

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Сибирский государственный индустриальный университет»



На правах рукописи

**ГОЛОВАТЕНКО АЛЕКСЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ  
РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ ДЛИННОМЕРНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ  
РЕЛЬСОВ НА УНИВЕРСАЛЬНОМ РЕЛЬСОБАЛОЧНОМ СТАНЕ**

Специальность

05.16.05 – Обработка металлов давлением

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент

Кадыков Владимир Николаевич

Новокузнецк – 2015

## Оглавление

Введение.....	4
1 Современное состояние теории и практики производства рельсовых профилей .....	11
1.1 Анализ современных технологических схем производства железнодорожных рельсов.....	11
1.2 Анализ влияния физико-химических параметров на сопротивление деформации при прокатке.....	20
1.3 Влияние режимов деформации на качество рельсового проката.....	32
1.4 Выводы и постановка задач исследования.....	40
2 Исследование влияния термомеханических параметров прокатки на сопротивление деформации хромистой рельсовой стали.....	42
2.1 Методика проведения экспериментальных исследований.....	42
2.2 Анализ результатов экспериментальных исследований сопротивления деформации хромистой рельсовой стали при изменяющихся параметрах прокатки .....	48
2.3 Выводы .....	79
3 Исследование влияния химического состава рельсовых сталей на сопротивление деформации при прокатке.....	80
3.1 Методика исследований.....	80
3.2 Анализ влияния химического состава стали Э78ХСФ на сопротивление деформации.....	83
3.3 Разработка и использование методики расчета сопротивления деформации рельсовых сталей при изменяющихся условиях прокатки и различном химическом составе стали.....	91
3.4 Выводы.....	96
4 Разработка и совершенствование режимов прокатки длинномерных железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане.....	97

4.1 Исследование и разработка энергоэффективных режимов прокатки длинномерных железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК».....	97
4.2 Разработка режимов прокатки железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК», обеспечивающих повышение качества рельсовых профилей.....	114
4.3 Выводы.....	119
Заключение.....	121
Список литературы.....	123
Приложение А. Акт использования результатов диссертационной работы.....	136
Приложение Б. Расчет экономического эффекта от использования результатов диссертационной работы.....	137
Приложение В. Справка о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс.....	139

## Введение

### **Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.**

В настоящее время Россия является одним из ведущих производителей железнодорожных рельсов, что объясняется преобладанием железнодорожных перевозок в транспортной системе страны. При этом до последнего времени технологическое лидерство в производстве рельсов принадлежало японским и западноевропейским (Австрия, Франция, Германия) металлургическим компаниям. Использование устаревшей технологии и оборудования для производства рельсов отечественными металлургическими комбинатами приводило к невозможности выполнения требований мировых стандартов.

В последние годы в российской металлургии проведена коренная реконструкция рельсопрокатного производства – введены в эксплуатацию современные универсальные рельсобалочные станы на АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО ЕВРАЗ ЗСМК») и ПАО «Челябинский металлургический комбинат». Указанные прокатные станы предназначены для производства длинномерных (длиной до 100 м) дифференцированно закаленных железнодорожных рельсов.

Как показывают результаты начального периода эксплуатации нового (первого в России) универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК», отсутствие опыта производства рельсовых профилей с использованием универсальной прокатки в отечественной металлургической промышленности и ограниченный объем информации в зарубежных источниках приводят к значительным трудностям при разработке эффективных режимов прокатки. Несмотря на имеющийся научный задел по теоретическим основам процесса прокатки в универсальных калибрах, созданный в основном учеными Уральской научной школы (профессора В.А. Шилов, В.К. Смирнов и др.), можно в целом констатировать отсутствие

надежных и апробированных методик проектирования энергоэффективных режимов прокатки на универсальных прокатных станах, обеспечивающих получение качественного рельсового проката.

### **Цели и задачи.**

Цель работы: Теоретическое обоснование и разработка энергосберегающих режимов прокатки железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане, обеспечивающих повышение качества рельсовой продукции.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1. Провести экспериментальные исследования влияния термомеханических параметров прокатки на сопротивление деформации хромистой рельсовой стали.
2. Провести исследования влияния химического состава хромистой рельсовой стали на сопротивление пластическому деформированию при прокатке.
3. Разработать методику расчета сопротивления деформации рельсовых сталей различных марок при изменяющихся параметрах прокатки и нестабильном химическом составе стали.
4. Разработать режимы прокатки длинномерных железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане, обеспечивающие снижение удельных энергозатрат и повышение качества готовых рельсов.

### **Научная новизна.**

1. Впервые получены аналитические зависимости, характеризующие совместное влияние температуры, скорости и степени деформации хромистой рельсовой стали на сопротивление пластическому деформированию при прокатке.
2. Определены новые научно-обоснованные закономерности влияния химического состава рельсовых марок стали на сопротивление деформации при прокатке. Показано, что наиболее значимое влияние на сопротивление

рельсовых сталей пластическому деформированию оказывает содержание ванадия и серы.

3. Разработана статистическая модель и методика расчета сопротивления деформации рельсовых сталей при изменяющихся термомеханических параметрах прокатки и нестабильном химическом составе стали, позволяющая получать достоверную информацию об энергосиловых параметрах прокатки при проектировании режимов обжатий на универсальных рельсобалочных станах.

4. Получены новые данные о влиянии калибровки валков черновых клетей универсального рельсобалочного стана на формирование качественных показателей рельсовых профилей, в частности показано положительное влияние использования «косорасположенных» калибров взамен закрытых калибров «балочного типа» на качество поверхности рельсов, установлено улучшение макроструктуры готовых рельсов при использовании разрезки заготовки в трапецевидном калибре.

### **Практическая значимость.**

1. Разработан интенсифицированный режим прокатки длинномерных железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане, внедрение которого в условиях АО «ЕВРАЗ ЗСМК» позволило снизить удельный расход электроэнергии на 0,51 кВт·ч/т, уменьшить отбраковку готовых рельсов по дефектам поверхности на 0,5 %, снизить удельный расход прокатных валков на 0,51 кг/т, уменьшить такт прокатки на обжимных клетях на 10 сек., увеличить межремонтный объем проката с 3,5 до 6,0 тыс. т. Фактический экономический эффект, подтвержденный Актом использования результатов диссертационной работы, составил 98,588 млн. руб./год, при доле участия автора 30% или 29,576 млн. руб.

2. Для условий универсального рельсобалочного стана разработана схема прокатки железнодорожных рельсов с повышенными требованиями к точности геометрических размеров, отличительными особенностями которой является использование отдельно расположенной чистовой универсальной

клетей и отсутствие непрерывного режима прокатки в трех последних калибрах.

3. Разработан режим прокатки рельсовых профилей на универсальном рельсобалочном стане с использованием чернового разрезного калибра, обеспечивающий повышение качества макроструктуры рельсов за счет перевода внутренних дефектов исходных заготовок в менее ответственные элементы рельсового профиля.

4. Результаты диссертационной работы, в частности новые научные данные о влиянии термомеханических параметров прокатки и химического состава рельсовых сталей на сопротивление деформации, разработанная методика расчета сопротивления деформации рельсовых сталей, используются при чтении лекционных курсов и проведении практических занятий для бакалавров по направлению «Металлургия» профиль «Обработка металлов давлением» в ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет, что подтверждено Справкой о внедрении в учебный процесс.

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

Экспериментальные исследования сопротивления деформации рельсовой стали в лабораторных условиях выполнены на специализированной установке «Hydrawedge II» – модуля комплекса для физического моделирования термомеханических процессов «Gleeble System 3800»; при анализе экспериментальных данных использованы современные методы статистической обработки, в том числе множественный регрессионный анализ; экспериментальные исследования в промышленных условиях, в том числе осциллографирование параметров работы двигателей приводов клетей при прокатке, выполнены на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

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

1. Совокупность результатов экспериментальных и теоретических исследований влияния термомеханических параметров прокатки на сопротивление хромистой рельсовой стали пластическому деформированию.

2. Результаты исследований совместного влияния концентрации постоянных примесей и легирующих элементов в рельсовой стали на сопротивление деформации при прокатке.

3. Разработанная статистическая модель и методика расчета сопротивления деформации рельсовых сталей.

4. Новые энергоэффективные схемы и режимы прокатки длинномерных железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане, обеспечивающие достижение высокого качества поверхности и внутренней структуры рельсов, повышенную точность геометрических размеров рельсовых профилей.

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

Достоверность полученных результатов подтверждается совместным использованием современного оборудования для физического моделирования процессов обработки металлов давлением, апробированных методик статистической обработки экспериментальных данных, проведением сравнительного анализа с результатами опытно-промышленных исследований в условиях действующего прокатного стана и известными литературными данными по тематике исследования, а также подтвержденной технико-экономической эффективностью предложенных технологических решений.

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: VI Международная конференция «Железнодорожное машиностроение. Перспективы, технологии, приоритеты» (г. Москва, 2013 г.), 129-ое заседание ежегодной отраслевой Рельсовой комиссии (г. Новокузнецк, 2013 г.), IV Международная научно-практическая конференция «Теоретические и прикладные аспекты



современной науки» (г. Белгород, 2014 г.), XVIII Всероссийская научно-практическая конференция «Металлургия: Технологии, управление, инновации, качество» (г. Новокузнецк, 2014 г.), Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы современного машиностроения», г. Юрга, 2014 г.), 130-ое заседание ежегодной отраслевой Рельсовой комиссии (г. Новокузнецк, 2014 г.), IV Международная интерактивная научно-практическая конференция «Инновации в материаловедении и металлургии» (г. Екатеринбург, 2014 г.), XIX Международная научно-практическая конференция «Металлургия: Технологии, инновации, качество» (г. Новокузнецк, 2015 г.).

### **Публикации.**

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 19 печатных работах, в том числе в 3 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

### **Личный вклад автора.**

Автору принадлежит постановка задач исследования, проведение теоретических исследований, участие в экспериментальных исследованиях в лабораторных и промышленных условиях, обработка и анализ полученных результатов, формулирование выводов по диссертационной работе.

### **Соответствие диссертации паспорту специальности.**

Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует паспорту специальности 05.16.05 – Обработка металлов давлением по пунктам: 2. Исследование процессов пластической деформации металлов, сплавов и композитов с помощью методов физического и математического моделирования; 3. Исследование структуры, механических, физических, магнитных, электрических и других свойств металлов, сплавов и композитов в процессах пластической деформации; 4. Оптимизация процессов и технологий обработки давлением для производства металлопродукции с заданными характеристиками качества; 6. Разработка способов, процессов и

технологий для производства металлопродукции, обеспечивающих экологическую безопасность, экономию материальных и энергетических ресурсов, повышающих качество и расширяющих сортамент изделий.

### **Структура и объем работы.**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Изложена на 139 страницах, содержит 11 таблиц, 69 рисунков. Список использованных источников включает 102 наименования.

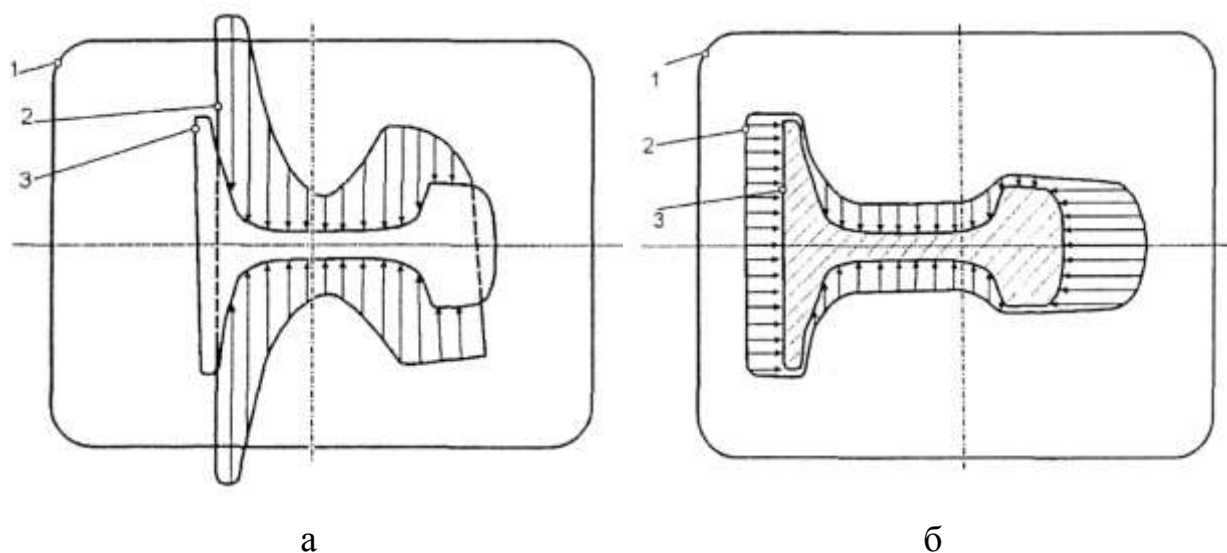
# 1 Современное состояние теории и практики производства рельсовых профилей

## 1.1 Анализ современных технологических схем производства железнодорожных рельсов

Одним из основных направлений развития технологий производства железнодорожных рельсов в настоящее время является переход от прокатки рельсовых профилей в двухвалковых калибрах на использование универсальных клетей.

Технология прокатки рельсовых профилей в универсальных клетях обладает целым рядом существенных преимуществ по отношению к устаревшей схеме прокатки рельсов в двухвалковых калибрах клетей «дуо» и «трио» [1-3]:

1. В отличие от прокатки рельсов в двухвалковом калибре, при деформации в универсальном калибре головка рельса подвергается прямому обжатию по поверхности катания (рисунок 1).



1 – заготовка; 2 – промежуточный профиль; 3 – готовый профиль.

а – деформация в двухвалковом калибре;

б – деформация в универсальном калибре

Рисунок 1 – Схема деформации рельсового профиля в различных калибрах

За счет этого после прокатки в головке рельса обеспечивается плотная мелкозернистая структура металла, что обуславливает высокие механические свойства и износостойкость данного элемента рельсов в процессе эксплуатации.

2. Обеспечивается снижение внутренних напряжений в рельсах за счет одновременной равномерной деформации, что значительно уменьшает вероятность образования дефектов и приводит к увеличению прямолинейности рельса.

3. Происходит уменьшение скольжения металла относительно валков применительно к вертикальным (холостым) валкам, что снижает их износ и, как следствие, достигается уменьшение расхода валков на прокат. Также параллельно достигается уменьшение расхода электроэнергии на прокат и повышение качества рельсов.

Впервые процесс прокатки рельсов с использованием универсальных клеток прошел опытно-промышленное опробование в 1964-1968 гг. на заводе в г. Гаянже (Франция) [2]. Рельсопрокатный стан указанного завода имел в своем составе 4 универсальных клетки, в том числе две клетки совмещенные в реконструированной клетки «трио», и три двухвалковые вспомогательные клетки. Калибровка для прокатки рельсов включала в себя (рисунок 2) 10 пропусков в двух обжимных клетях (6 пропусков в клетки №1 и 4 пропуска в клетки №2), за которыми следует 3 универсальных калибра с большими обжатиями, 3 ребровых калибра и один полууниверсальный калибр (трехвалковый калибр).

Согласно принятой калибровки, во всех универсальных клетях производилось по одному проходу, что позволяло получить стабильные размеры рельсового профиля за счет постоянной настройки валков каждой клетки [3].

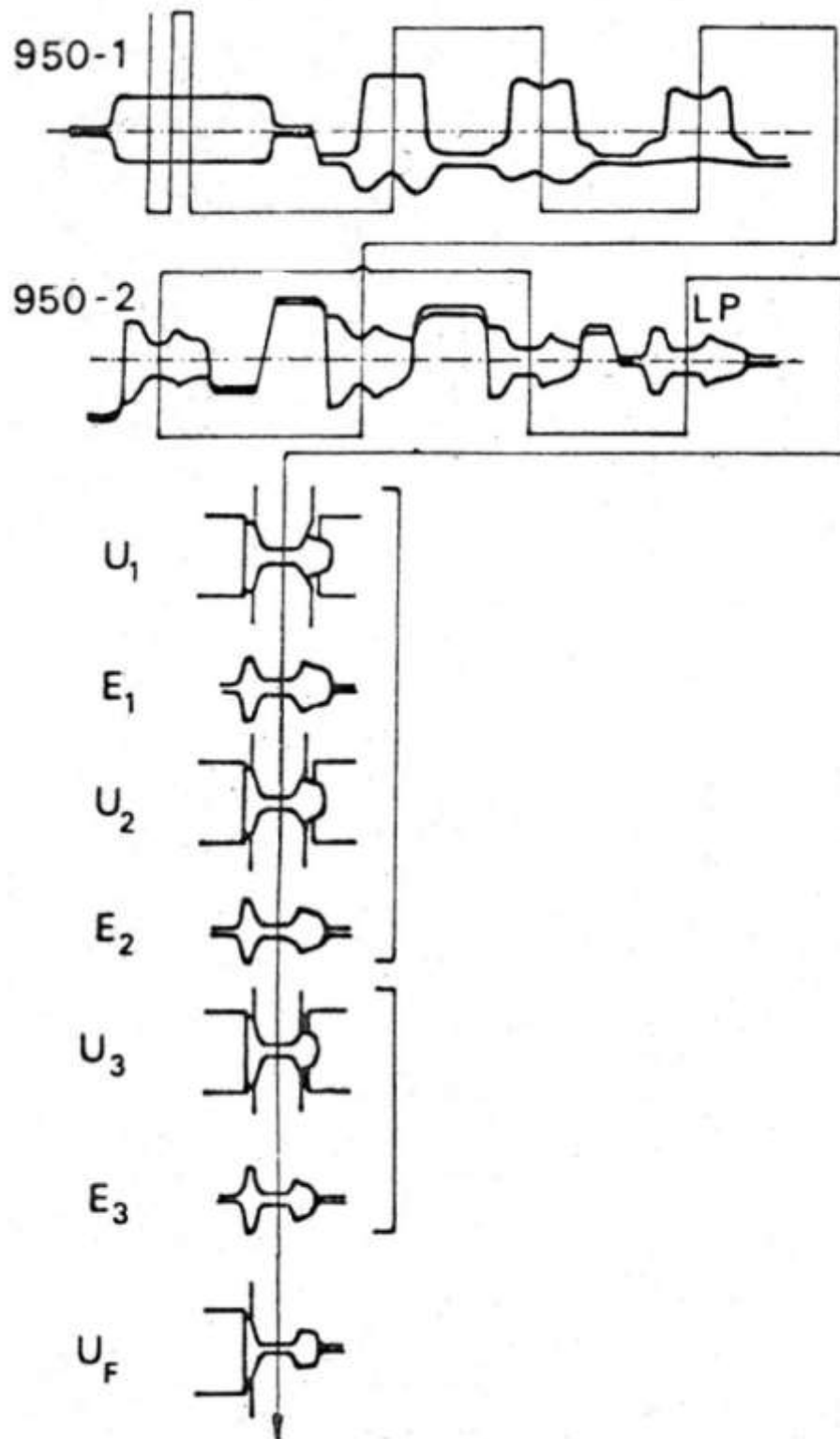


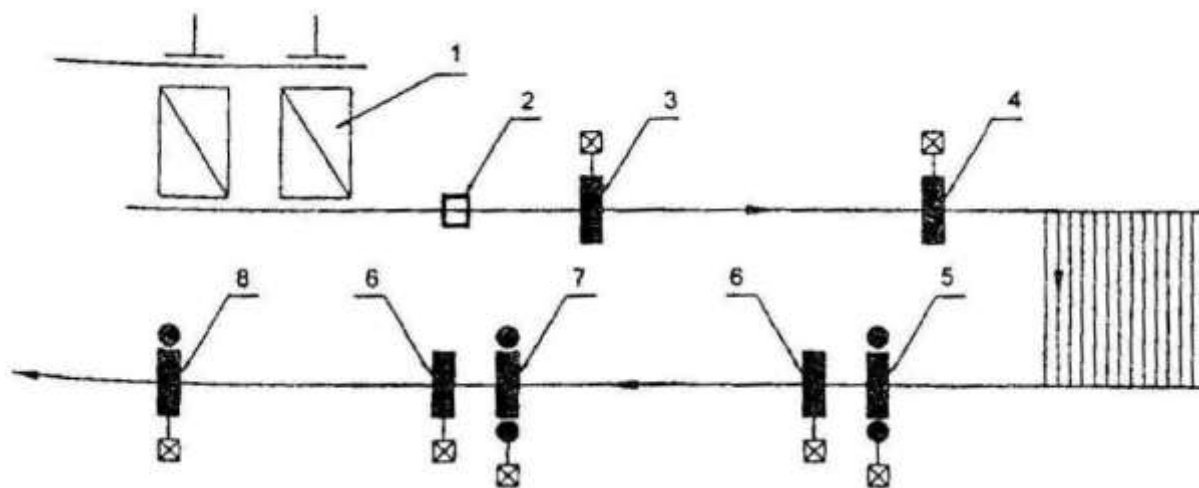
Рисунок 2 – Схема калибровки для прокатки рельсов на заводе  
в г. Гаянже (Франция)

Далее фирма «Sacilor», являющаяся разработчиком данной технологии, продала лицензии на универсальный процесс прокатки рельсов фирмам «Nippon Steel» (Япония), Iscor (ЮАР), Whelling-Pittsburg Steel (США), Broken

Hill Proprietary (Австралия); Acominas (Бразилия) [2]. Указанными фирмами в период 70-80-ых годов XX века построены или реконструированы действующие прокатные станы с переводом их на прокатку рельсов в универсальных клетях.

Несмотря на некоторые имеющиеся технологические и конструкционные особенности указанных прокатных станов общая для них схема прокатки предусматривает вначале деформацию в одной-двух реверсивных клетях, затем раскат передается для прокатки в универсальных реверсивных клетях «дуо» и установленных до и после них вспомогательных двухвалковых клетях. Последний проход, как правило, производится в отдельно установленной чистовой универсальной неревверсивной прокатной клети.

В качестве примера на рисунке 3 приведена схема расположения рельсобалочного стана в г. Явате (Япония), построенного фирмой «Nippon Steel».



