.5 м	2.9 м	1.5 м	1.5 м
105.2	2.5 м	2.7 м	1.5 м	1.5 м
105	2.5 м	2.5 м	1.5 м	1.5 м
104.8	2.5 м	2.3 м	1.5 м	1.5 м
104.6	2.5 м	2.1 м	1.5 м	1.5 м
104.4	2.5 м	1.9 м	1.5 м	1.5 м
104.2	2.5 м	1.7 м	1.5 м	1.5 м
104	2.3 м	1.7 м	1.5 м	1.5 м
103.8	2.1 м	1.7 м	1.5 м	1.5 м
103.6	1.9 м	1.7 м	1.5 м	1.5 м
103.4	1.7 м	1.7 м	1.5 м	1.5 м
103.2	1.6 м	1.6 м	1.5 м	1.5 м
103.0	1.5 м	1.5 м	1.5 м	1.5 м

8 ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Для расчета экономического эффекта от данных предложений, необходимо провести анализ по процентному соотношению рельсов различных категорий. Нижепредставлены графики по количеству рельсов с классами прямолинейности «А», «В» и «С» за периоды до внедрения вышеизложенных предложений, и после внедрения данного предложения и совершенствования режимов правки.

После окончательного опробования и внедрения данного предложения ожидается увеличение выхода рельсов класса прямолинейности «А» категории СС на 30%.

Данные взяты в совокупности из расчета на одну рельсовую кампанию, в течении которой прокатывается порядка 2000 рельсов.

Для расчета экономического эффекта была взята стоимость 28000 руб./т. для рельсов класса прямолинейности «С» и 42000 руб./т. для рельсов класса прямолинейности «А» категории СС. На данный момент, объем производства рельсов на УРБС составляет порядка 16000 тонн рельсов в месяц, при годовом объеме производства около 200000 тонн. При данной загрузке, 16000 тонн в месяц это около 2200 рельсов, из которых, согласно анализу, за Январь-Февраль месяц только 5% рельсов удовлетворяли классу прямолинейности «А».

Исходя из вышеперечисленных данных, при внедрении данного предложения и изменении обрезки концевых участков рельсов мы получим увеличение выхода годных рельсов по классу прямолинейности «А» до 30% в месяц. Проведем примерные расчеты экономической эффективности данного предложения:

$$V_{\text{мес}} = 16000 \text{ тонн (2200 рельсов);}$$

$$Q_A = 5\%(110\text{шт});$$

$$Q_B = 46\%(1012\text{шт});$$

$$Q_C = 49\%(1078\text{шт});$$

где, $V_{\text{мес}}$ – объем месячного производства рельсов;

Q_A – количество рельсов класса прямолинейности «А»;

Q_B – количество рельсов класса прямолинейности «В»;

Q_C – количество рельсов класса прямолинейности «С».

Итого:

$$P_A = Q_A * m * C = 110 * 7 * 42000 = 32340000 \text{ руб.};$$

$$P_C = Q_C * m * C = 2090 * 7 * 28000 = 409640000 \text{ руб.};$$

$$P_{\Sigma_1} = P_A + P_C = 441980000 \text{ руб.}$$

Так как рельсы класса прямолинейности «В» назначаются и продаются как рельсы класса прямолинейности «С» была взята сумма по двум классам. При увеличении объема производства рельсов класса «А» до 30%, за счет перераспределения обрезиполучаем:

$$V_{\text{мес}} = 16000 \text{ тонн (2200 рельсов);}$$

$$Q_A = 30\%(660\text{шт});$$

$$Q_B = 50\%(1100\text{шт});$$

$$Q_C = 20\%(440\text{шт});$$

$$P_A = Q_A * m * C = 660 * 7 * 42000 = 194040000 \text{ руб.};$$

$$P_C = Q_C * m * C = 1540 * 7 * 28000 = 301840000 \text{ руб.};$$

$$P_{\Sigma_2} = P_A + P_C = 495880000 \text{ руб.}$$

Ориентировочный экономический эффект составит:

$$P_{\text{эф}} = P_{\Sigma_2} - P_{\Sigma_1} = 495880000 - 441980000 = 53900000 \frac{\text{руб}}{\text{мес}}$$

За год:

$$P_{\text{год}} = P_{\text{эф}} * 12 = 53900000 * 12 = 646800000 \frac{\text{руб}}{\text{год}}$$

Внедрение данного способа не требует никаких материальных или временных затрат. Наоборот, нормирование значений обрезиполучения для разных длин рельсов, обеспечило более эффективное использование рабочего времени.

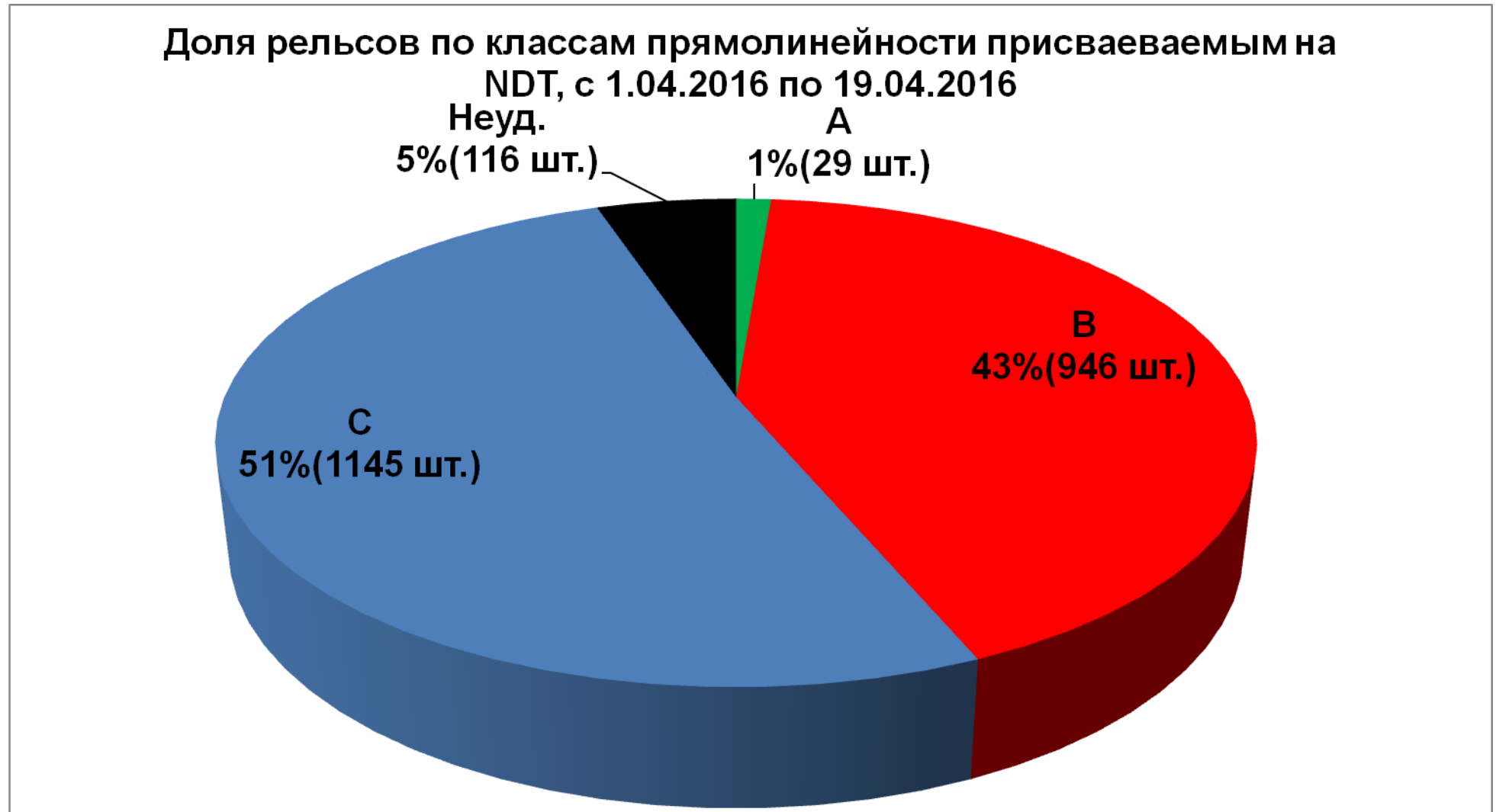


Рисунок 16 - Диаграмма распределения по классам прямолинейности на ~2000 рельсов до внедрения предложений, рассмотренных в проекте