- 1 – нагревательные печи; 2 – машина огневой зачистки;  
 3 – обжимная клеть «1100»; 4 – черновая клеть «850»;  
 5 – черновая универсальная реверсивная клеть; 6 – вспомогательная клеть;  
 7 – промежуточная универсальная клеть; 8 – чистовая универсальная клеть

Рисунок 3 – Схема расположения оборудования универсального рельсобалочного стана в г. Явата (Япония)

Схема прокатки рельсов на данном заводе (рисунок 4) включает в себя 8 проходов в двух реверсивных клетях «дуо», затем 3 прохода в черновой

универсальной клетки и по одному проходу в промежуточной и чистовой универсальных клетях.

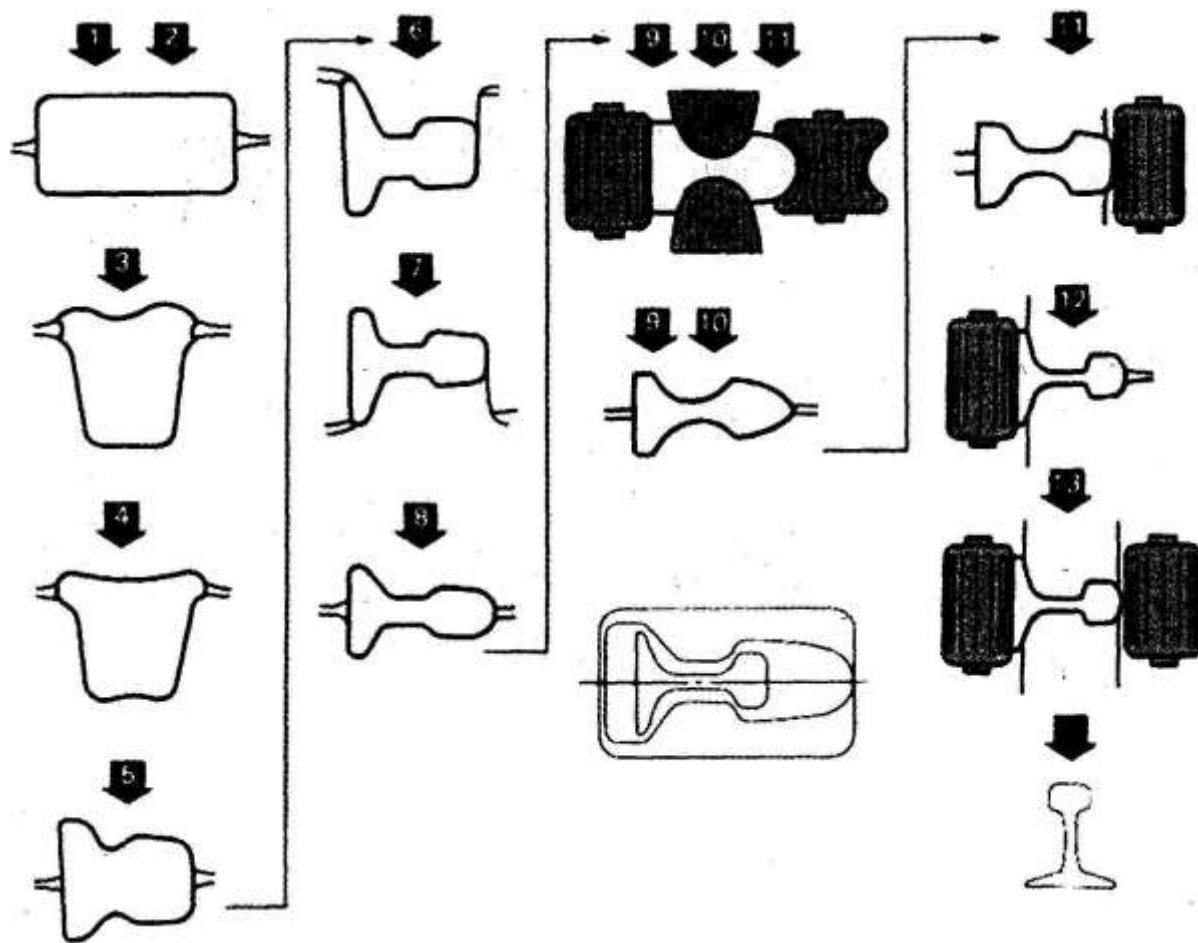


Рисунок 4 – Схема прокатки рельсов на универсальном рельсобалочном стане в г. Явата (Япония)

Для периода 90-ых годов XX века – начала XXI века характерно интенсивное распространение технологии прокатки рельсов в универсальных клетях. В частности по данным автора работы [3] в период с 2002 по 2009 гг. в эксплуатацию введены 8 универсальных прокатных станов (таблица 1).

Типовая схема калибровки рельсов ведущего поставщика оборудования фирмы «SMS Meer» (Германия) [3] представлена на рисунке 5. Указанная схема прокатки включает в себя получение таврового профиля из прямоугольной заготовки в первых трех проходах, затем прокатку в черновых закрытых и открытых двухвалковых калибрах (проходы №4-7) с последующей деформацией полученного профиля в универсальных калибрах чистовой группы клеток стана (проходы с №8 по №13).

Таблица 1 – Введенные в эксплуатацию рельсопрокатные станы  
в период с 2002 г. по 2009 г. [3]

Компания (предприятие)	Страна	Год ввода в эксплуатацию	Поставщик оборудования
«Steel Dynamics»	США	2002	SMS (Германия)
«Anshan Iron and Steel»	КНР	2003	SMS (Германия)
«SAIL Bhilai Steel Plant» (BSP)	Индия	2004	SMS (Германия)
«Baotou Iron and Steel»	КНР	2005	SMS (Германия)
«VAI Schienen»	Австрия	2006	Danieli (Италия)
«Jindal Steel and Power»	Индия	2006	SMS (Германия)
«Al Tuwairqi Group»	Саудовская Аравия	2009	SMS (Германия)
«Wuhan Iron and Steel»	КНР	2008	SMS (Германия)

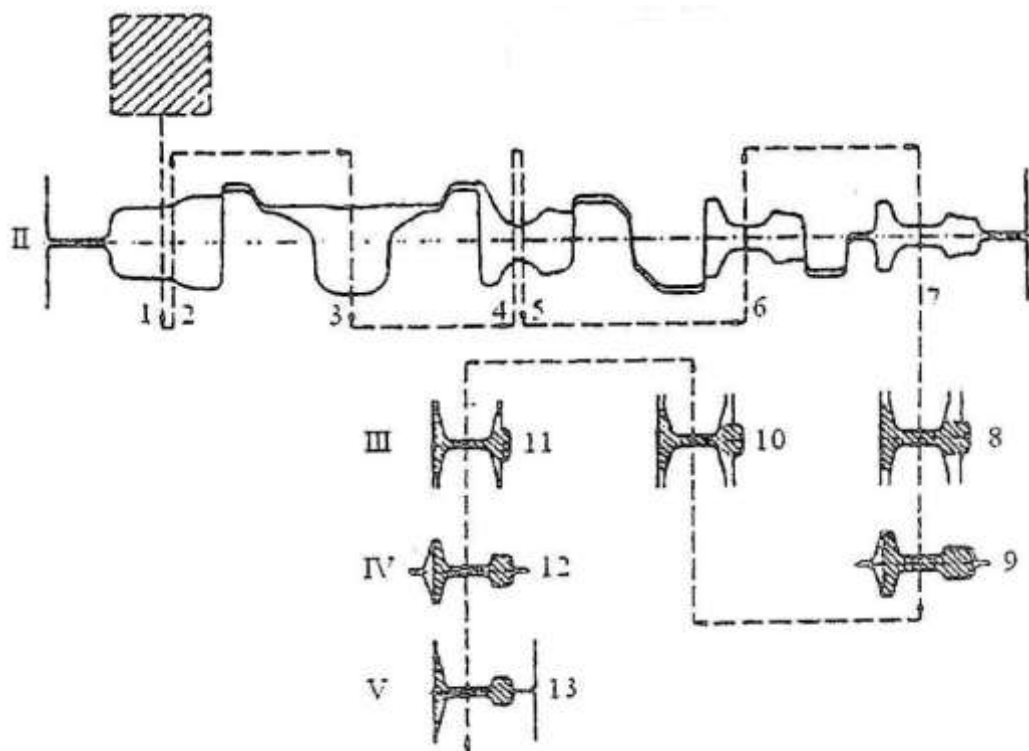
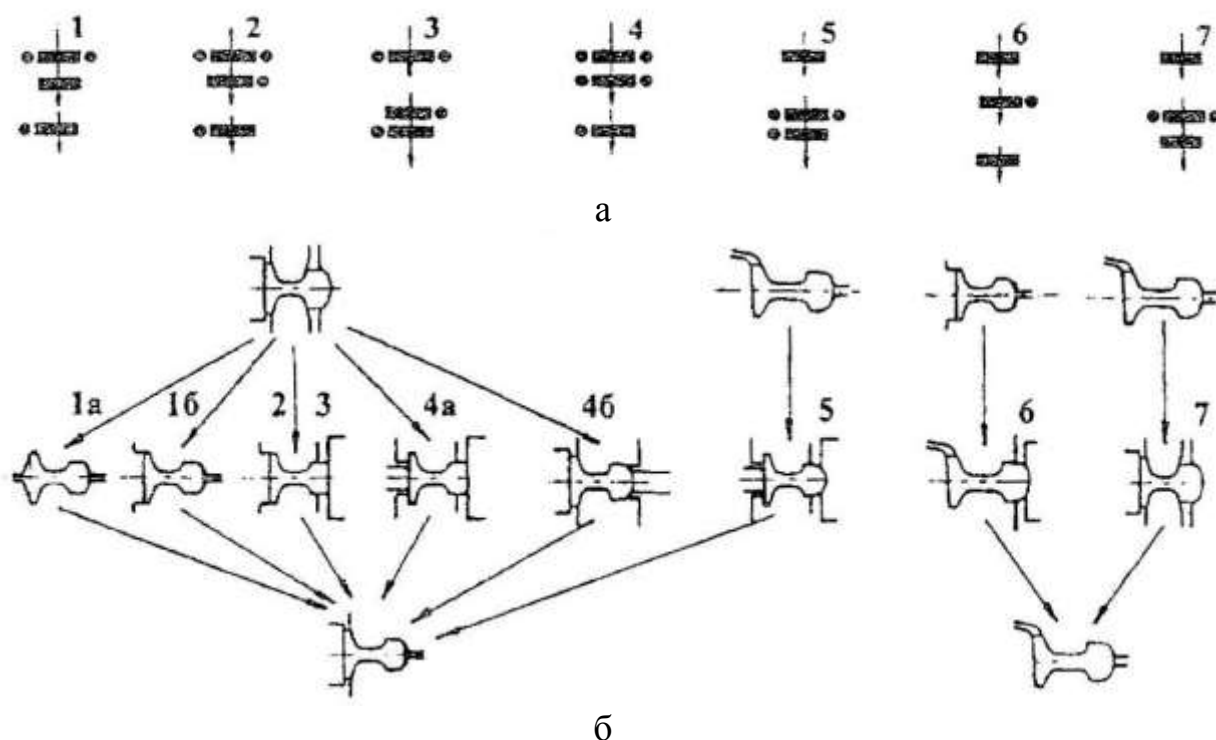


Рисунок 5 – Типовая схема калибровки для прокатки рельсов фирмы SMS [3]



В. К. Смирновым с соавторами [1] на основании проведенного анализа проведена систематизация известных схем производства рельсов с использованием универсальных клетей (рисунок 6).



а – варианты схем размещения рабочих клетей; б – схемы прокатки  
Рисунок 6 – Способы прокатки рельсов с применением универсальных клетей в трех последних проходах

Согласно полученных данных способы производства рельсов на универсальных прокатных станах отличаются типом рабочих клетей и применяемых калибров, а также последовательностью прокатки в трех последних проходах.

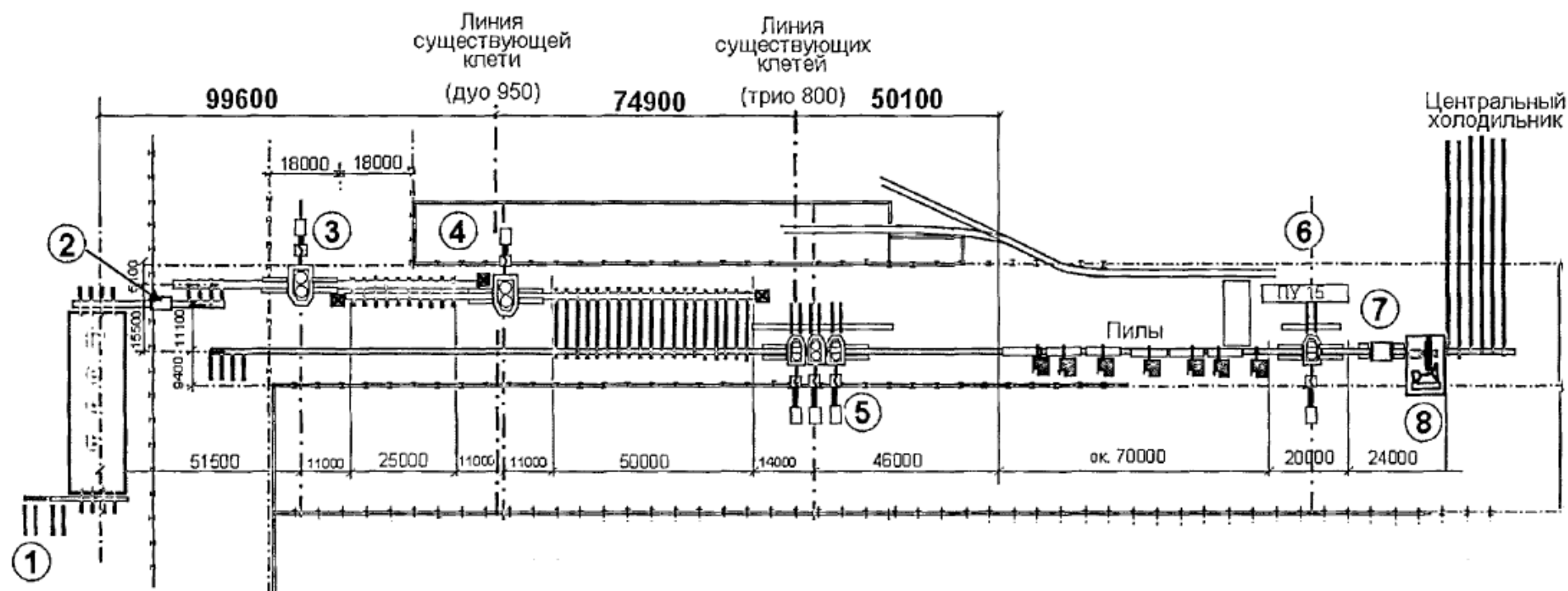
В целом можно констатировать, что в настоящее время в зарубежных странах прокатка рельсов осуществляется в основном с использованием универсальных клетей [4-8].

В России до 2013 г. производство железнодорожных рельсов было сосредоточено на двух металлургических комбинатах (АО «ЕВРАЗ ЗСМК» и АО «ЕВРАЗ НТМК») и осуществлялось по устаревшей схеме с использованием двухвалковых калибров. Данный факт имел место, несмотря

на имевшийся опыт прокатки рельсов с использованием универсальной клетки на Кузнецком металлургическом комбинате [9, 10] и достаточно глубокой проработкой теоретических аспектов процесса прокатки рельсов в универсальных клетях Уральской научной школой под руководством профессора В. А. Шилова [11-16]. По результатам проведенных учеными указанной научной школы исследований процессов формоизменения металла в универсальных калибрах [11-14], скоростных режимов прокатки в универсальных клетях [15] и энергосиловых параметров прокатки на универсальном рельсобалочном стане [16], предложен вариант реконструкции рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ НТМК» с переводом на прокатку рельсов в универсальных клетях с последовательным расположением оборудования прокатного стана (рисунок 7), что отражено в диссертационном исследовании Р. А. Литвинова [3].

Позднее учеными Уральской научной школы проведены исследования температурных полей и напряженно-деформированного состояния металла при прокатке в универсальных клетях рельсобалочного стана [17-19]; результате исследований обобщены в диссертационной работе Е. О. Скосарь [20].

В 2013 г. на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» запущен в эксплуатацию первый в России универсальный рельсобалочный стан для производства длинномерных железнодорожных рельсов, поставщиком оборудования для которого выступила уже упомянутая фирма «SMS Meer» (Германия). Подробная характеристика указанного рельсобалочного стана, в том числе состав оборудования и контрактные режимы прокатки, приведены в разделе 4.1 данной работы. В этом же году официально запущен в эксплуатацию универсальный рельсобалочный стан на Челябинском металлургическом комбинате.



1 – загрузочная решетка для подачи в печь заготовок; 2 – устройство гидросбива окалины; 3 – обжимная клеть реверсивная «950»; 4 – черновая реверсивная клеть «850»; 5 – группа тандем; 6 – чистовая, калибрующая универсальная клеть; 7 – автоматическое устройство измерения профиля; 8 – автоматическая клеймовочная машина

Рисунок 7 – Схема расположения оборудования при реконструкции рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ НТМК» [3]

Таким образом, в ближайшей перспективе в отечественной металлургии возможен полный переход на производство рельсов с использованием прокатки в универсальных клетях и проведение исследований по разработке и оптимизации режимов прокатки на таких станах является одной из наиболее актуальных научно-практических задач.

## **1.2 Анализ влияния физико-химических параметров на сопротивление деформации при прокатке**

Сопротивление стали пластическому деформированию (сопротивление деформации) является одной из важнейших характеристик прочности металла при формоизменении в процессе прокатки. Сопротивление деформации напрямую определяет энергосиловые параметры прокатки, так как от величины указанного параметра зависит давление металла на валки, а, следовательно, и усилие прокатки.

Использование недостоверных данных о величине сопротивления деформации при расчетах энергосиловых параметров прокатки для условий конкретного прокатного стана может привести либо к перегрузкам основного оборудования при прокатке (в случае занижения сопротивления деформации по сравнению с действительными его значениями), либо к недоиспользованию оборудования и, как следствие, к снижению производительности стана (при использовании завышенных значений сопротивления деформации по отношению к реальным значениям). Поэтому одной из важнейших задач при разработке и совершенствовании режимов прокатки на действующих и особенно на вновь вводимых в эксплуатацию прокатных станах является получение достоверных данных о величине сопротивления стали пластическому деформированию при заданных условиях прокатки.

Большинство авторов сходится во мнении, что под сопротивлением деформации необходимо понимать интенсивность напряжений, достаточную

для осуществления пластической деформации металла при заданных условиях деформации [21-25]. При этом текущее значение сопротивления деформации можно описать уравнением А. Надаи [26]:

$$d\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial t} dt + \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} d\varepsilon + \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau + \frac{\partial \sigma}{\partial u} du \quad (1)$$

В указанном уравнении первая его составляющая учитывает влияние температуры на сопротивление деформации, второй член уравнения – влияние степени деформации, третья составляющая – разупрочнение и четвертый член уравнения – влияние скорости деформации.

Таким образом, на сопротивление деформации значимое влияние оказывают термомеханические параметры прокатки (температура, скорость и степень деформации), а также химический и фазовый состав стали, определяющий интенсивность процессов упрочнения и разупрочнения при деформации.

Повышение температуры деформации в интервале температур прокатки приводит к снижению сопротивления деформации. Данный факт объясняется ослаблением материальных связей частиц, что облегчает их взаимное смещение [23]. Зависимость сопротивления деформации от температуры имеет экспоненциальный характер, что впервые было показано Н.С. Курнаковым и экспериментально подтверждено С.И. Губкиным [23].

При увеличении скорости деформации сопротивление деформации возрастает, что объясняется более быстрым протеканием процессов упрочнения. То есть при увеличении скорости деформации процессы упрочнения стали начинают более значительно преобладать над процессами разупрочнения, так как скорость разупрочнения остается постоянной. Следует отметить, что зависимость сопротивления деформации от скорости деформации при прокатке в значительной степени определяется температурным фактором. Влияние температурного фактора может быть выражено уравнением [27]:

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \left( \frac{u}{u_0} \right)^n, \quad (2)$$

где  $\sigma, \sigma_0$  – сопротивление деформации, соответствующее скорости деформации  $u$  и  $u_0$ ;

$n$  – скоростной показатель.

С повышением температуры скоростной показатель  $n$ , характеризующий степень разупрочнения, возрастает.

Влияние степени деформации на сопротивление деформации стали при прокатке в значительной степени определяется химическим и структурным составом обрабатываемой стали, а также скоростными параметрами прокатки. Существуют четыре основных варианта характера зависимости сопротивления деформации от степени деформации [22] – рисунок 8.

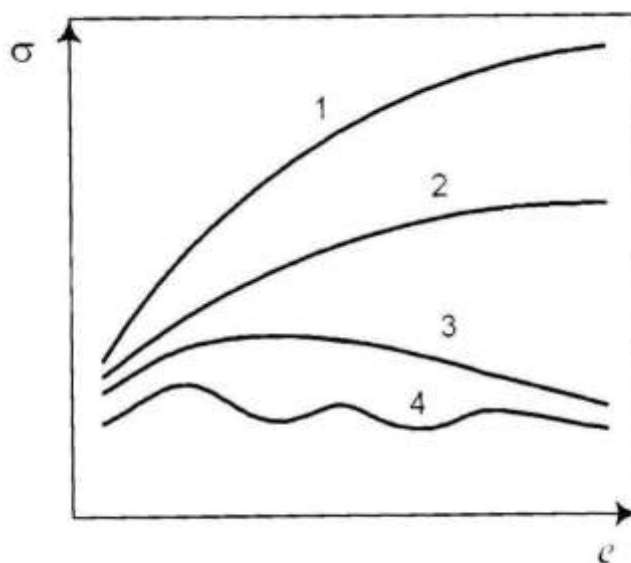


Рисунок 8 – Варианты кривых текучести сплавов при деформации

В первом случае (кривая 1), характерном для высоких скоростей деформации, происходит непрерывное увеличение сопротивления деформации ( $\sigma$ ) с ростом степени деформации ( $\epsilon$ ). При этом сама зависимость имеет экспоненциальный характер:

$$\sigma = k \cdot e^{-m}, \quad (3)$$

где  $k$  и  $m$  – константы деформируемого металла.

Вид зависимости объясняется следующим образом. При низких значениях степени деформации происходит интенсивное деформационное упрочнение стали, увеличивается плотность дислокаций. Далее, с увеличением степени деформации начинают проявляться процессы динамического разупрочнения, что приводит к снижению коэффициента упрочнения.

Во втором варианте зависимостей (кривая 2), имеющем место при деформации сталей ферритного класса с низким содержанием углерода, после первоначального роста до некоторого предела сопротивление деформации достигает установившейся стадии. То есть в этом случае в стали происходит интенсивный динамический возврат с формированием полигонизированной структуры. Реализация данного варианта для ферритных сталей возможна в связи с тем, что высокая энергия дефектов упаковки феррита способствует полигонизации и при этом деформационное упрочнение имеет незначительную величину.

Третий вариант (кривая 3), предполагающий наличие выраженного максимума на кривой зависимости сопротивления деформации от степени деформации, имеет место для аустенитных сталей и для двухфазных сталей с высоким содержанием углерода. Наличие указанного максимума говорит о протекании динамической рекристаллизации, которая имеет место при условии значительного наклепа, высокой скорости и температуры деформации. То есть в дополнение к динамическому возврату и полигонизации развивается также и динамическая рекристаллизация. При этом увеличение температуры деформации смещает максимум в сторону уменьшения степени деформации, а повышение скорости деформации – в обратном направлении (в сторону увеличения степени деформации).

Последний, четвертый вариант, характерный для низких скоростей деформации, отличается наличием осцилляции деформации на установившейся стадии.

В связи с тем, что термомеханические параметры прокатки оказывают значительное влияние на формирование микроструктуры стали авторами работы [21] проведено исследование по выявлению влияния величины зерна на сопротивление деформации сталей марок Ст45 и Х18Н9Т. Полученные данные (таблица 2) позволили сделать вывод, что при увеличении размера зерна происходит уменьшение сопротивления деформации.

Поскольку сталь независимо от марки является многокомпонентной системой, то ее химический состав оказывает определяющее влияние на прочностные и пластические характеристики, в том числе на сопротивление пластической деформации. В частности в работе [21] В. И. Зюзиным с соавторами подчеркивается, что сопротивление деформации является свойством металла или сплава, а не характеристикой процесса обработки металла давлением, в частности процесса прокатки.

Таблица 2 – Зависимость сопротивления деформации от характеристик и величины зерна [19]

№ образца	Марка стали	Параметры деформации			$\sigma$ , МПа	Характеристика зерна	Величина зерна, $\text{мк}^2$
		$t, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon, \%$	$u, \text{с}^{-1}$			
1	45	1200	20	0,5	41,7	Крупное неравномерное	4356-17424
2	45	1000	10	0,5	54,0	Среднее и крупное	3432-34848
3	45	1000	10	0,5	50,0	Мелкое и крупное	832-45738
4	Х18Н9Т	1200	10	0,5	61,8	Мелкое и крупное	676-30492
5	Х18Н9Т	900	10	0,5	121,8	Мелкое	261-1393
6	Х18Н9Т	1200	20	0,5	73,5	Мелкое и среднее	4856-8712



Влияние химического состава стали на сопротивление деформации в значительной степени определяется взаимодействием примесей и легирующих элементов с основным металлом. В частности авторами работы [23] показано, что для тройных железохромоникелевых сплавов сопротивление деформации подчиняется закону аддитивности при изменении химического состава. Данная закономерность впервые была установлена Н.С. Курнаковым [26]:

$$\sigma_{AB} = C_A \cdot \sigma_A + C_B \cdot \sigma_B = (1 - C_B) \cdot \sigma_A + C_B \cdot \sigma_B, \quad (4)$$

где  $\sigma_{AB}$  – сопротивление деформации металла-растворителя, растворенного металла и полученного твердого раствора соответственно, МПа;

$C_A, C_B$  – молярная концентрация компонентов А и В соответственно.

С физической точки зрения влияние легирующих элементов на сопротивление деформации объясняется замещением атомов железа в кристаллической решетке атомами соответствующего элемента [21].

Проведенный В. И. Зюзиным с соавторами анализ многочисленных исследований по влиянию химического состава стали на сопротивление деформации позволил установить [21], что применительно к легированным сталям увеличение содержания углерода и практически всех легирующих элементов (марганец, кремний, никель, вольфрам, молибден) приводит к повышению сопротивления деформации сталей при прокатке.

По приводимым данным [21] сопротивление деформации среднемарганцовистых сталей незначительно превышает сопротивление деформации углеродистых сталей с аналогичным содержанием углерода, а высоким сопротивлением деформации обладают высокомарганцовистые стали.

Кремний в отличие от марганца значительно повышает сопротивление деформации при его содержании на уровне среднелегированных сталей (1,5-2,0 %). Так сопротивление деформации сталей марок 55С2, 60С2 на 20-25 %

превышает сопротивление деформации соответствующих им по содержанию углерода углеродистых марок стали.

Влияние хрома и никеля на сопротивление деформации аналогично влиянию марганца. Так сопротивление деформации конструкционных хромистых сталей (15Х-50Х) и конструкционных никелевых сталей (25НА, 30НА, 13Н2А) незначительно (на 5-10 %) превышает показатели для углеродистых сталей с таким же содержанием углерода, а значительное повышение сопротивления деформации характерно для высокохромистых сталей (1Х13-4Х13) и сталей с высоким содержанием никеля (Н25-Н78).

Присутствие вольфрама и молибдена значительно повышает сопротивление деформации при относительно низких концентрациях указанных элементов.

Для сложнолегированных сталей характерно совокупное влияние всех присутствующих легирующих элементов и углерода. Так, например, сопротивление деформации стали Х18Н9Т примерно в 1,5 раза выше данного показателя для стали марки Ст45.

Единственным исключением из легирующих элементов по характеру влияния на сопротивление деформации является ванадий. Отмечается, что данный элемент не оказывает существенного влияния на сопротивление деформации из-за его незначительной концентрации в стали.

При определении фактических значений сопротивления деформации для конкретных условий прокатки применяют методику, предполагающую использование термомеханических коэффициентов:

$$\sigma_S = \sigma_{S0} \cdot K_\theta \cdot K_\varepsilon \cdot K_\xi, \quad (5)$$

где  $\sigma_{S0}$  – сопротивление деформации при температуре прокатки 1000<sup>0</sup>С, логарифмической степени деформации 0,1 и скорости деформации 10 с<sup>-1</sup>;

$K_\theta$ ,  $K_\varepsilon$ ,  $K_\xi$  – термодинамические коэффициенты, учитывающие

влияние температуры прокатки, логарифмической степени деформации и скорости деформации соответственно.

Сами термодинамические коэффициенты представляют собой простые функции, определяемые по формулам:

$$K_{\theta} = A_1 \cdot e^{-m_1 \cdot \theta}; K_{\varepsilon} = A_2 \cdot \varepsilon^{m_2}; K_{\xi} = A_3 \cdot \xi^{m_3}, \quad (6)$$

где  $A_1$ - $A_3$  и  $m_1$ - $m_3$  – эмпирические коэффициенты уравнения;

$\theta$  – температура деформации, °C;

$\varepsilon$  – логарифмическая степень деформации;

$\xi$  – скорость деформации, с<sup>-1</sup>,

$e$  – число Эйлера.

Методика расчета сопротивления деформации с использованием термомеханических коэффициентов предполагает наличие заранее определенного базисного значения сопротивления деформации.

Базисное значение сопротивления деформации используется и в формуле Андреюка-Тюленева:

$$\sigma_s = S \cdot \sigma_0 \cdot \varepsilon^a \cdot (10\xi)^b \cdot \left( \frac{\theta}{1000} \right)^c, \quad (6)$$

где  $\sigma_0$  – сопротивление деформации при температуре прокатки 1000<sup>0</sup>C,

логарифмической степени деформации 0,1 и скорости деформации 1 с<sup>-1</sup>;

$S, a, b, c$  – расчетные коэффициенты;

$\varepsilon$  – степень деформации;

$\xi$  – скорость деформации, с<sup>-1</sup>;

$\theta$  – температура деформации, °C.

Следует отметить, что в литературных источниках имеются такие данные только для ограниченного числа марок стали. В частности для рельсовых сталей сведения о базисных значениях сопротивления деформации отсутствуют. Кроме того, как показано в работе [29] метод термодинамических коэффициентов применим только для возрастающих кривых, характеризующих зависимость сопротивления стали пластическому

деформированию от степени деформации (кривая 1 на рисунке 8). Для выпуклых кривых, имеющих выраженный максимум (кривая 3 на рисунке 8) использование данного метода приводит к значительным погрешностям при расчетах. Авторами указанной работы предложен метод описания кривых текучести марганцовистых сталей с использованием полиномов 5-той степени включительно для двух переменных – попарно для скорости деформации и степени деформации; температуры деформации и степени деформации. Полученные авторами расчетные данные по сопротивлению деформации стали 35Г2М в сравнении с фактическими значениями представлены на рисунке 9.

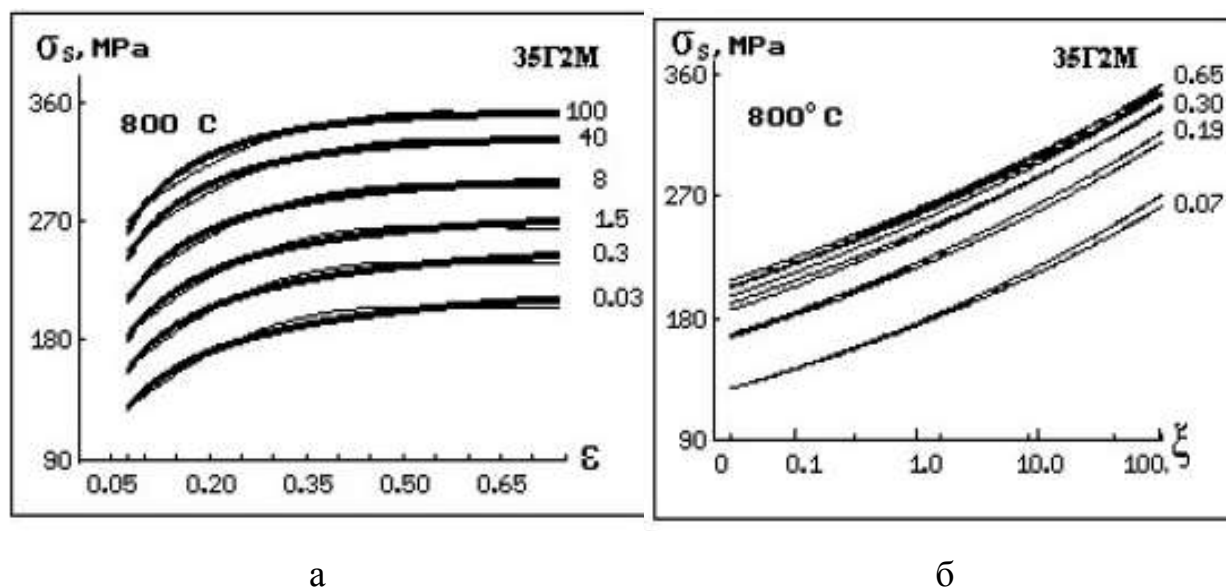


Рисунок 9 – Зависимости сопротивления деформации стали 35Г2М от термомеханических параметров деформации [27]

С целью повышения достоверности результатов предлагается для получения аппроксимирующих полиномов использовать не только статистические зависимости, но и визуальное сравнение расчетных и экспериментальных кривых и, при необходимости, вносить коррективы в регрессионные зависимости.

И. Ю. Приходько с соавторами [30] разработан алгоритм определения сопротивления деформации для сталей с немонотонной зависимостью сопротивления деформации от термомеханических параметров прокатки (температура, скорость и степень деформации). В связи со сложным характером закономерностей изменения сопротивления деформации (рисунок 10) и сложностью его описания аналитическими выражениями предложен метод многомерной интер- и экстраполяции дискретных экспериментальных данных о сопротивлении деформации, полученных в ходе пластометрических испытаний.

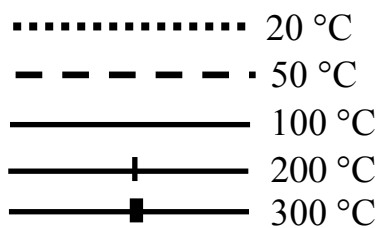
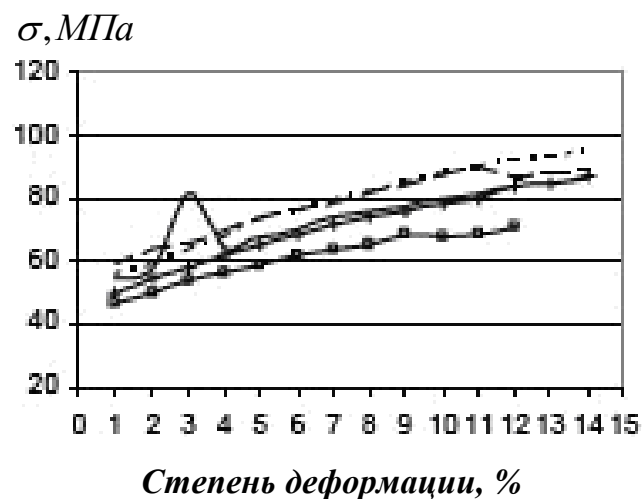
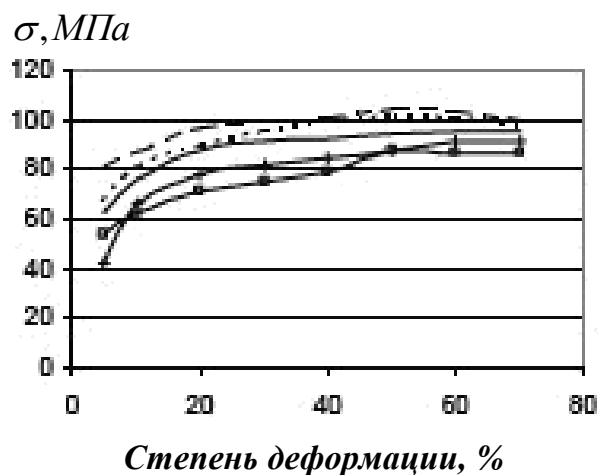
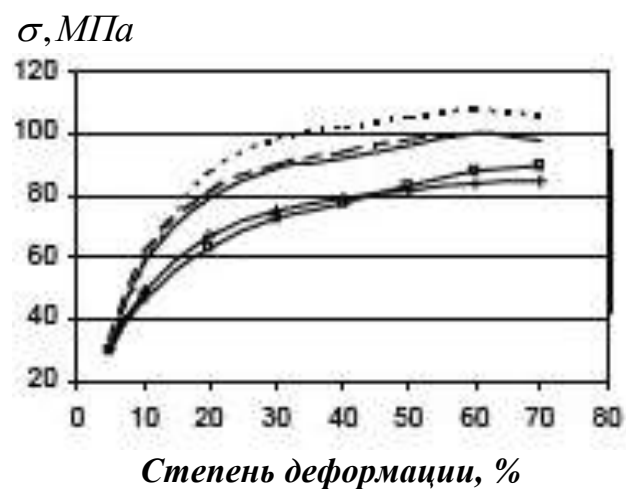
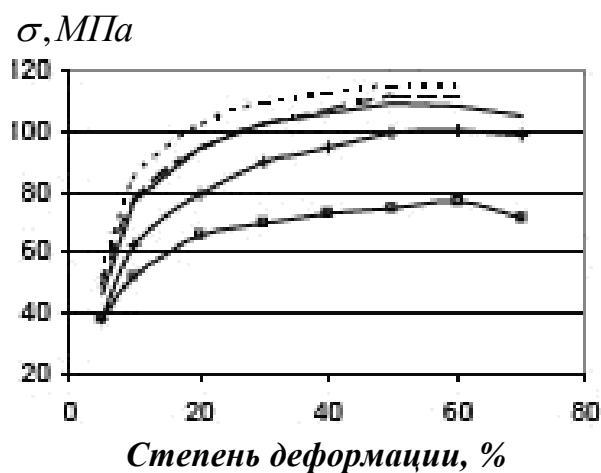
В связи с отсутствием достоверных теоретических данных и надежных методик определения сопротивления деформации расчетным путем на практике зачастую используют экспериментальные исследования методом горячих испытаний образцов на растяжение, кручение либо сжатие.

При испытаниях на горячее растяжение уже при относительно малых деформациях (20-30 %) возникает высокая степень неоднородности деформации и происходит изменение скорости деформации в объеме металла, что объясняется возникновением в образце шейки в процессе проведения испытаний. Таким образом, метод испытаний на растяжение имеет существенные ограничения по области применения.

Для метода испытаний на горячее кручение характерна значительная неоднородность деформации по сечению: степень и скорость деформации изменяется от максимальной величины на поверхности до минимальных (вплоть до нулевых) значений истинной деформации в центре (вдоль оси вращения) цилиндрического образца.

Преимуществом метода испытаний на горячее сжатие является возможность применения высоких степеней деформации. Хотя следует отметить, что при степени деформации более 60-70 % образец принимает «бочкообразную» форму, что значительно увеличивает погрешность исследований. Данное явление связано с тем, что при осадке металлической

заготовки скольжение металла по поверхности контакта задерживается силами трения.



а – скорость деформации  $1 \text{ s}^{-1}$ ; а – скорость деформации  $10 \text{ s}^{-1}$ ;  
 а – скорость деформации  $100 \text{ s}^{-1}$ ; а – скорость деформации  $3000 \text{ s}^{-1}$   
 Рисунок 10 – Зависимость сопротивления деформации электротехнической стали марки 1511 от степени, температуры и скорости деформации при холодной прокатке [28]

В результате происходит образование зоны торможения, которая подразделяется на участок прилипания металла, где его перемещения по поверхности контакта полностью отсутствуют (зона прилипания) и участок застоя в виде матового пятна в средней части контактной поверхности образца, окруженного светлой каймой (рисунок 11).

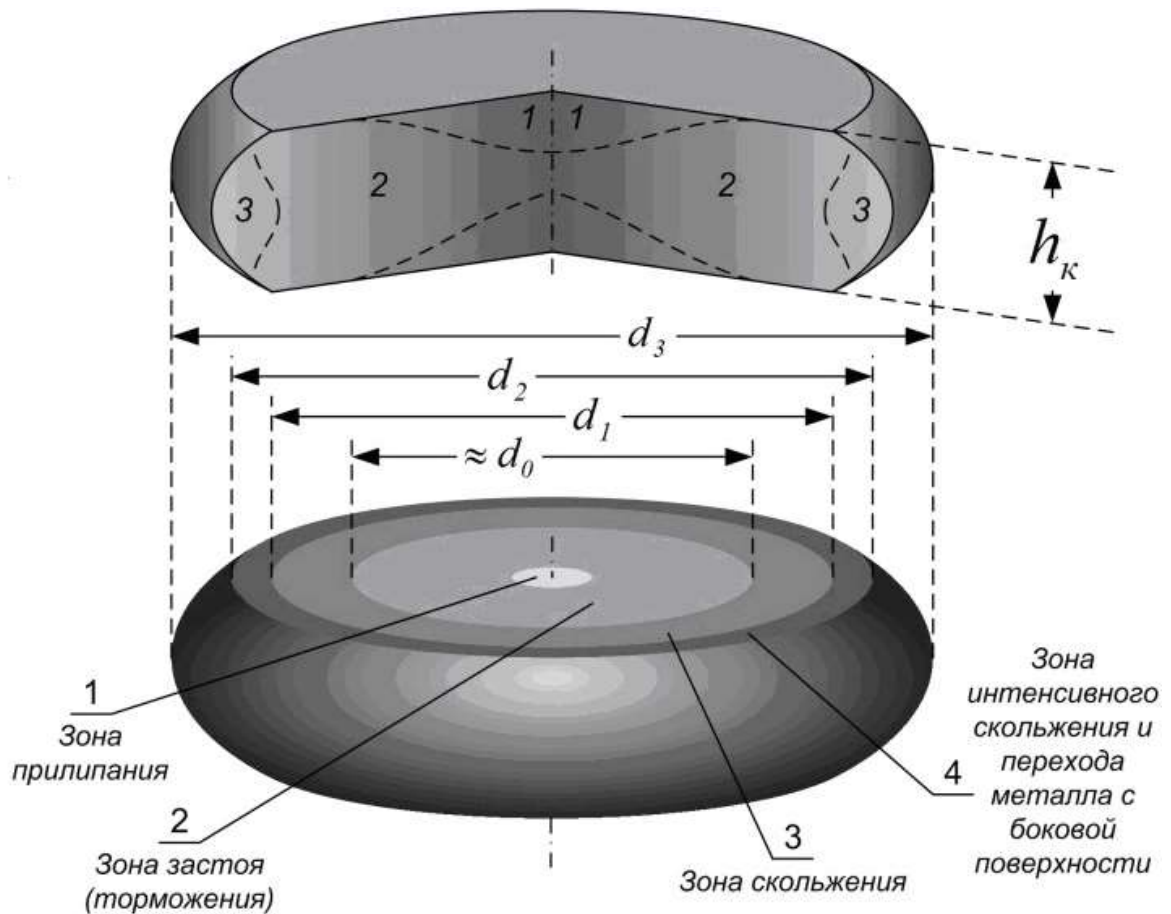


Рисунок 11 – Механизм деформации заготовок при осадке

Участок застоя является переходным к участку скольжения, где имеет место интенсивное скольжение, выдавленного из внутреннего объема заготовки металла по поверхности деформирующего инструмента, а также частичного перехода металла с боковой поверхности на контактную поверхность с деформирующим инструментом. При этом фактически разделение с четкой границей раздела между зонами сделать невозможно, поскольку каждая из зон является промежуточной.

Снижение бочкообразования на образцах в процессе испытаний достигается либо за счет увеличения высоты образца, либо применением специальных смазок.

Резюмируя результаты проведенного анализа можно констатировать следующее:

- на сегодняшний день существует общепринятое представление о качественном влиянии термомеханических параметров прокатки (температура, скорость и степень деформации) на сопротивление деформации различных марок сталей, при этом данные о влиянии химического состава стали на сопротивление деформации носят отрывочный характер и получены для ограниченного количества марок сталей;

- в литературных источниках отсутствует надежная информация о действительных значениях сопротивлении деформации рельсовых сталей при различных условиях прокатки;

- существующие методики расчета сопротивления деформации при различных условиях прокатки имеют существенные ограничения по области применения, в частности, они неприменимы для высокоуглеродистых и легированных сталей;

- наиболее надежной методикой экспериментального определения сопротивления деформации при заданных температурно-скоростных параметрах прокатки являются испытания на горячее сжатие.