Доля рельсов по классам прямолинейности присваиваемым на NDT, с 20.04.2016 по 10.05.2016 после внедрения ТР по перераспределению обрезки

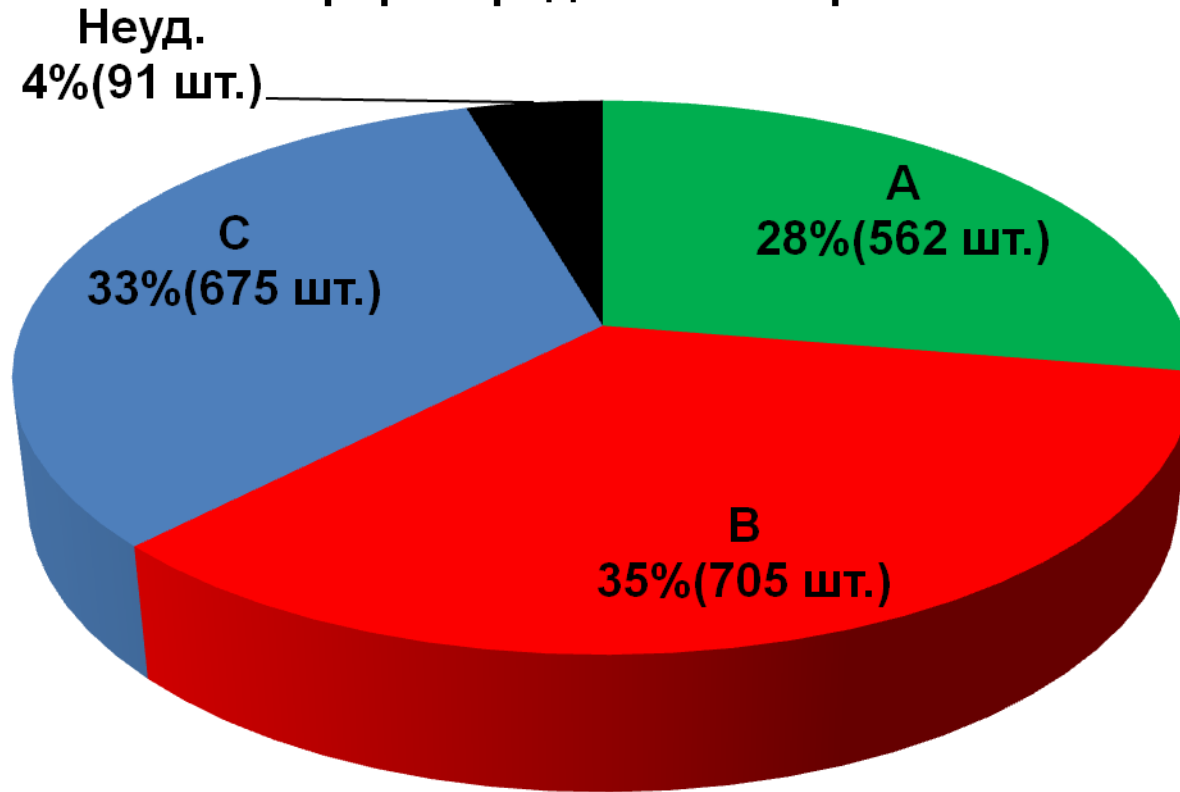


Рисунок 17 – Диаграмма распределения по классам прямолинейности на ~2000 рельсов после внедрения предложений, рассмотренных в проекте

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа технических особенностей и способов правки рельсов типа Р65 была разработана новая технология правки на роликотправильной машине, а так же новая технология правки и порезки рельсов на участке правильных прессов, которая может обеспечить высокую точность получаемых рельсов. Применение заявленного способа правки рельсов в производственных масштабах может обеспечивать снижение стоимости производства.

В ходе исследования определены рациональные параметры установки роликов правильной машины, рациональные параметры правки рельсов на правильных прессах «GEISMAR» и порезки на сверлильно-отрезных станках «GEISMAR».

Была построена компьютерная модель горизонтальной правильной машины. Проведен анализ массива данных по прямолинейности рельсов и усилий, развиваемых правильной машиной при правке по технологии, предложенной фирмой DANIELLI. Выявлены узкие места в технологии как до правки, так и после нее.