Таким образом, актуальной задачей является проведение экспериментальных исследований влияния физико-химических параметров на сопротивление деформации рельсовых сталей.

### **1.3 Влияние режимов деформации на качество рельсового проката**

К основным показателям качества железнодорожных рельсов можно отнести [31]:

#### **1. Механические свойства;**



2. Точность геометрических размеров;
3. Макро- и микроструктуру;
4. Наличие поверхностных дефектов;
5. Химический состав.

По имеющимся данным из перечисленных характеристик режимы деформации могут оказывать значимое влияние на точность выполнения рельсового профиля, макроструктуру и качество поверхности рельсового проката. Механические свойства и микроструктура готовых рельсов определяются химическим составом рельсовой стали и используемыми режимами термообработки.

Следует отметить, что большинство отечественных исследовательских работ и изобретений, направленных на повышение точности рельсовых профилей за счет совершенствования режимов прокатки, разработаны применительно к условиям деформации в двухвалковых калибрах [32-48]. Данный факт объясняется отсутствием до недавнего времени в России действующих универсальных рельсобалочных станов. Среди немногочисленных способов прокатки рельсов в универсальных клетях, разработанных в последние годы, можно выделить изобретение [48]. Авторами указанного изобретения предложен способ прокатки рельсов, отличающийся тем, что черновой раскат задают в чистовую группу клетей «тандем» против хода прокатки на стане и прокатывают в ней за два прохода. При этом в первом проходе используют систему калибров: универсальный четырехвалковый – вспомогательный двухвалковый – универсальный четырехвалковый калибры, а во втором проходе используют систему калибров: универсальный четырехвалковый – вспомогательный двухвалковый – универсальный четырехвалковый – универсальный трехвалковый калибры. За счет использования указанного режима прокатки достигается повышение точности формы и размеров головки при обработке

поверхности катания вертикальным валком в предчистовом универсальном четырехвалковом калибре.

Зарубежная практика прокатки рельсов на универсальных станах говорит о целесообразности установки дополнительной отдельно расположенной универсальной чистовой клетки, применение которой позволяет обеспечить высокую точность геометрических размеров сечения готового профиля по всей длине рельса за счет отсутствия необходимости соблюдения условия постоянства секундных объемов, свойственное непрерывной прокатке.

Анализ литературных и производственных данных показал, что наибольшее распространение среди поверхностных дефектов рельсов имеют «прокатные плены». В частности, Центром технического аудита АО «Российские железные дороги» (ЦТА) в период с 2010 г. по 2013 г. отклонено и впоследствии забраковано по данному дефекту 478 т рельсов [49]. Прокатная плена представляет собой дефект продольной ориентации, соединенный с поверхностью рельса одной стороной (рисунок 12).

Механизм образования таких плен связан с раскатыванием в процессе деформации дефектов прокатного происхождения (вмятины, закаты, подрезы, морщины и т.д.), уже имеющих на поверхности полосы.



Рисунок 12 – Плена прокатного происхождения на поверхности рельса

При этом прокатное происхождение указанного дефекта подтверждается данными металлографического анализа по следующим признакам: отсутствие скопления неметаллических включений, отсутствие значительного диффузионного окисления отслоившегося металла, одинаковый характер обезуглероживания отслоившегося и основного металла. Как показано авторами работы [50] наиболее вероятной причиной образования дефектов, впоследствии приводящих к возникновению «прокатных плен», являются механические повреждения раската.

Применительно к условиям прокатки рельсовых профилей поверхностные дефекты механического происхождения в большинстве случаев образуются вследствие изгиба полосы из-за несимметричности применяемых калибров. При этом проблема изгиба раската особенно актуальна для прокатки в универсальных калибрах. Разработанные различными исследователями технические решения, направленные на устранение указанного нежелательного явления при прокатке в универсальных калибрах, можно разделить на две основные группы по способу решения проблемы. Зарубежными исследователями [51-53] для устранения изгиба раската предложены различные способы прокатки с использованием меньшего диаметра вертикального валка со стороны головки рельса, что приводит к выравниванию длин очагов деформации подошвы и головки формируемого рельсового профиля. В отечественных изобретениях [54, 55] предложено смещение осей вертикальных валков в противоположные стороны для головки и подошвы рельса (со стороны подошвы рельса – по направлению прокатки; со стороны головки – против направления прокатки).

Результаты многочисленных экспериментальных лабораторных и промышленных исследований [56-66] свидетельствуют, что применение оптимальных режимов прокатки позволяют уменьшить размеры поверхностных дефектов, перешедших на раскат с исходных заготовок. Однако все указанные исследования проведены для условий прокатки в

сортовых калибрах простой формы. Применительно к условиям прокатки на рельсобалочных станах исследования выкатываемости поверхностных дефектов проводились только для черновых ящичных калибров [56-60].

Выкатываемость поверхностных дефектов заготовок определяется схемой напряженно-деформированного состояния (НДС) металла в процессе прокатки. Под НДС понимают совокупность внутренних напряжений и деформаций, возникающих при действии на исходную заготовку внешних нагрузок, температурных полей и других факторов. Распределение напряжений и деформаций в объеме раската в значительной степени определяется соотношением продольно-вертикальных размеров очага деформации – отношение дуги захвата ( $l_d$ ) к средней высоте полосы до и после прокатки ( $h_{cp}$ ).

В соответствии с классификацией А. П. Чекмарева [67] в зависимости от соотношения  $l_d/h_{cp}$  можно выделить четыре схемы НДС металла в процессе прокатки.

Первый тип прокатки реализуется при  $l_d/h_{cp} < 0,3$ . В этом случае деформация проникает только на незначительную глубину и средняя по высоте часть полосы совершенно не претерпевает пластической деформации (имеется только упругая деформация). В этом случае в пластически-деформируемых приконтактных с валками слоях металла реализуется основная схема неравномерного трехосного сжатия, которая усиливается дополнительными однозначными напряжениями. Исключением являются только боковые поверхностные участки, которые испытывают продольные растягивающие напряжения. В центральной упруго-деформируемой зоне раската имеет место плоская схема напряженного состояния со сжимающими напряжениями по высоте и растягивающими напряжениями в продольном направлении.

Для второго типа прокатки, имеющего место при  $l_d/h_{cp} = 0,3-0,5$ , также характерна несквозная деформация раската. При этом отличительной особенностью от первого типа прокатки является то, что сердцевина раската

подвергается принудительному пластическому растяжению. В результате схема напряженного состояния металла в верхних пластически-деформируемых слоях раската остается аналогичной первому типу прокатки, а в центральной зоне реализуется объемная схема напряженного состояния, которая характеризуется наличием сжимающих напряжений в высотном и поперечном направлениях и растягивающими продольными напряжениями.

Третий тип прокатки соответствует случаю, когда соотношение продольно-вертикальных размеров очага деформации находится в пределах  $l_d/h_{CP} = 0,5-1,5$ . В этом случае в отличие от первых двух типов прокатки пластическая деформация сжатия проникает на всю глубину раската. Однако при этом сохраняется неравномерность деформации по высоте раската – в наибольшей степени деформируются приконтактные с прокатными валками слои металла (верхняя и нижняя трети по высоте раската). Схема напряженного состояния металла в целом аналогична второму типу прокатки: в приконтактных слоях металла – трехосное сжатие, в центральной части раската – сжимающие напряжения в высотном и поперечном направлениях и растягивающие напряжения в продольном направлении. При этом, однако, следует отметить усиление объемной схемы напряженного состояния в центральной по высоте части раската по сравнению со вторым типом прокатки.

При реализации четвертого типа прокатки, соответствующего значениям  $l_d/h_{CP} = 1,5-8,0$ , деформация центральных слоев раската превышает деформацию его поверхностных слоев. В результате продольные напряжения в центральной части раската меняют знак на обратный и во всем объеме деформируемой заготовки реализуется схема неравномерного объемного напряженного состояния сжатия.

С точки зрения образования и развития дефектов в процессе деформации наиболее неблагоприятными, по мнению автора, являются первые два случая прокатки. Значительная неравномерность распределения деформаций по сечению раската может привести к изменению не только

величины, но и знака рабочих напряжений в определенных зонах прокатываемой заготовки. В результате в таких зонах повышается вероятность образования новых дефектов или увеличение размеров дефектов, имеющих на исходных заготовках.

Другие авторы также указывают на зависимость распределения деформаций и напряжений по высоте сечения раската от формы очага деформации. Так А. И. Целиков [68] выделяет два различных варианта характера неравномерности деформаций и напряжений. В первом случае, когда  $l_d/h_{CP} > 0,5-1,0$ , имеет место полное распространение деформации сжатия по всей высоте сечения. Во втором варианте, реализующемся при значениях  $l_d/h_{CP} < 0,5-1,0$ , деформация сжатия локализуется в зонах вблизи контактных с валками поверхностей и в расположенных в непосредственной близости к ним внеконтактных зонах.

Следует отметить, что картина распределения напряжений и деформаций в объеме металла при прокатке в калиброванных валках, особенно в калибрах сложной формы, может в значительной степени разниться с вышеприведенными данными, справедливыми для случаев прокатки на «гладкой бочке». При прокатке в сортовых и фасонных калибрах на первый план выступают закономерности течения металла в различных зонах или элементах калибров. Так в диссертационном исследовании Ю. А. Мартянова [69] установлена взаимосвязь между перемещением поверхностных слоев раската при прокатке в сортовых калибрах простой формы (ящичные, ромбические, овальные) и формированием НДС металла. В работе показано, что наиболее неблагоприятная схема напряженно-деформированного состояния металла формируется в зонах, где отсутствует перемещение металла в направлении периферии калибров. Р. А. Литвиновым [3] показано, что при прокатке рельсового профиля в универсальном калибре максимальные напряжения наблюдаются в местах соединения шейки и фланцев, а также в местах утяжки фланцев. При этом величина зоны максимальных напряжений на стыке шейки с фланцами зависит от

соотношения коэффициентов вытяжки в этих элементах – увеличение неравномерности распределения коэффициентов вытяжки приводит к повышению неравномерности напряжений в очаге деформации.

НДС металла в процессе прокатки в значительной степени определяется распределением температурных полей в объеме раската. Указанная взаимосвязь на основании результатов математического моделирования подтверждена в диссертационной работе Е. О. Скосарь [20] для условий прокатки рельсового профиля на универсальном рельсобалочном стане.

Влияние режимов прокатки на макроструктуру рельсов связано с перетеканием металла в процессе деформации заготовок между элементами формирующегося рельсового профиля. Основной задачей является недопущение перемещения металла из шейки в головку рельса, так как в этом случае произойдет переход осевых дефектов (центральная ликвация, осевая пористость) исходных заготовок в головку рельса. Следует отметить, что, несмотря на значительное улучшение качества внутренней структуры исходных заготовок при переходе на их производство методом непрерывной разливки [70-78], наличие внутренних дефектов остается достаточно значимой проблемой.

При использовании устаревшей схемы прокатки рельсов в двухвалковых калибрах проблема предотвращения перехода внутренних дефектов заготовок в головку рельса решалась за счет использования чернового трапецевидного разрезного калибра [79]. Р. А. Литвиновым показано, что избежать указанного явления при прокатке рельсов в универсальном калибре можно при равенстве коэффициентов вытяжки элементов рельсового профиля [3].

На основании проведенного анализа можно констатировать, что имеющиеся литературные и производственные данные различных исследователей о влиянии режимов прокатки рельсов на их качество касаются, в основном, условий прокатки в двухвалковых калибрах.

Применительно к условиям прокатки на универсальных станах такая информация практически отсутствует, что обуславливает актуальность проведения исследований по оптимизации режимов прокатки на универсальных станах с целью повышения качества готовых рельсов.

#### **1.4 Выводы и постановка задач исследования**

Проведенный аналитический обзор позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Одной из основных тенденций развития рельсопрокатного производства в мировой металлургии является переход от прокатки рельсовых профилей в двухвалковых калибрах на прокатку в калибрах универсальных клетей. Отсутствие опыта эксплуатации в отечественной металлургии универсальных рельсопрокатных станов, а также ограниченный объем информации о режимах прокатки длинномерных железнодорожных рельсов на станах указанного типа свидетельствуют об актуальности проведения исследований в указанном направлении.

2. На сегодняшний день в опубликованных работах отсутствует достоверная информация о действительных значениях сопротивления деформации рельсовых сталей при различных термомеханических параметрах прокатки и надежные методики определения данного параметра расчетным путем, что значительно затрудняет разработку энергоэффективных режимов прокатки на новых рельсопрокатных станах. Наиболее надежным способом получения информации о сопротивлении стали пластическому деформированию являются экспериментальные исследования путем проведения горячих испытаний образцов на сжатие.

3. Имеющиеся литературные и производственные данные говорят об имеющихся значительных резервах по улучшению качества рельсов по таким параметрам, как качество поверхности и макроструктуры, точность геометрических размеров за счет совершенствования режимов прокатки



применительно к условиям универсальных рельсобалочных станов. При этом указанное направление в отечественной науке является недостаточно проработанным, а данные зарубежных источников носят отрывочный и обзорный характер.

С учетом сделанных выводов сформулированы следующие задачи диссертационного исследования:

1. Провести экспериментальные исследования влияния термомеханических параметров прокатки на сопротивление деформации хромистой рельсовой стали.
2. Провести исследования влияния химического состава хромистой рельсовой стали на сопротивление пластическому деформированию при прокатке.
3. Разработать методику расчета сопротивления деформации рельсовых сталей различных марок при изменяющихся параметрах прокатки и нестабильном химическом составе стали.
4. Разработать режимы прокатки длинномерных железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане, обеспечивающие снижение удельных энергозатрат и повышение качества готовых рельсов.

## **2 Исследование влияния термомеханических параметров прокатки на сопротивление деформации хромистой рельсовой стали**

### **2.1 Методика проведения экспериментальных исследований**

Как было показано выше (раздел 1.3), наиболее надежным способом получения информации об истинных значениях сопротивления деформации являются горячие механические испытания образцов, при этом наиболее предпочтительным является метод испытаний на горячее сжатие.

Экспериментальные исследования сопротивления деформации рельсовой стали при различных термомеханических параметрах деформации проводили с использованием специальной установки «Hydrawedge II» [80-82], являющейся одним из четырех возможных сменных модулей, входящих в комплектацию комплекса для физического моделирования термомеханических процессов «Gleeble System 3800» (рисунок 13).



Рисунок 13 – Общий вид исследовательского комплекса «Gleeble System 3800»

Установка «Hydrawedge II» (рисунок 14) снабжена вспомогательными устройствами: приборами для контроля температуры, усилия, перемещения; передвижным модулем для создания искусственной атмосферы в рабочей камере; форсунками для ускорения охлаждения образца при закалке; деформирующими штангами с водяной системой охлаждения, необходимой для устранения нежелательного влияния нагрева на инструмент и измерительные приборы.

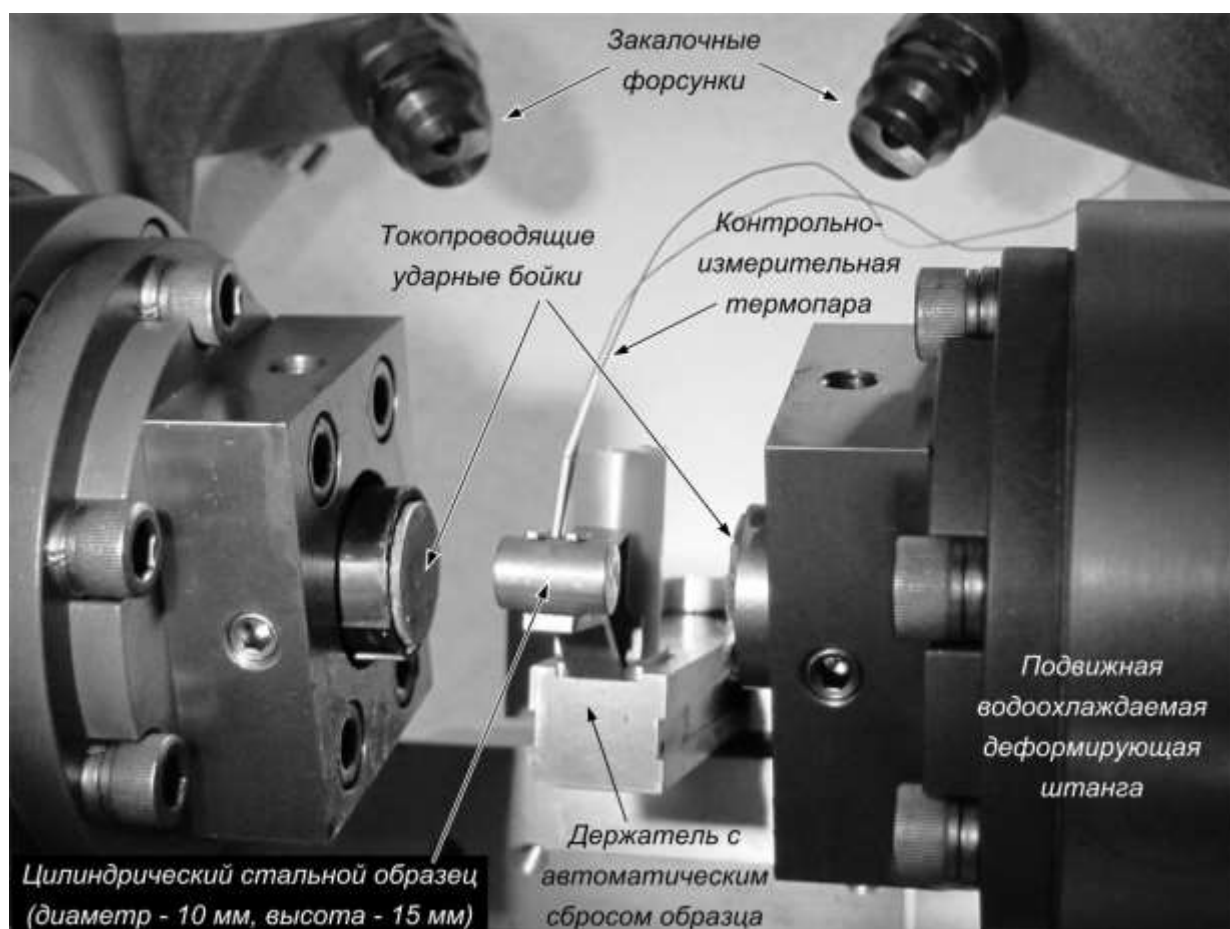


Рисунок 14 – Размещение образца в рабочей камере модуля «Hydrawedge II»

Образцы на установке «Hydrawedge II» можно деформировать в условиях: постоянной скорости перемещения деформирующей штанги; либо постоянной скорости условной или постоянной истинной деформации образца при заданной температуре.

Перед испытанием при помощи системы вакуумных насосов в рабочей камере установки «Hydrawedge II» создается инертная атмосфера или вакуум для уменьшения окисления при повышенных температурах.

Нагрев образца в «Gleeble System 3800» осуществляется при помощи непосредственного пропускания электрического тока через образец. При осуществлении горячей деформации предъявляется особое требование к температуре. В ходе испытания необходимо добиться высокой однородности температуры в объеме образца в сочетании с высокой точностью поддержания заданного уровня температуры в течение всего времени испытания. Температура контролируется с помощью приваренных к образцу термопар (например, типа хромель-алюмель) в количестве от одной до четырех. Значение подаваемой мощности электрического тока контролируется при помощи обратной связи с применением эффективного ПИД-регулятора, обеспечивающего нагрев (охлаждение) с заданной скоростью (от 0,001 до 1000°C/сек – при нагреве) и стабильное поддержание (не хуже  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ) температуры в ходе изотермической выдержки.

Применяемый в «Gleeble System 3800» способ нагрева обеспечивает высокую однородность распределения температуры по глубине образца (и относительно неплохую вдоль образца) как при изотермической выдержке, так и при нагреве. Вследствие этого, перед деформацией образца нет строгой необходимости в длительном его прогреве – изотермической выдержке при температуре испытания.

Для снижения продольного градиента температуры в образце, обусловленного его контактом с имеющими более низкую температуру бойками предусмотрено применение одного или нескольких графитовых вкладышей, размещаемых внутри держателя бойков.

Стандартная схема использования установки «Hydrawedge II» для проведения испытаний на сжатие предполагает ограничение по величине относительного обжатия 50 %, что соответствует истинной деформации порядка 69 %. Дальнейшее увеличение степени деформации приводит к

заметному возрастанию нагрузки из-за контактных сил трения и к усилению «бочковидности» образца.

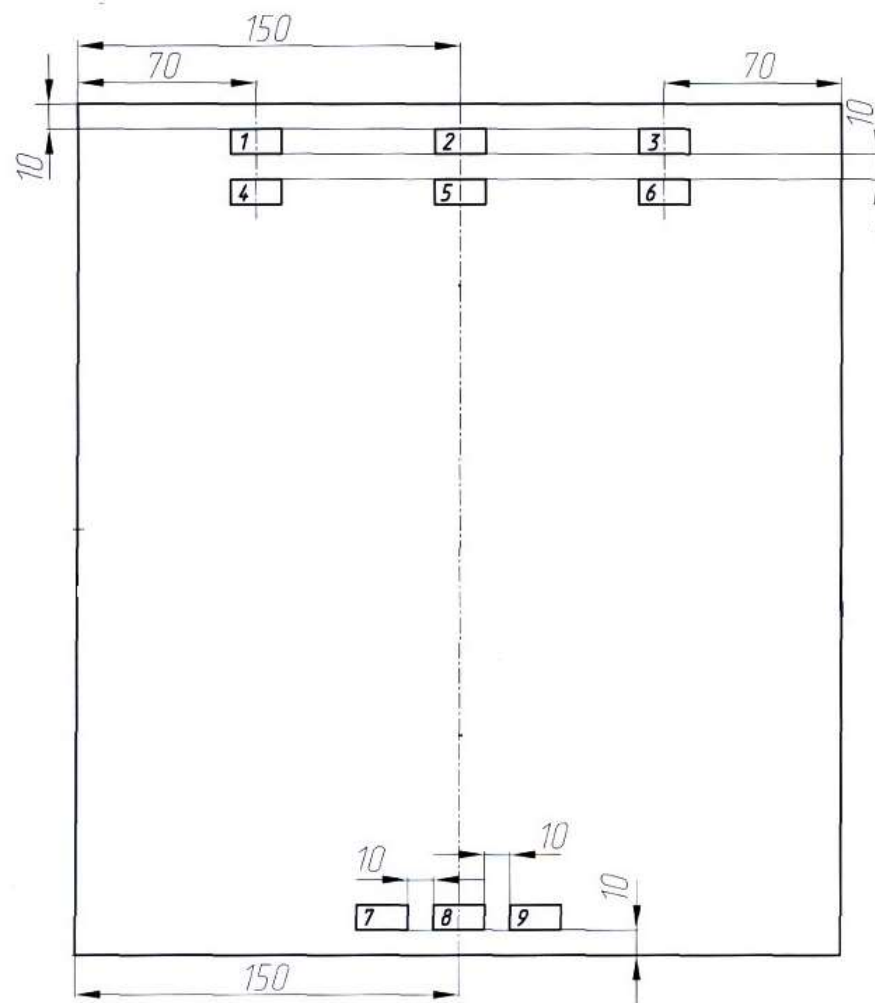
Снижение «бочкообразования» достигают двумя способами: либо уменьшают отношение диаметра образца к его высоте (выбирают равным 1:2 в отличие от обычно используемых 1:1 1:1,5), либо применяется смазка (на основе никеля, графита, нитрида бора) или специальная графитовая фольга. Следует отметить, что первый метод обладает существенным недостатком – при его использовании увеличивается вероятность перекоса образца в процессе деформации. При этом такой перекос можно минимизировать центровкой деформирующего инструмента и точной установкой образца.

При проведении исследований использовали прямоугольные и цилиндрические образцы, полученные из непрерывнолитых заготовок и рельсов 4-х плавов стали Э78ХСФ текущего производства, химический состав которых представлен в таблице 3.

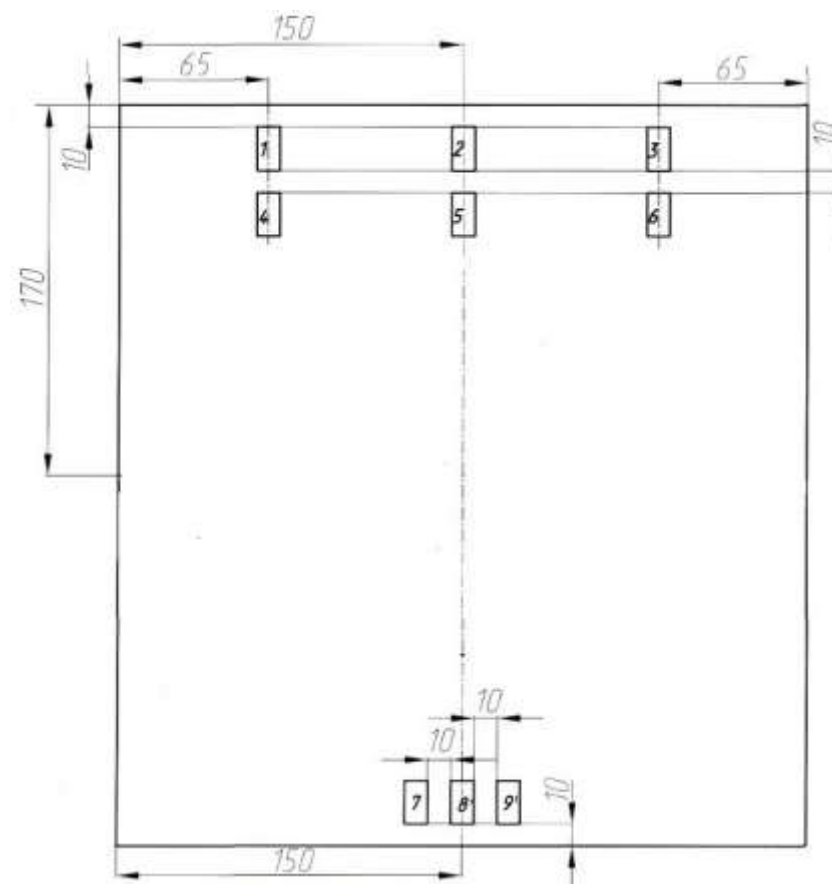
Таблица 3 – Химический состав исследуемых плавов стали Э78ХСФ

№ плавки	Содержание элемента в стали, %						
	C	Si	Mn	Cr	V	P	S
22376	0,75	0,55	0,83	0,42	0,04	0,012	0,008
22674	0,79	0,43	1,09	0,57	0,04	0,016	0,009
28551	0,79	0,55	0,78	0,46	0,07	0,014	0,015
28554	0,76	0,32	0,87	0,56	0,07	0,017	0,005

Схемы вырезки образцов из непрерывнолитых заготовок и готовых рельсов представлены на рисунках 15 и 16 соответственно.

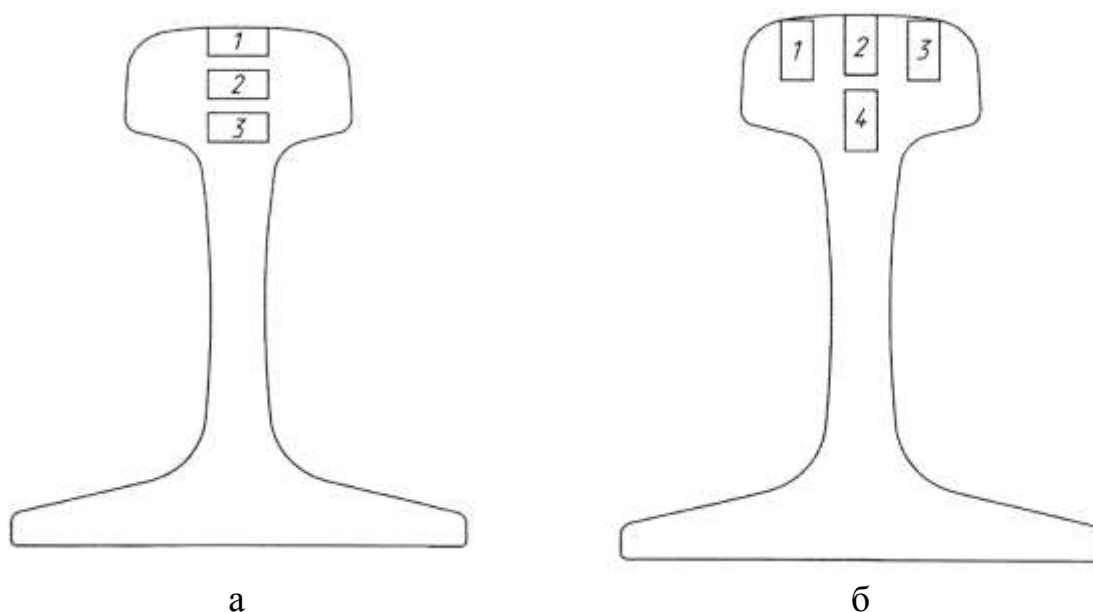


а



б

а – горизонтальное расположение образцов; б – вертикальное расположение образцов  
Рисунок 15 – Схема вырезки образцов из непрерывнолитых заготовок для проведения испытаний



а – горизонтальное расположение образцов;  
б – вертикальное расположение образцов

Рисунок 16 – Схема вырезки образцов из готовых рельсов для проведения испытаний

Испытания проводились по режиму, который включает в себя следующие стадии (рисунок 17) 1 – нагрев темплета в вакууме со скоростью  $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$  до температуры  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течении 240 сек., 2 – изотермическая выдержка в течении 600 сек. при температуре  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 3 – подстуживание стали до температуры деформации со скоростью  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , 4 – деформация методом сжатия, 5 – охлаждение стали.

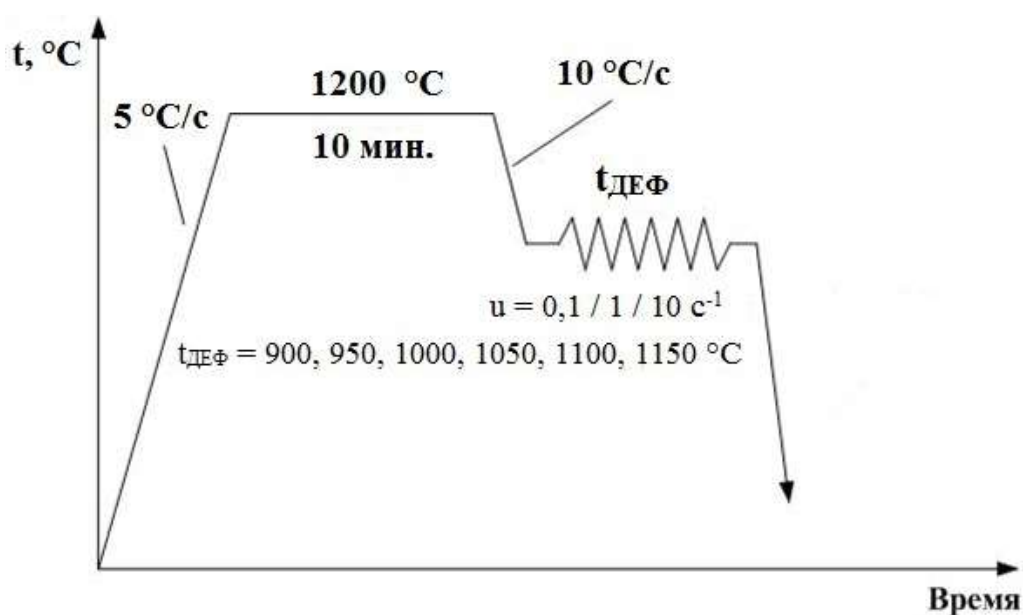


Рисунок 17 – Схема испытания образцов рельсовой стали

Образцы деформировали со скоростями 0,1, 1 и 10 с<sup>-1</sup> при температурах 1150, 1100, 1050, 1000, 950 и 900 °С.

## **2.2 Анализ результатов экспериментальных исследований сопротивления деформации хромистой рельсовой стали при изменяющихся параметрах прокатки**

Результаты проведенных экспериментальных исследований обобщены в виде графических зависимостей сопротивления деформации от степени деформации, температуры и скорости деформации (рисунки 18-41).

Полученные кривые зависимости сопротивления деформации от степени деформации на участках, где степень деформации не превышает значений порядка 0,7, имеют выраженный в той или иной степени максимум (по типу кривой 3 на рисунке 8). То есть при достижении определенной степени деформации в стали в дополнении к динамическому возврату и полигонизации протекает также и динамическая рекристаллизация. При этом указанный максимум смещается в сторону увеличения степени деформации при повышении температуры и смещается в обратном направлении при увеличении скорости деформации. Далее на участке, соответствующем степени деформации 0,7-1,0 на некоторых кривых имеет место повторное увеличение сопротивления деформации, что, очевидно обусловлено погрешностью эксперимента при высоких значениях сопротивления деформации. Как отмечалось ранее (раздел 1.2) при высоких степенях деформации (более 70 %) из-за выраженной «бочковидной» формы образца резко повышается погрешность результатов механических испытаний на сжатие.

По полученным данным повышение температуры прокатки рельсовой стали Э78ХСФ стали в интервале 900-1150<sup>0</sup>С приводит к снижению сопротивления деформации, а повышение скорости деформации в интервале 0,1-10 с<sup>-1</sup> наоборот увеличивает сопротивление деформации.



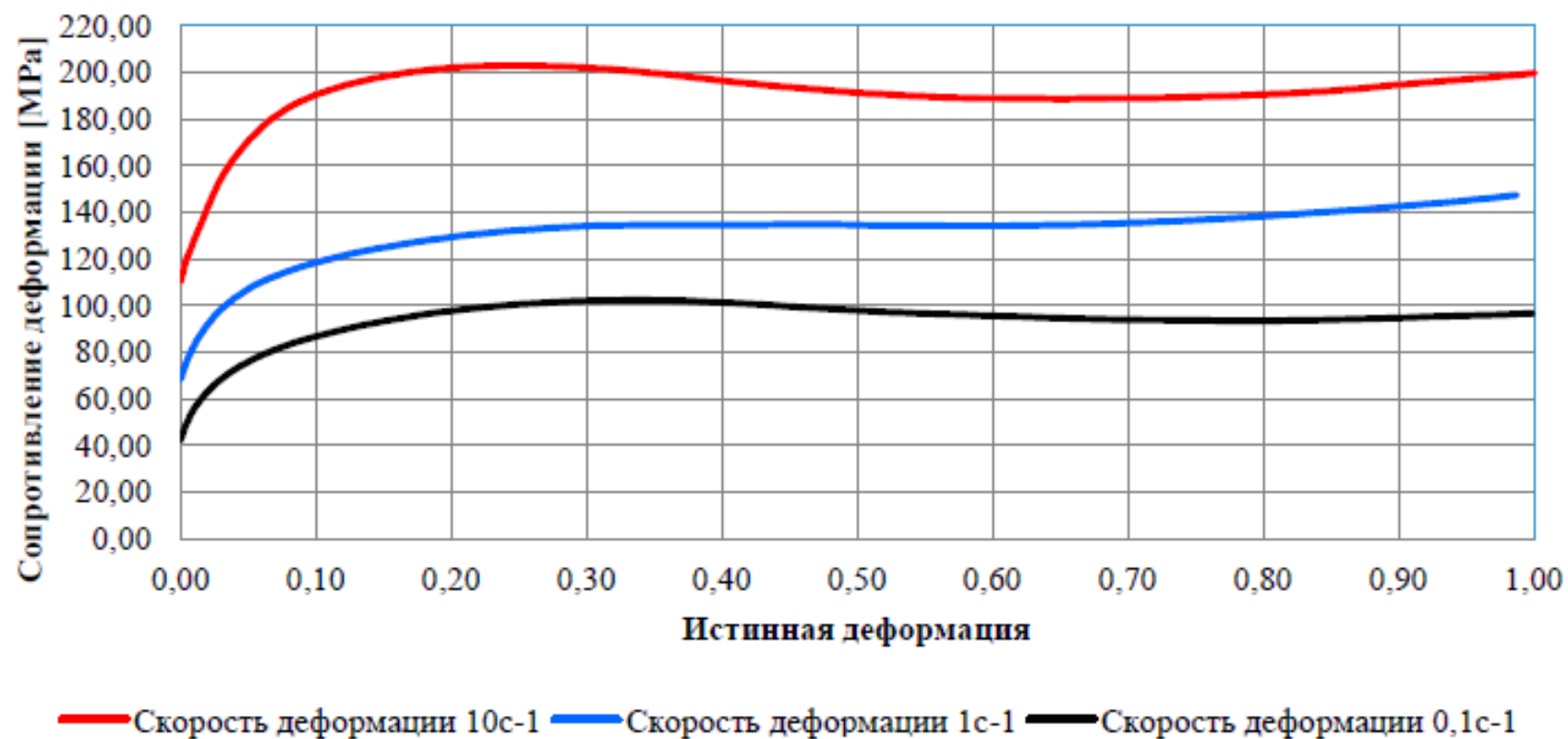


Рисунок 18 – Зависимость сопротивления деформации от степени деформации образцов рельсов от плавки 22376 при температуре 900°C

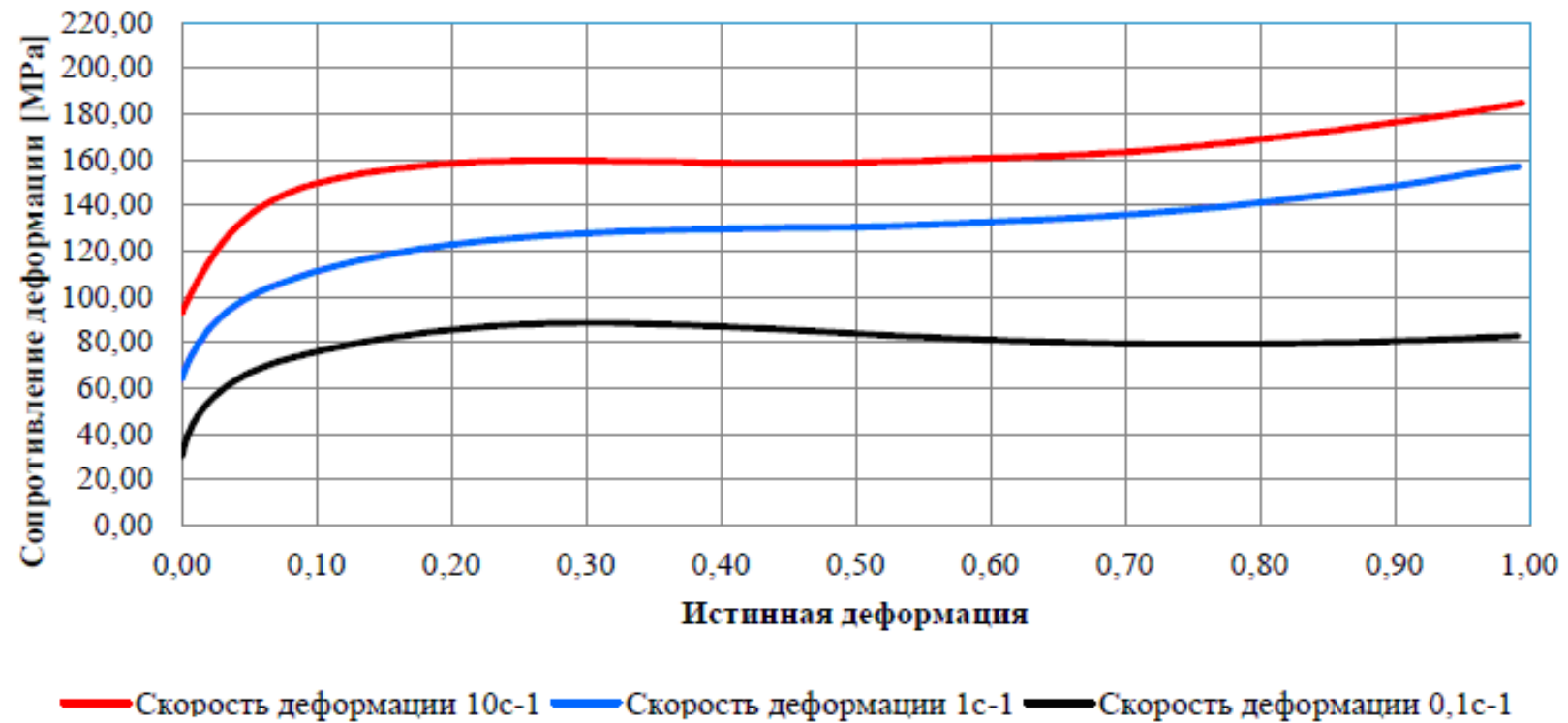


Рисунок 19 – Зависимость сопротивления деформации от степени деформации образцов рельсов от плавки 22376 при температуре 950°C

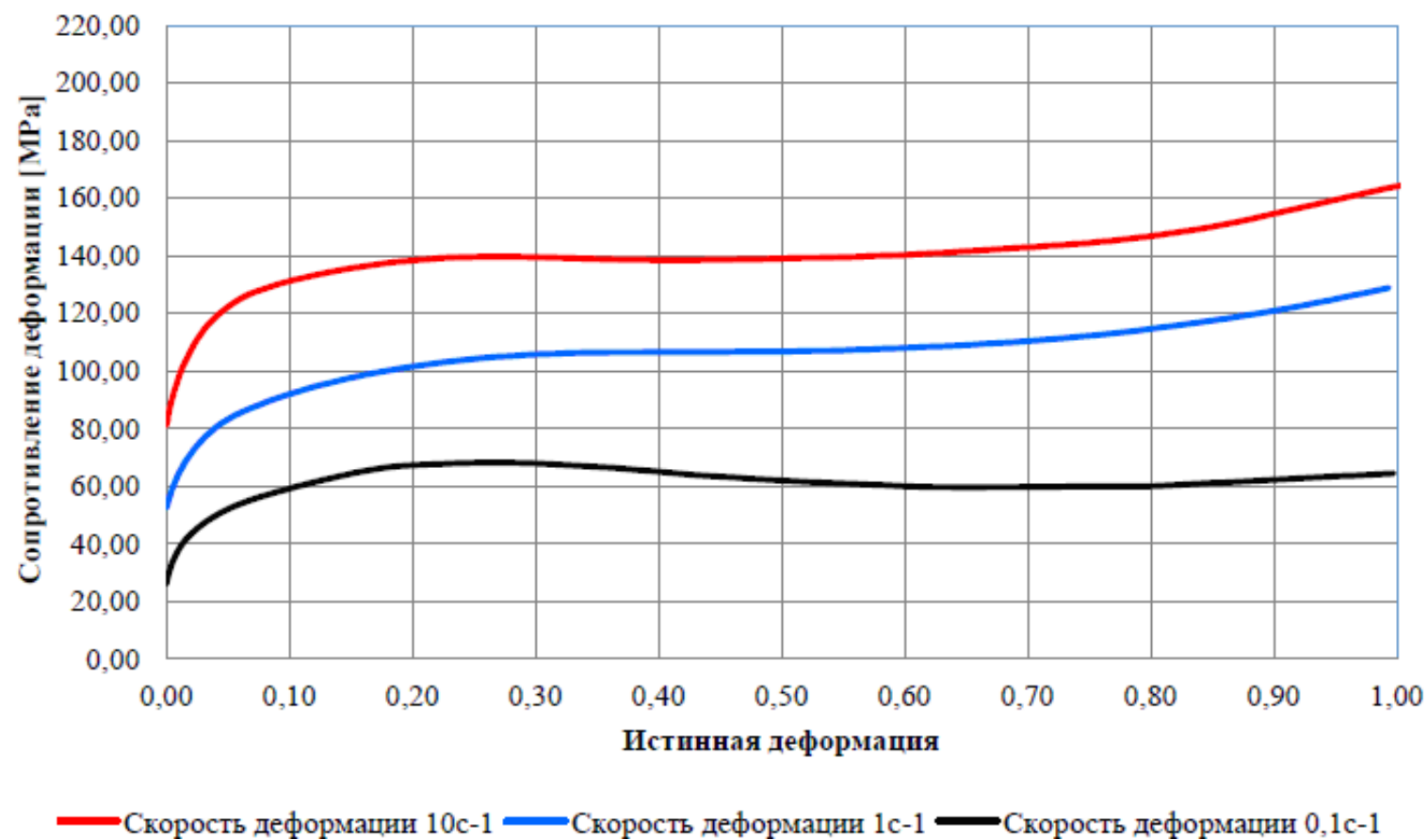


Рисунок 20 – Зависимость сопротивления деформации от степени деформации образцов рельсов от плавки 22376 при температуре 1000°C