В ходе проведения компьютерного моделирования правки, исследовались такие показатели как: прямолинейность рельсов, остаточные напряжения в различных сечениях рельсов, влияние остаточных напряжений на конечную прямолинейность рельсов.

Сравнение результатов, полученных в ходе компьютерного и физического моделирования, дало высокую сходимость результатов. Компьютерная модель может использоваться для расчетов режимов правки различных профилей при условии правильной задачи параметров роликотправильной машины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антипин В.Г., Нестеров Д.К., Кизиев В.Г. и др. Прокатные станы: Справочник в 3-х томах, Т.3. Листопрокатные станы и профилегибочные агрегаты – М.: Металлургия, 1992 г. – 428 с.
2. Недорезов И.В., Стрижов Ю.А., Попиченко А.М. Новые разработки в технологии и оборудовании для роликовой правки рельсов // Сборник докладов: Материалы юбилейной рельсовой комиссии – 2002. Новокузнецк, март, 2002. – Изд. КМК. – С. 184-190
3. Нестеров Д.К. Исследование влияния технологических параметров прокатки на формирование геометрических размеров готовых рельсов // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1999. - №2-3. – С. 32 – 34.
4. Поляков В.В., Великанов А.В. Основы технологии производства железнодорожных рельсов. – М.: Металлургия. 1990. – 416с.
5. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
6. Семенов Ю.Л. Машины для правки проката. – М.: Металлургиздат, 1961. – 208с.
7. Целиков А.И., Смирнов В.В. Прокатные станы. – М.: Металлургиздат, 1958. – 432с.
8. Черняк Н.И., Гаврилов Д.А. Сопротивление деформированию металлов при повторном статическом нагружении. – Киев: Наукова думка, 1971 – 135с.
9. Шохин В.А., Недорезов И.В., Юровских В.В., Фазлиахметов Р.С. Экспериментальные исследования эффекта баушингера на рельсовой стали // Современное оборудование цехов горячей и холодной прокатки. Конструирование, расчеты, исследования: Сб. науч. Тр. НИИТЯЖМАШа ПО «Уралмаш». – Свердловск. 1989. – с.90-96.
10. Шур Е.А., Пан А.В. Рельсы будущего // Железнодорожный транспорт. – 1998. - №4. – С.57-60.

11. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 51685-2013. Рельсы железнодородные. Общиетехническиеусловия. – Москва, 2013 – 123 стр.
12. Moser A., Pointer P. Head hardened rails produced from the rolling heat. Рельсы с головкой, закаленной с прокатного нагрева // Proceedings of the 32nd Mech. Work and Steel Process Conf., Cincinnati, Ohio, October 21 – 24, 1990, vol. 28 – USA, 1990 – Pp. 191 – 198.
13. Specification 12-16C. Steel Rail. Canadian national railways specification. Стандарт 12-16. Стальные рельсы. НациональнойрельсовойкомпаниииКанады. – Canada, 2001. – 60 ps.
14. Specification AREA-94. Specification for steel rails. Part 2. American railway engineering Association. Стандарт AREA-94. Стандартнастальные рельсы. ЖелезнодорожнаяАссоциацияинженеровАмерики. – USA, 1994. – 42 ps.
15. Specification prEN 13674-1. Railway application – track rail. Part 1: Flat bottom symmetrical railway rails 46 kg/m and above. English version. Стандарт prEN 13674-1. Железнодорожные рельсы. Часть 1: Симметричные железнодородные рельсы с плоской подошвой и массой 46 кг/м и более. Английский вариант. – Europe 2011. – 111 ps.
16. Specification T. 12-94. Indian railway standard specification for flat bottom rail-way rails. Стандарт T.12-94. Индийский железнодородный стандарт для железнодородных рельсов с плоской подошвой. – India, 1994. – 14 ps.
17. A.V. Pernia Espinoza, J.B. Ordieres Mere, M. Castejon Limas, A. Gonzales Marcos. Study of the straightening process on metal profiles through finite element models. Статья по процессу правки металлических профилей методом конечных элементов. Universidad de La Rioja, c/ Luis de Ulloa 20, 26004, Logrono, La Rioja, Spain. Pp. 448 – 457.