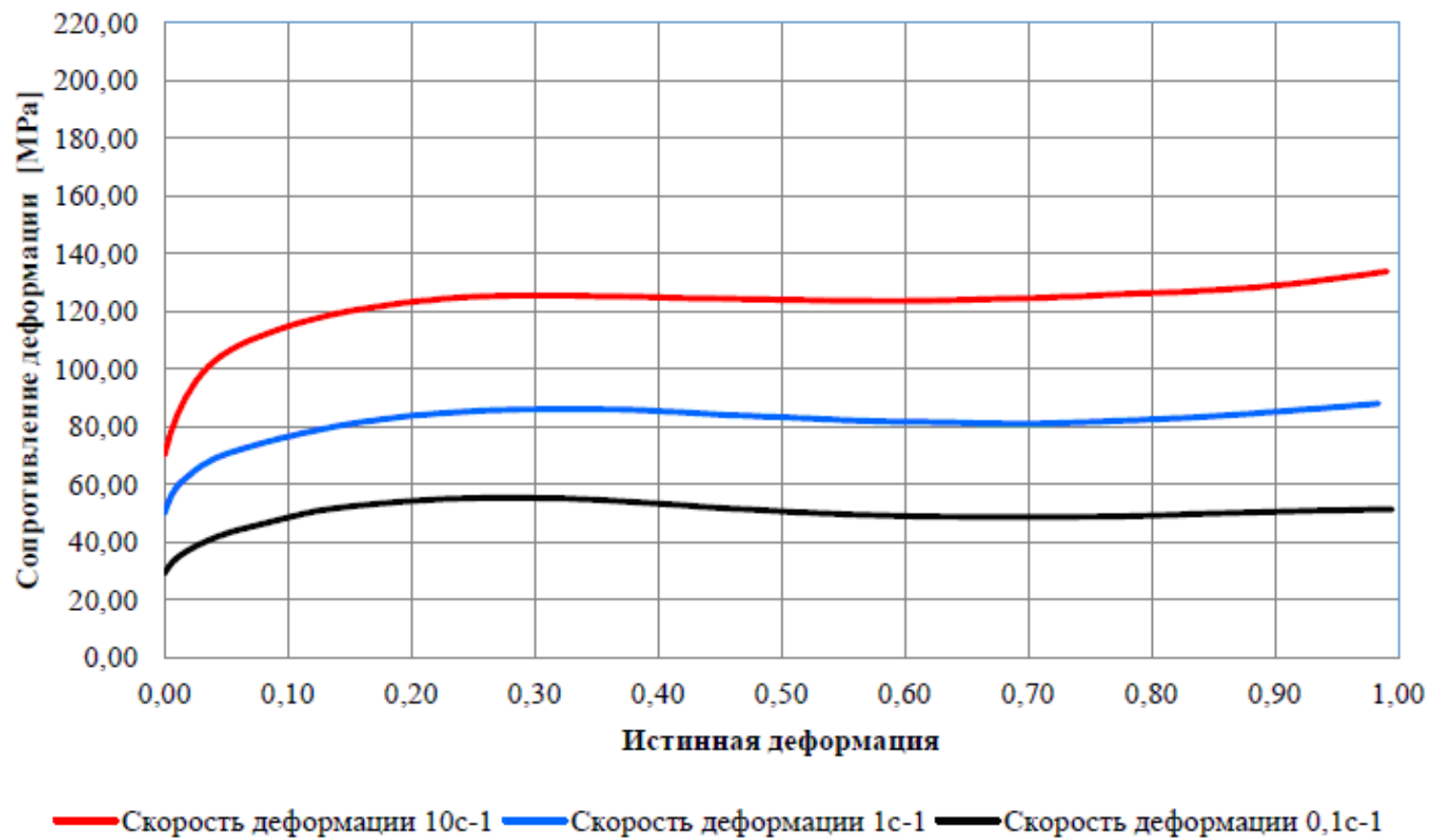


Рисунок 21 – Зависимость сопротивления деформации от степени деформации образцов рельсов от плавки 22376 при температуре 1050°C

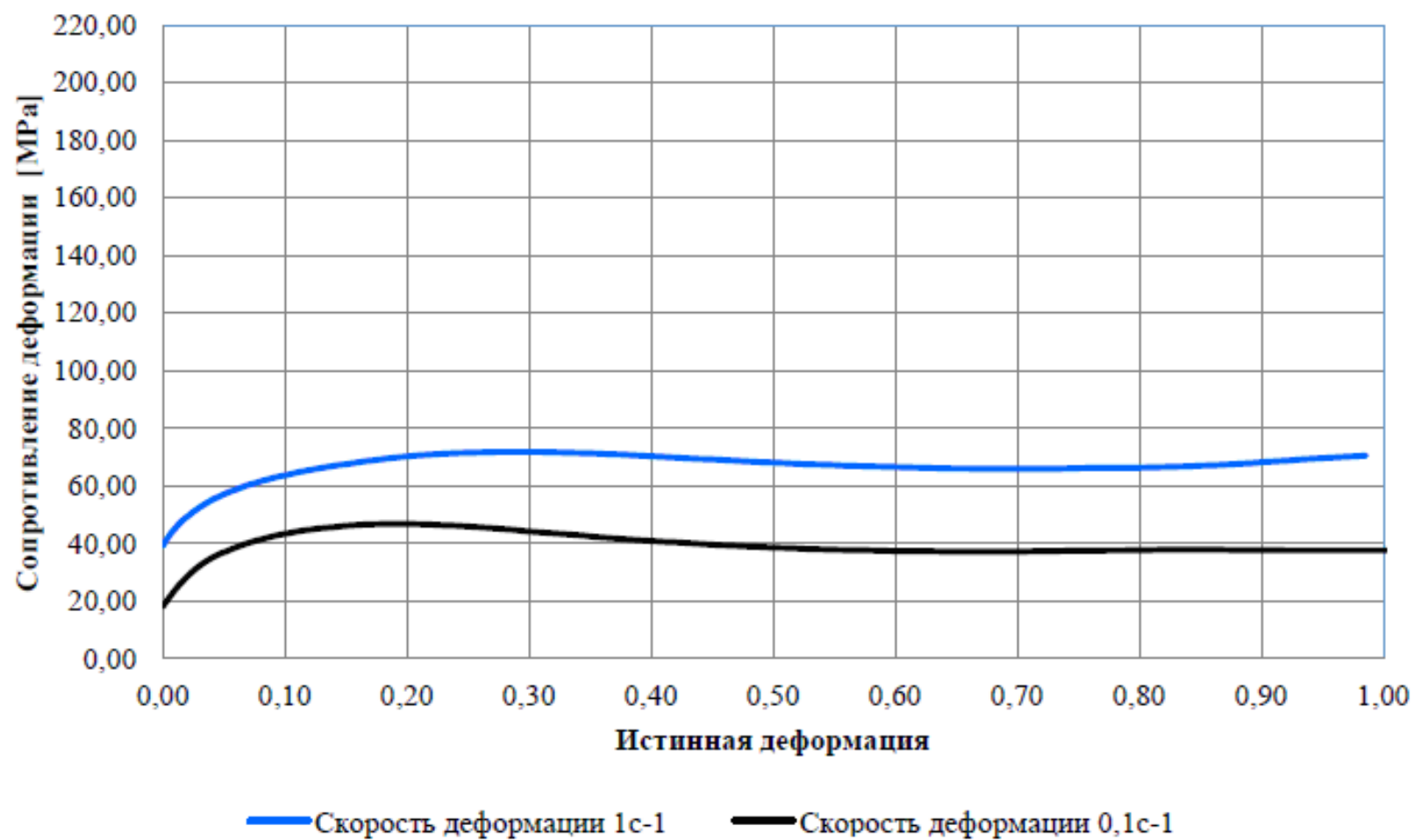


Рисунок 22 – Зависимость сопротивления деформации от степени деформации образцов рельсов от плавки 22376 при температуре 1100°C

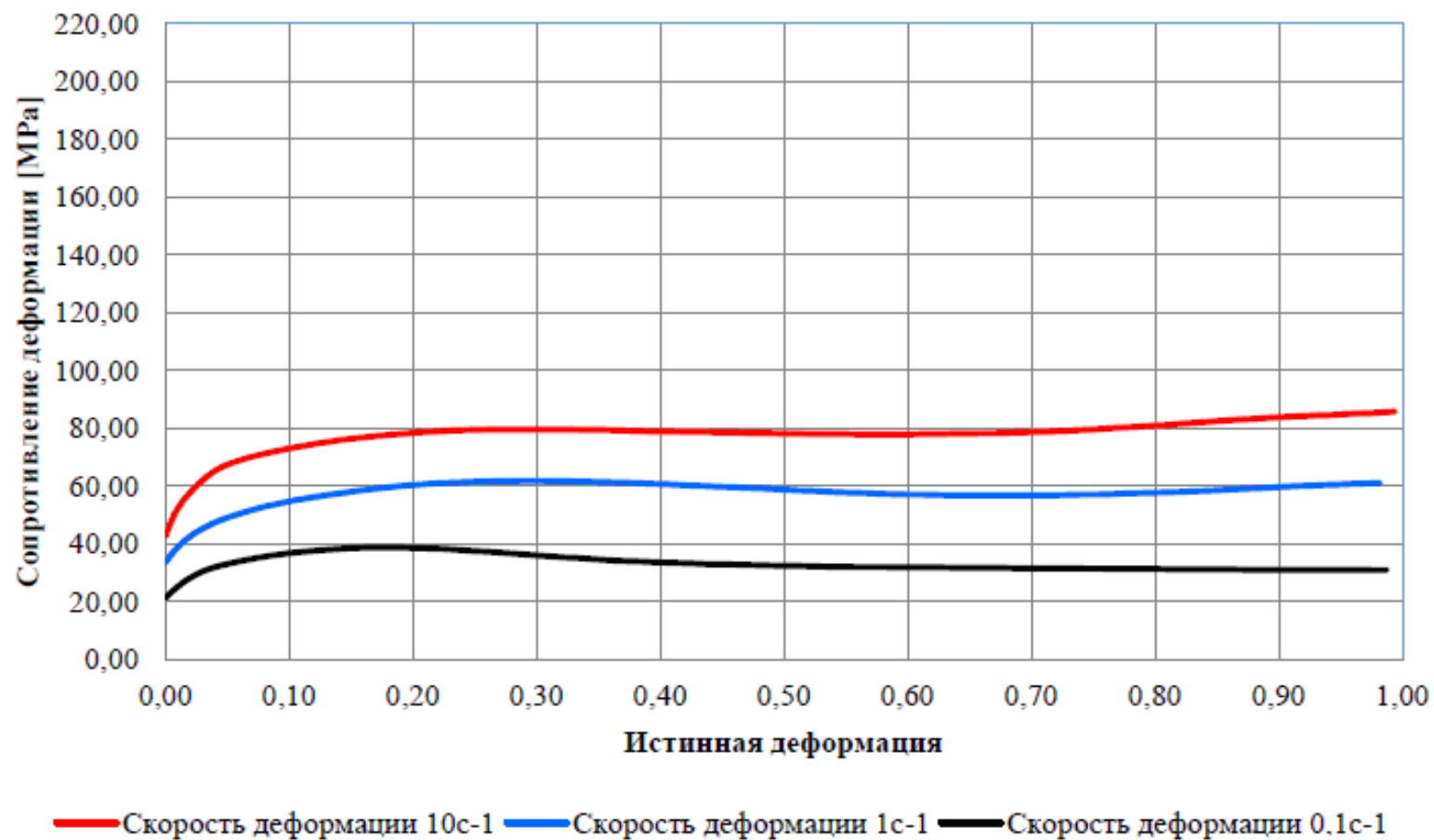


Рисунок 23 – Зависимость сопротивления деформации от степени деформации образцов рельсов от плавки 22376 при температуре 1150°C

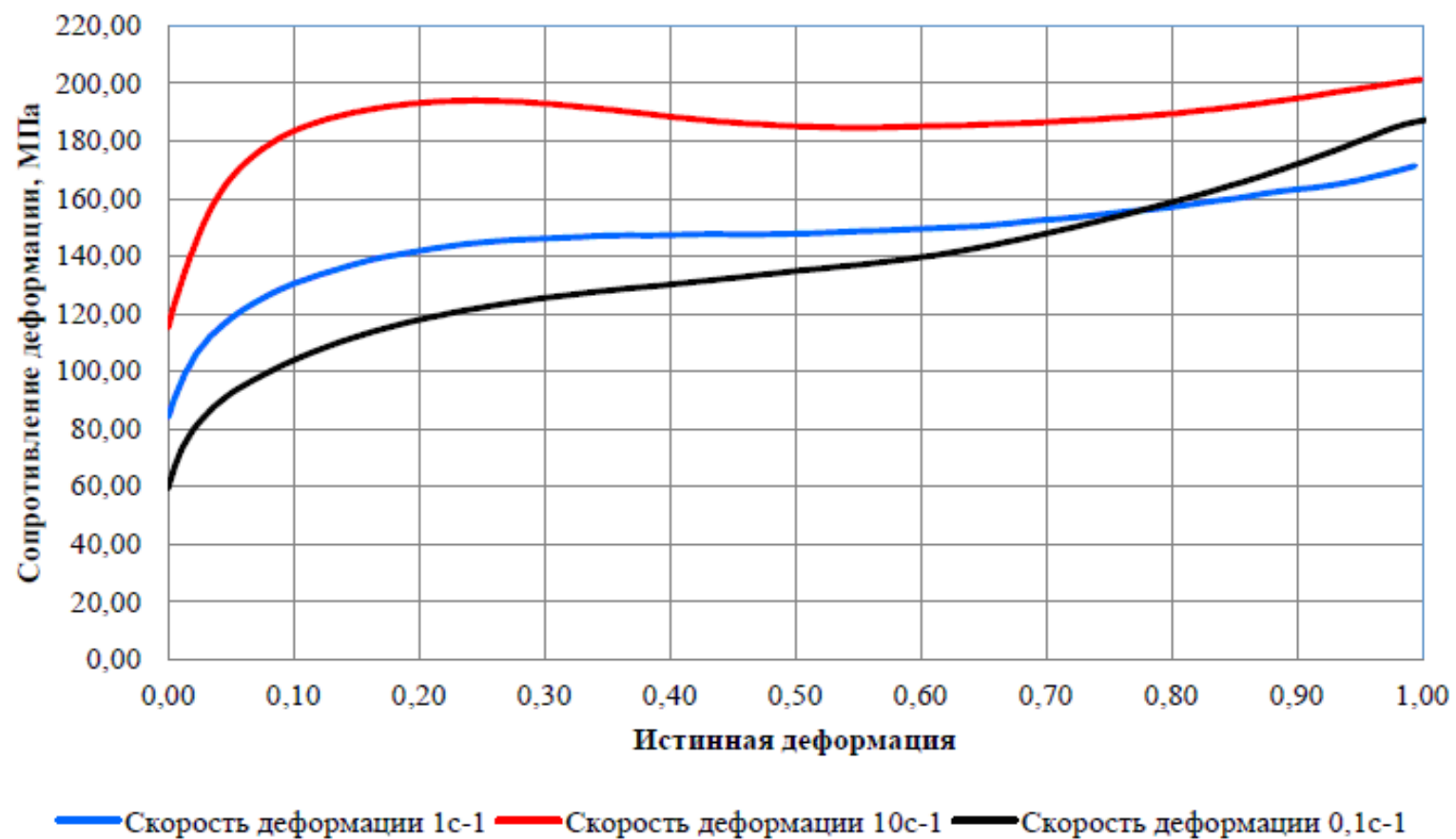


Рисунок 24 – Зависимость сопротивления деформации от степени деформации образцов рельсов от плавки 22674 при температуре 900°C

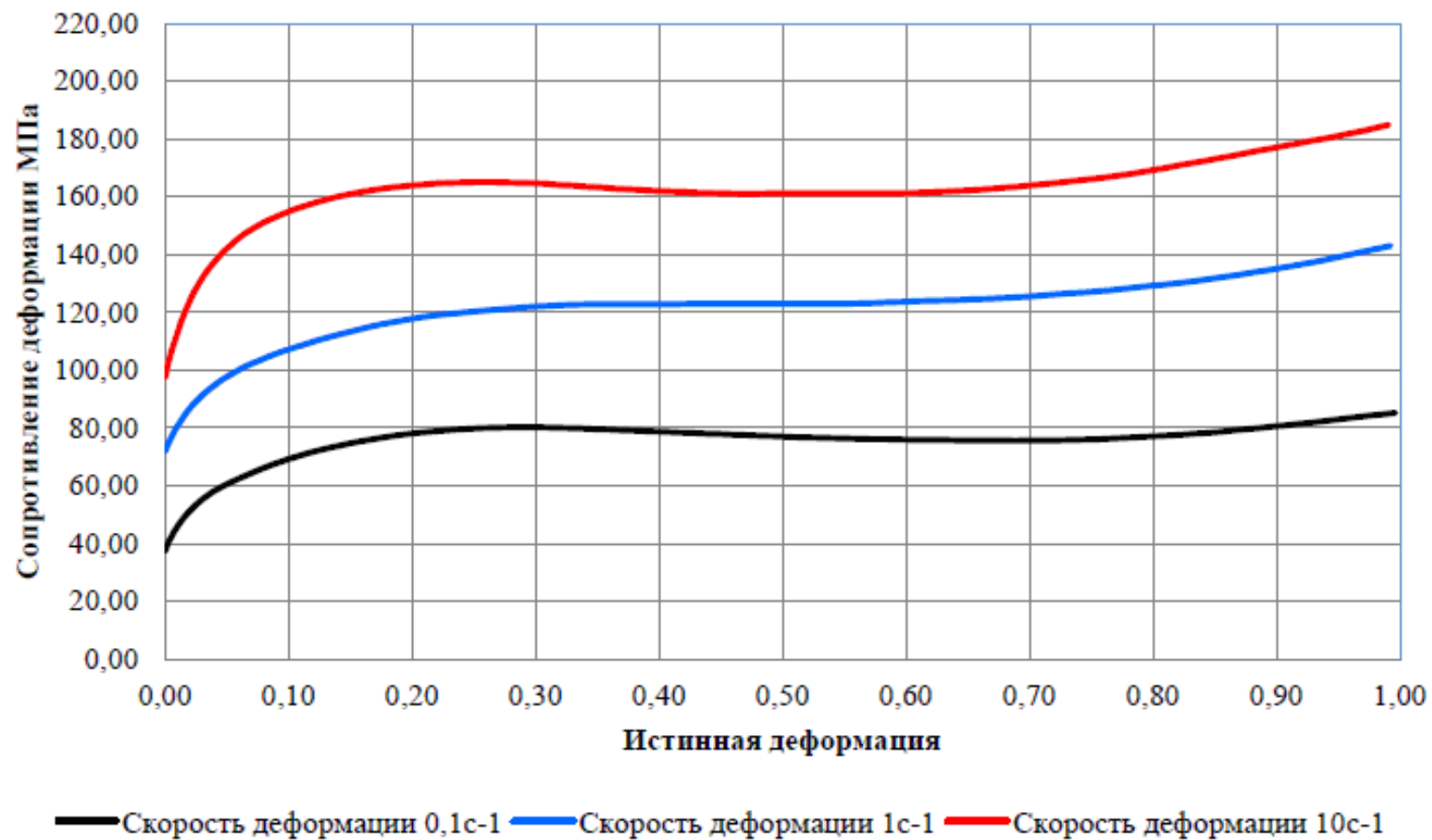


Рисунок 25 – Зависимость сопротивления деформации от степени деформации образцов рельсов от плавки 22674 при температуре 950°C



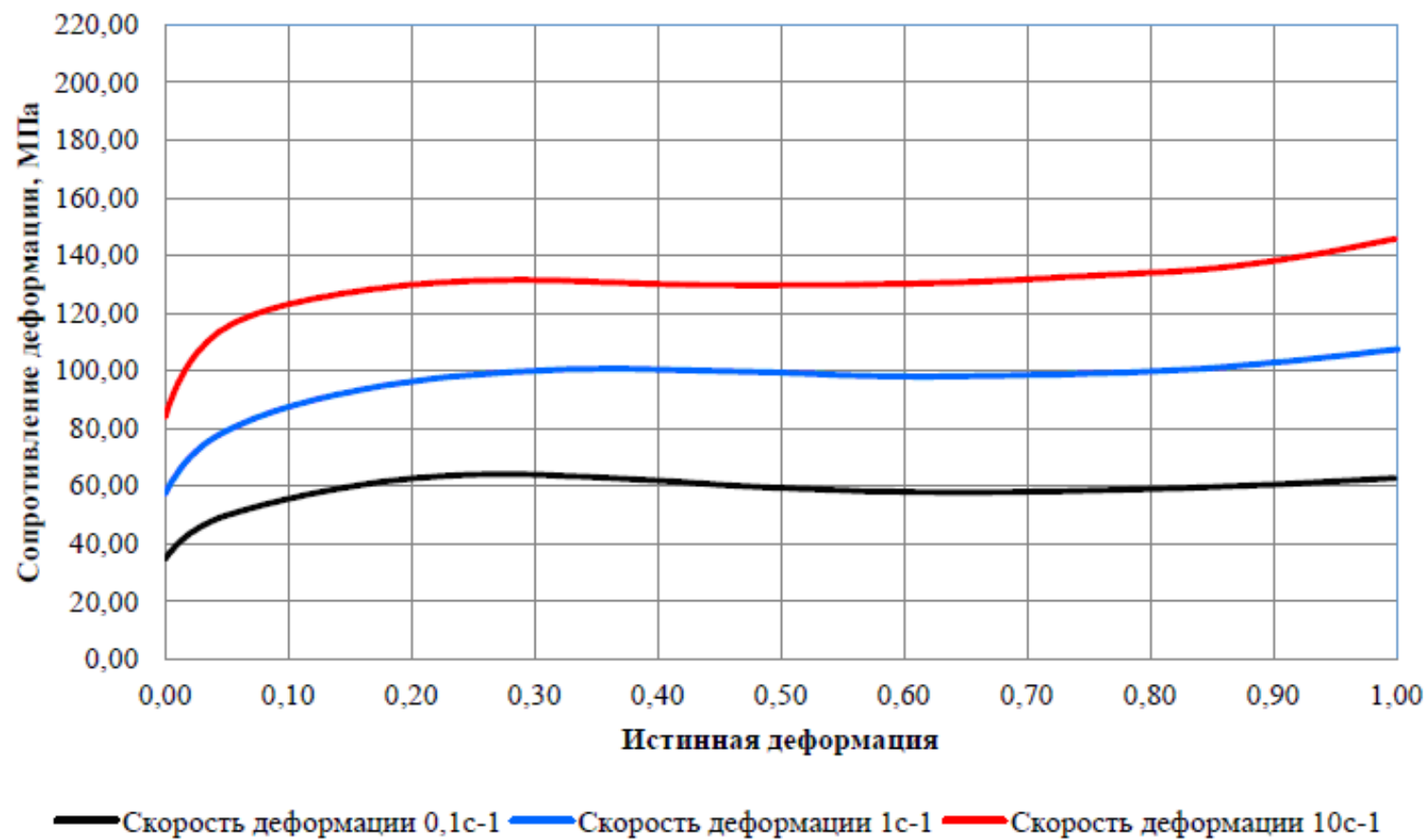


Рисунок 26 – Зависимость сопротивления деформации от степени деформации образцов рельсов от плавки 22674 при температуре 1000°C

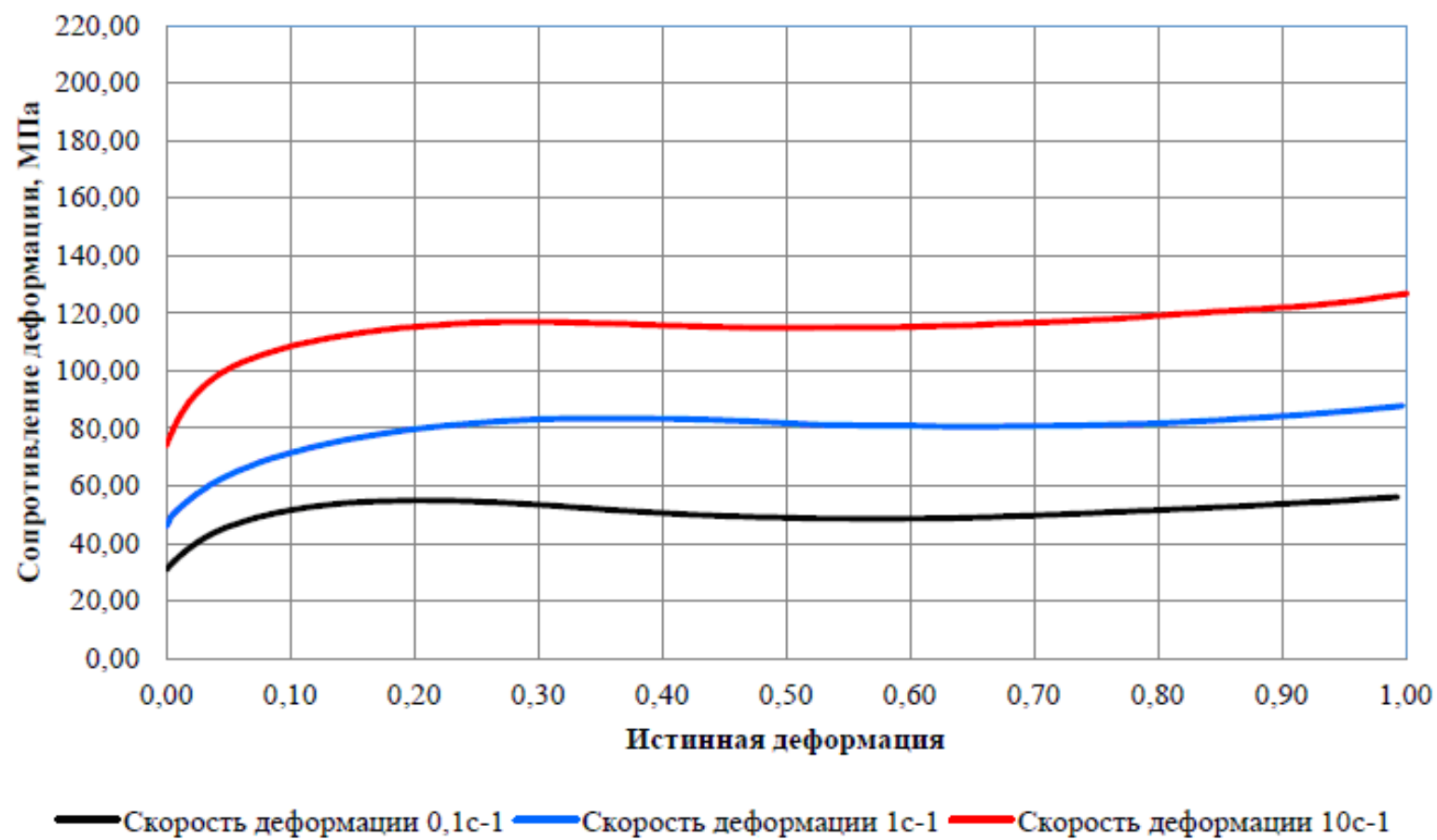


Рисунок 27 – Зависимость сопротивления деформации от степени деформации образцов рельсов от плавки 22674 при температуре 1050°C

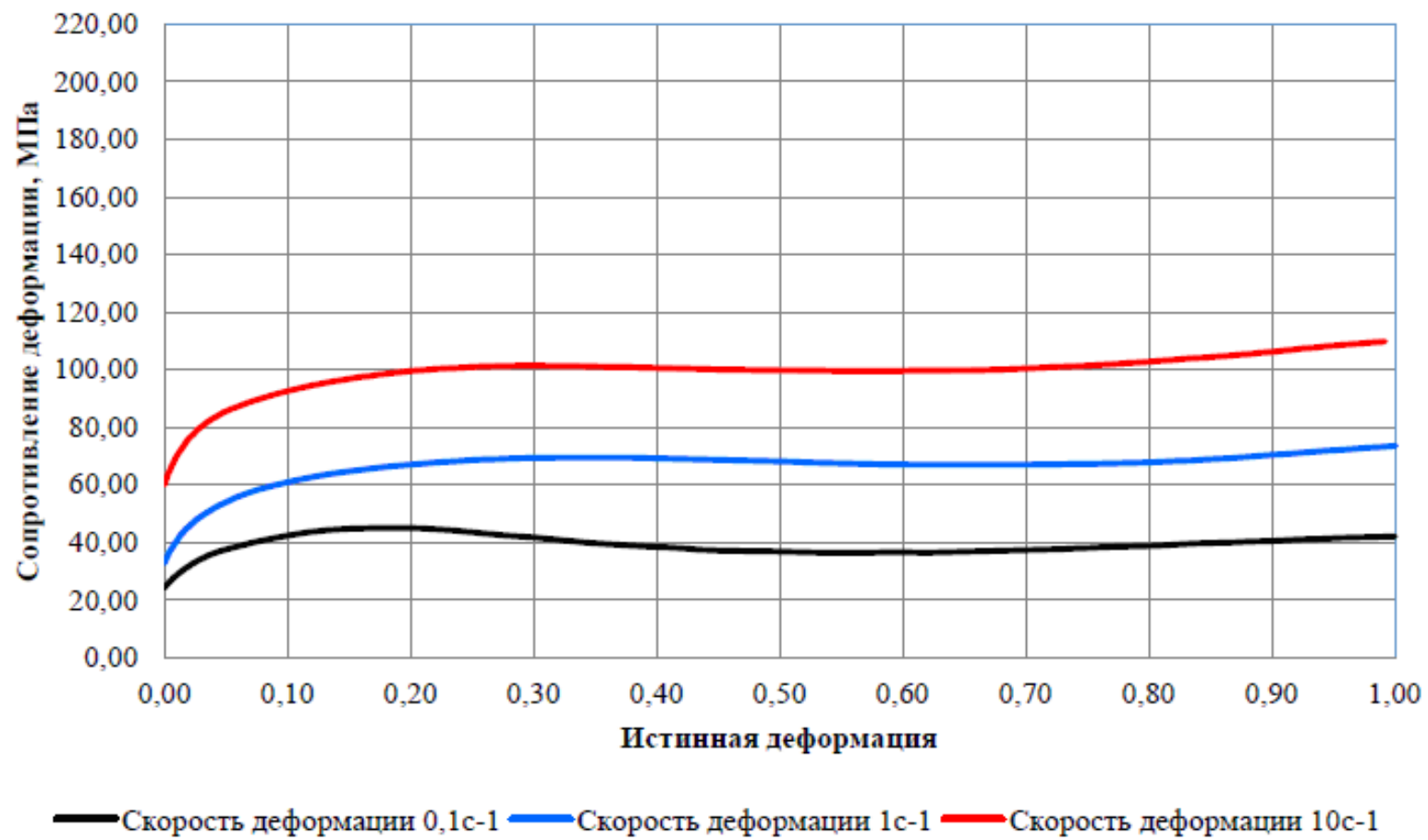


Рисунок 28 – Зависимость сопротивления деформации от степени деформации образцов рельсов от плавки 22674 при температуре 1100°C

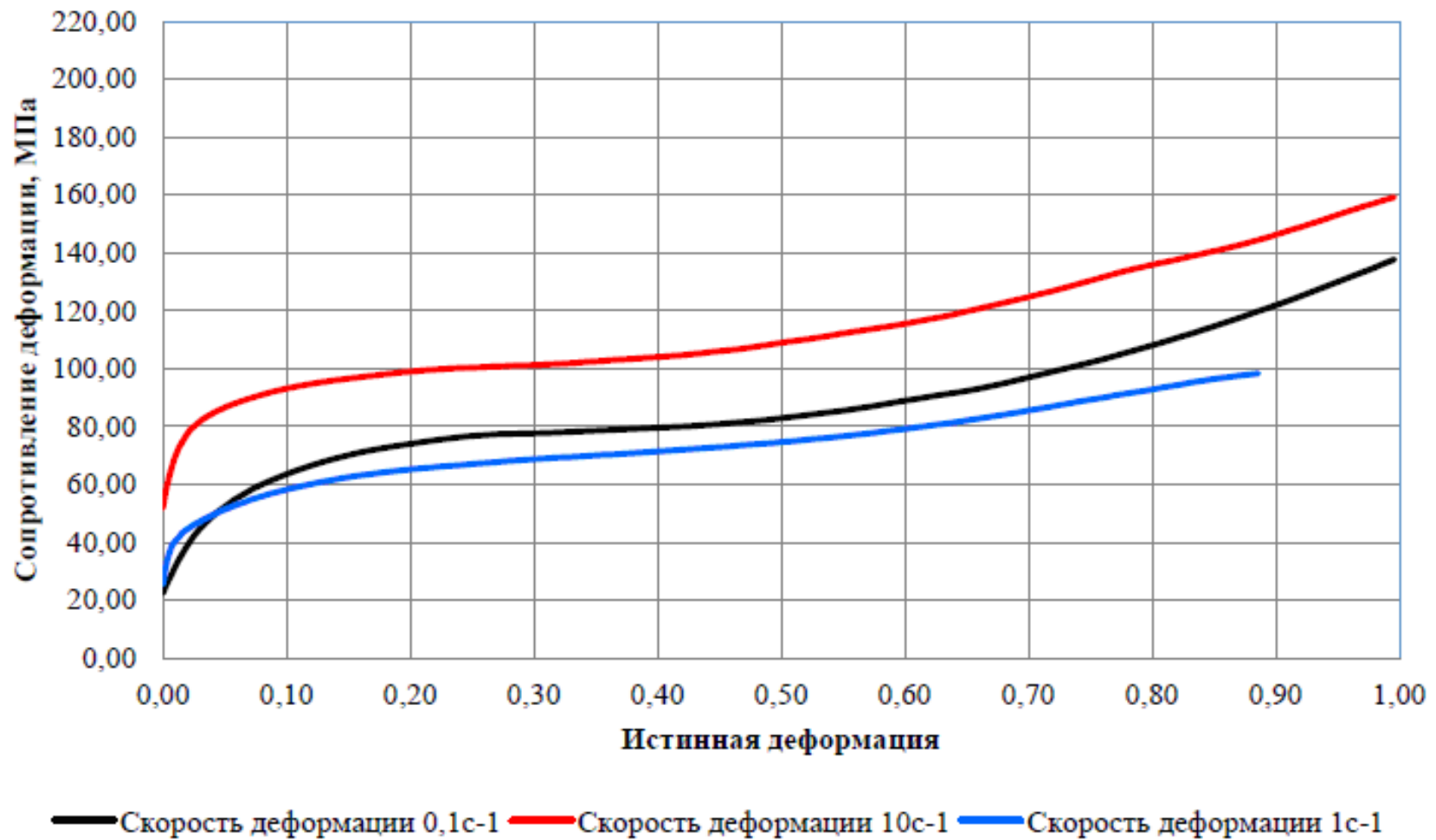


Рисунок 29 – Зависимость сопротивления деформации от степени деформации образцов рельсов от плавки 22674 при температуре 1150°C

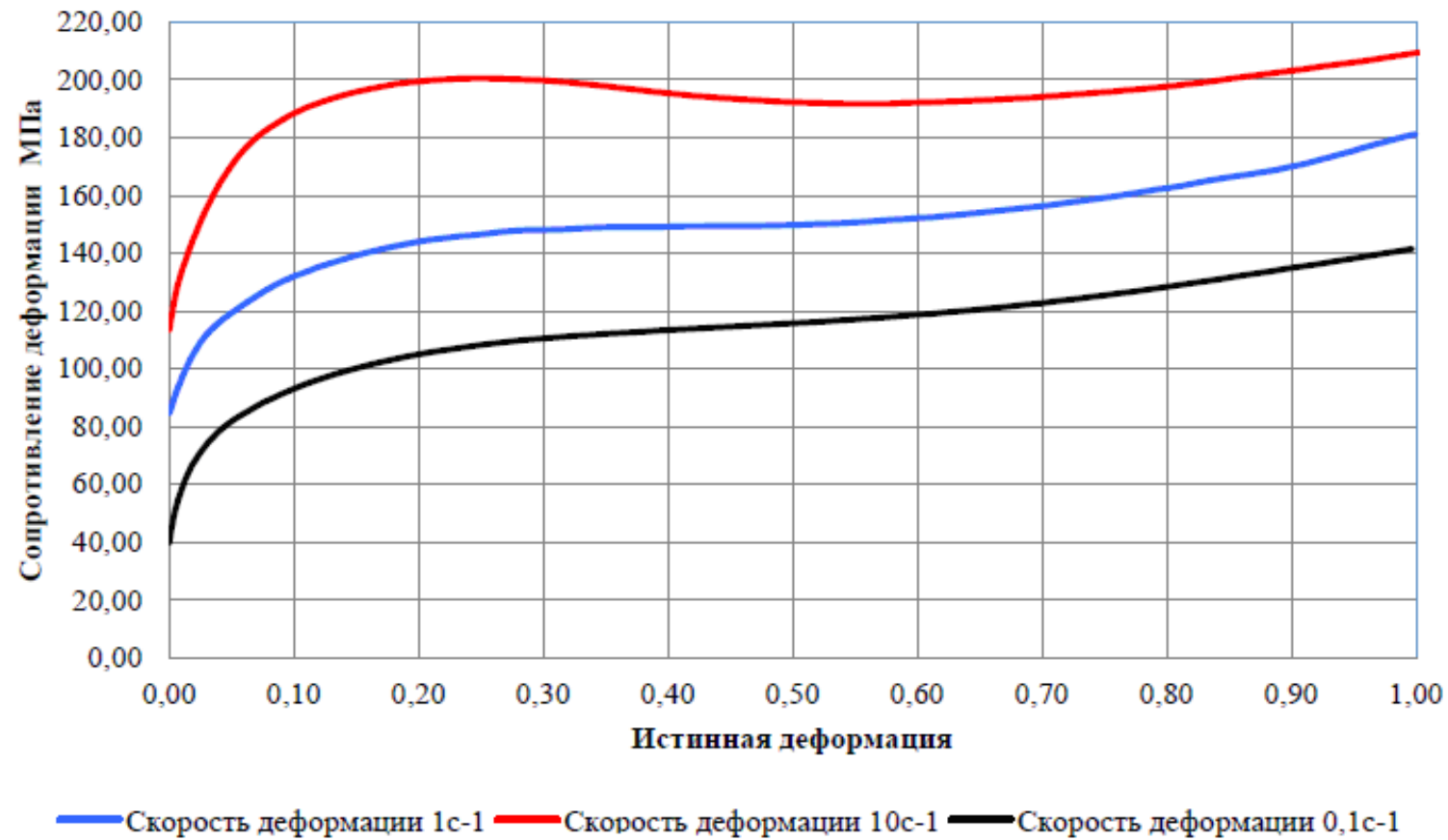


Рисунок 30 – Зависимость сопротивления деформации от степени деформации образцов рельсов от плавки 28551 при температуре 900°C

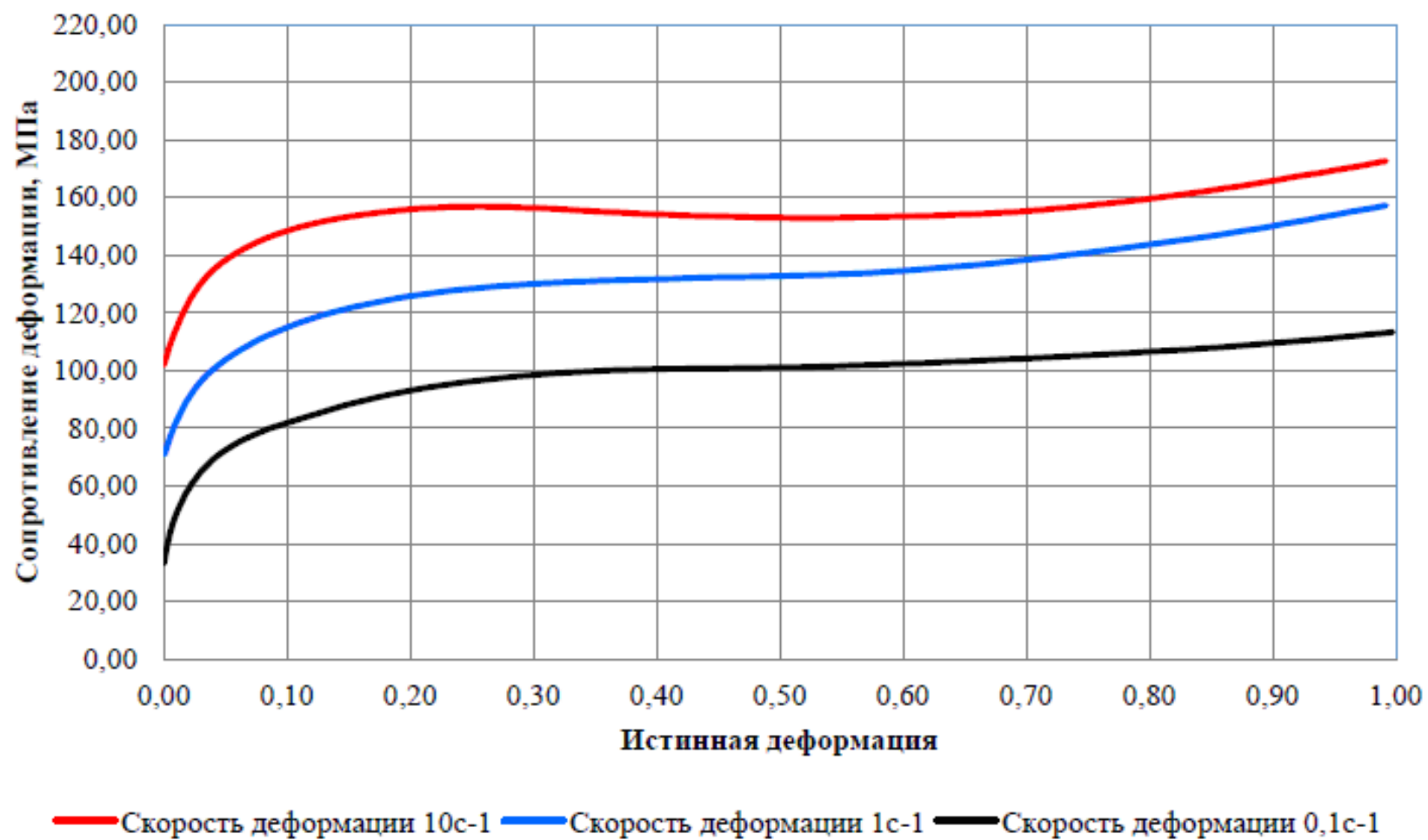


Рисунок 31 – Зависимость сопротивления деформации от степени деформации образцов рельсов от плавки 28551 при температуре 950°C

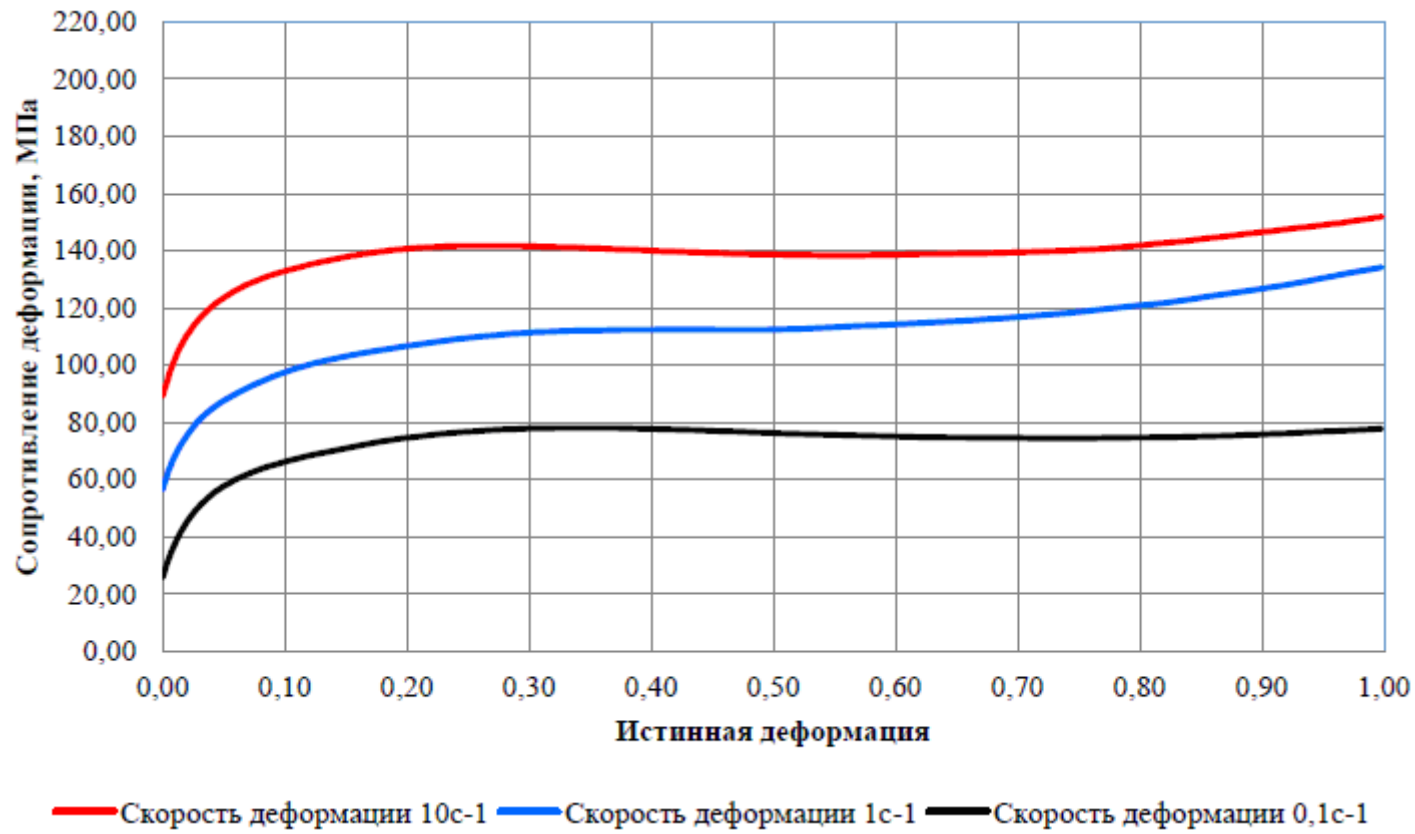


Рисунок 32 – Зависимость сопротивления деформации от степени деформации образцов рельсов от плавки 28551 при температуре 1000°C

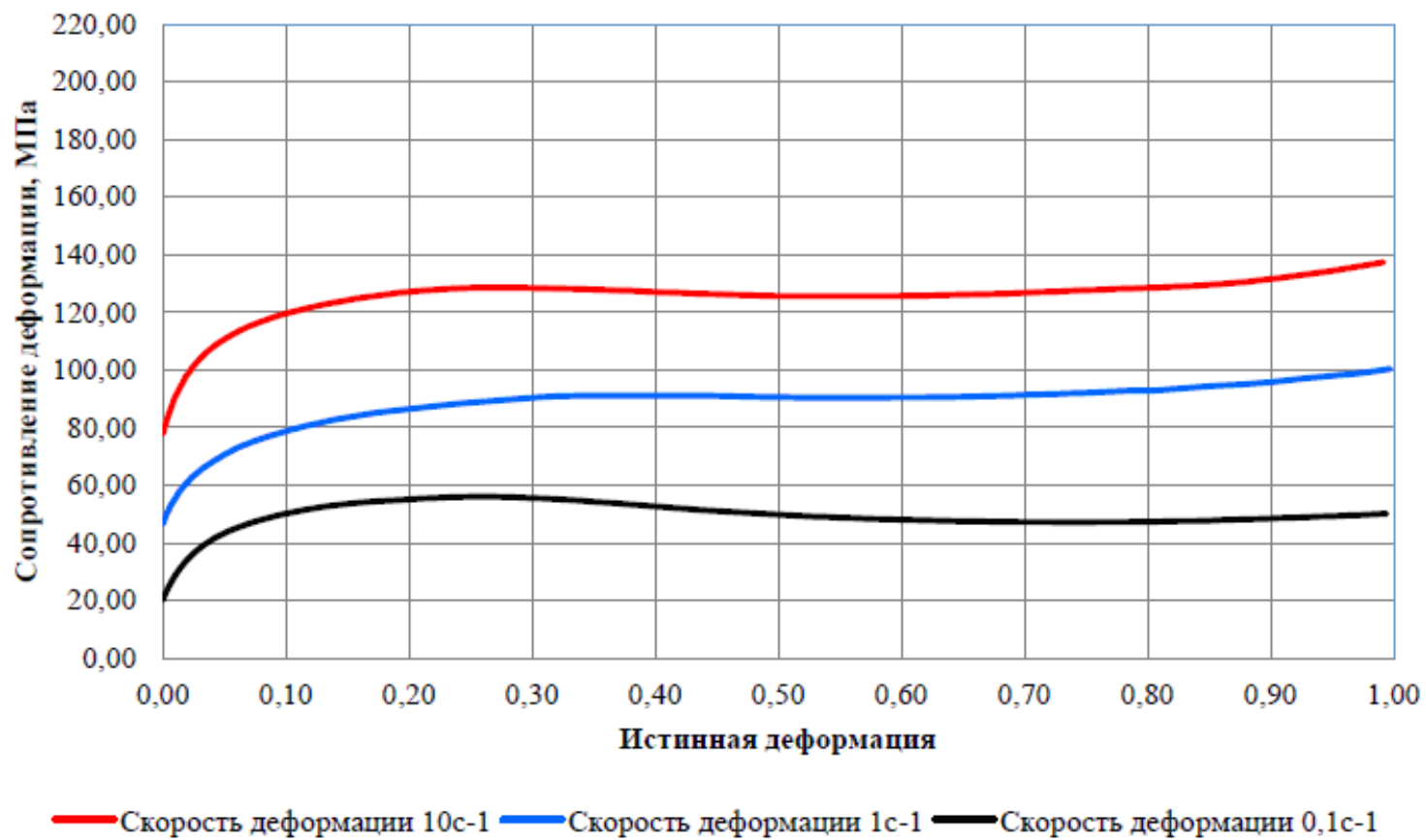


Рисунок 33 – Зависимость сопротивления деформации от степени деформации образцов рельсов от плавки 28551 при температуре 1050°C



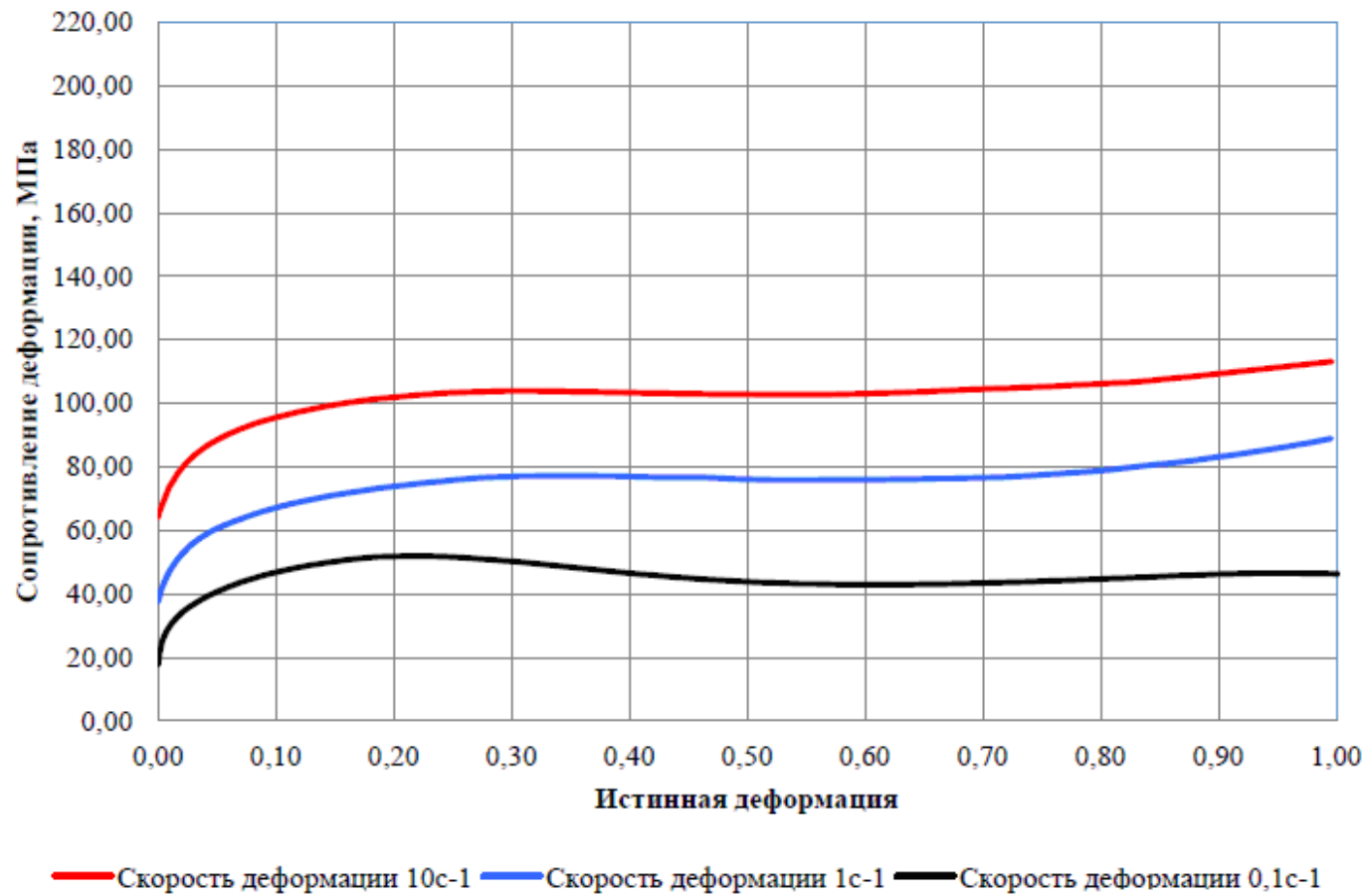


Рисунок 34 – Зависимость сопротивления деформации от степени деформации образцов рельсов от плавки 28551 при температуре 1100°C

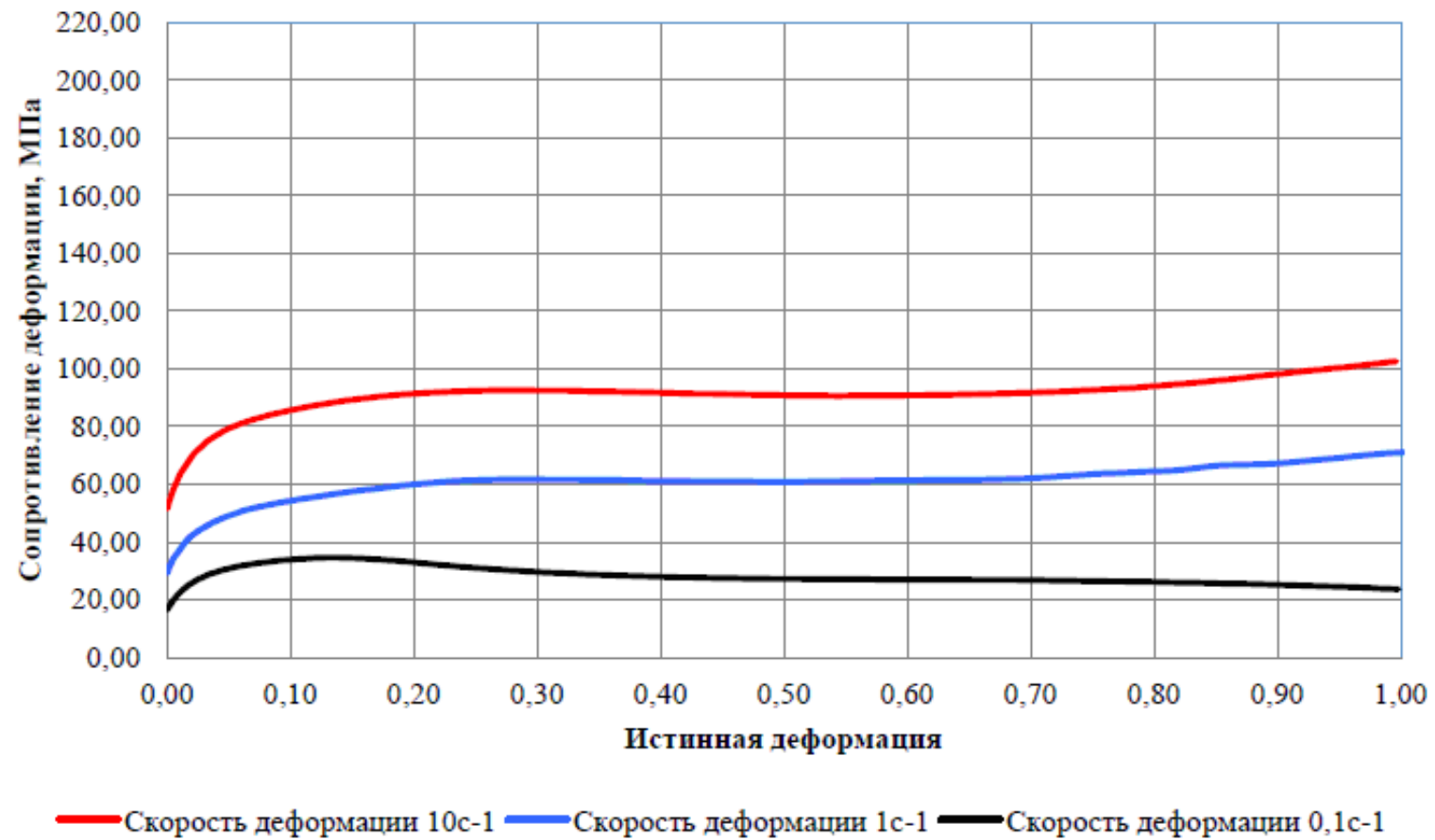


Рисунок 35 – Зависимость сопротивления деформации от степени деформации образцов рельсов от плавки 28551 при температуре 1150°C

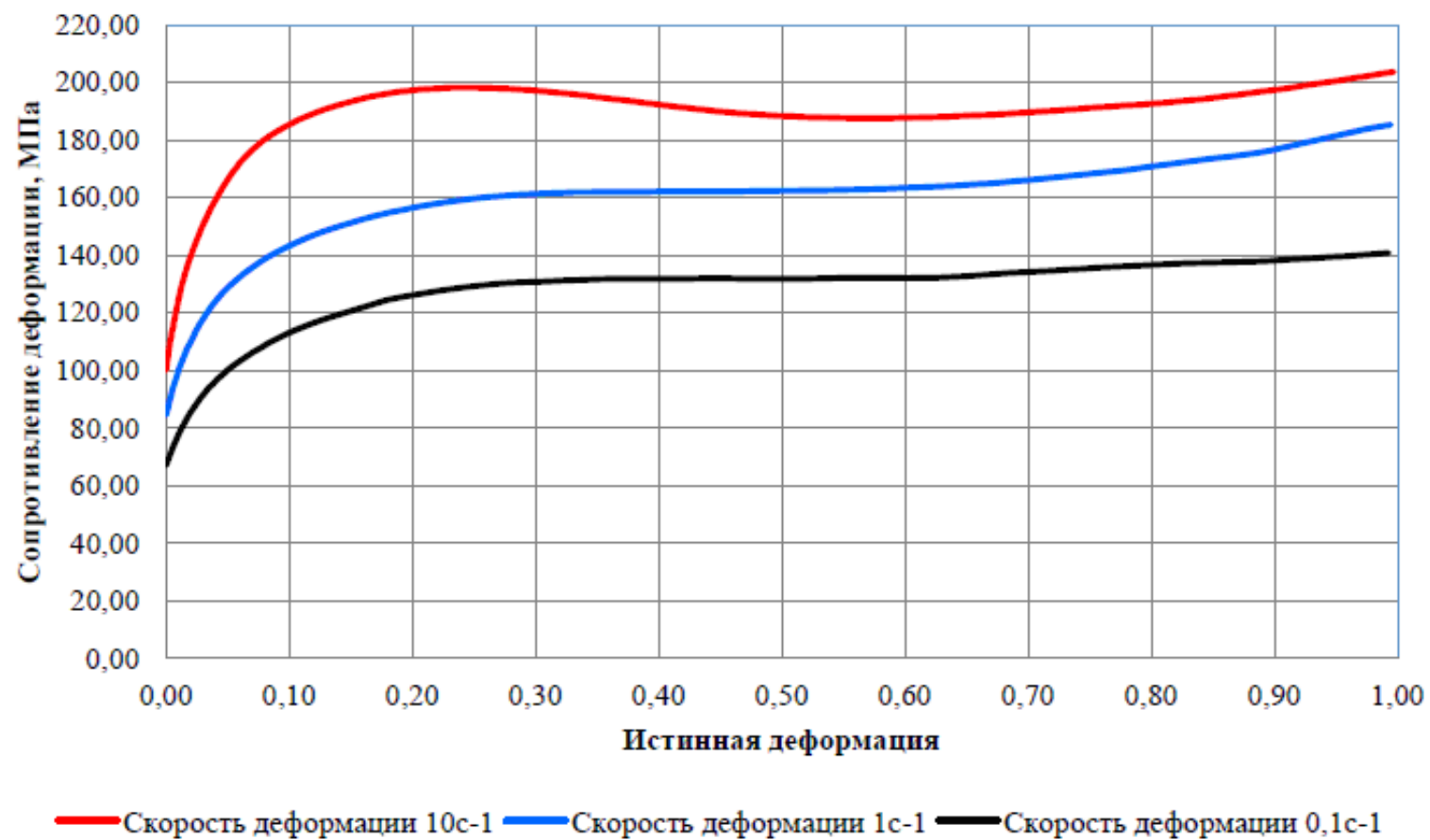


Рисунок 36 – Зависимость сопротивления деформации от степени деформации образцов рельсов от плавки 28554 при температуре 900°C

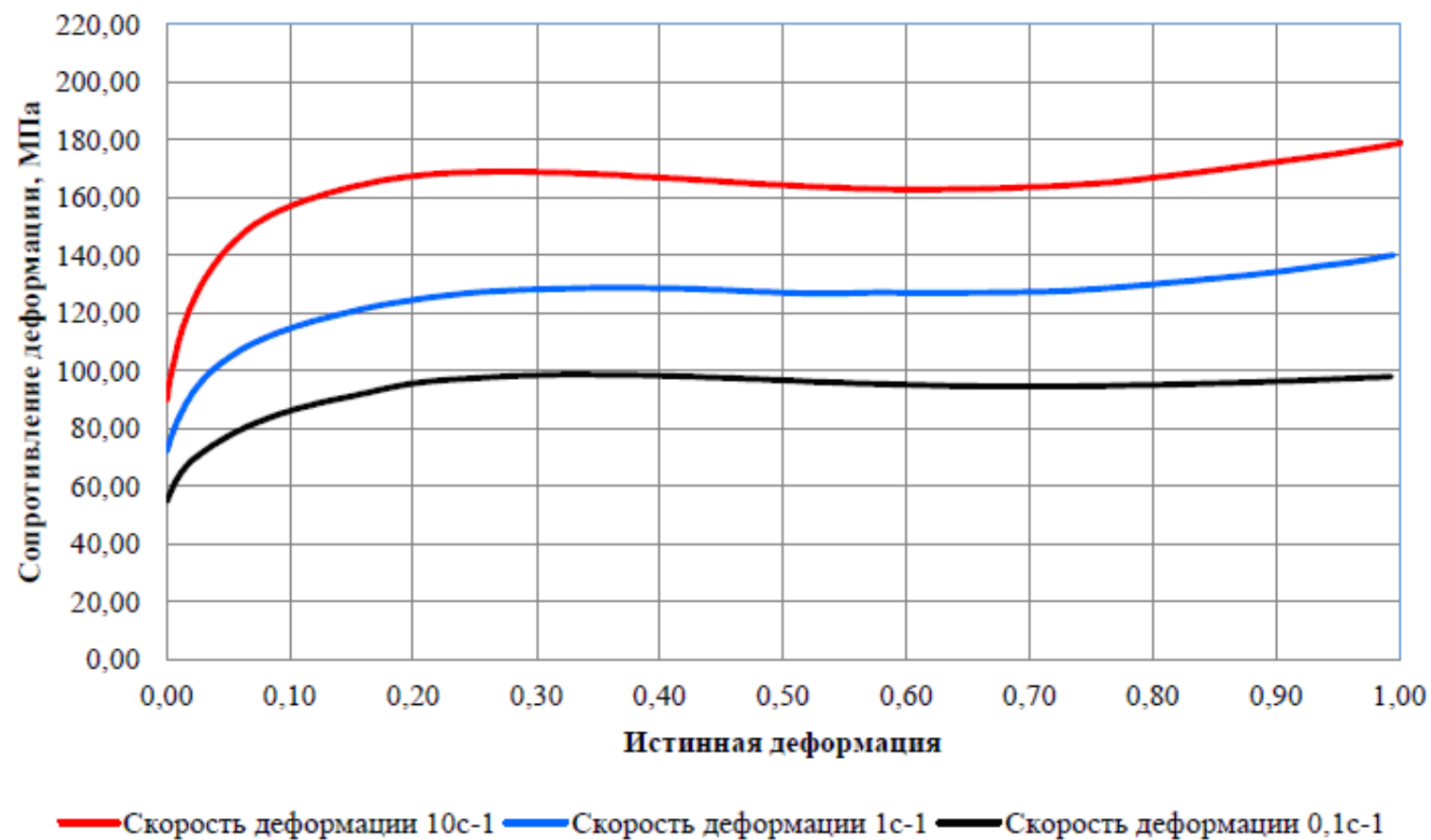


Рисунок 37 – Зависимость сопротивления деформации от степени деформации образцов рельсов от плавки 28554 при температуре 950°C

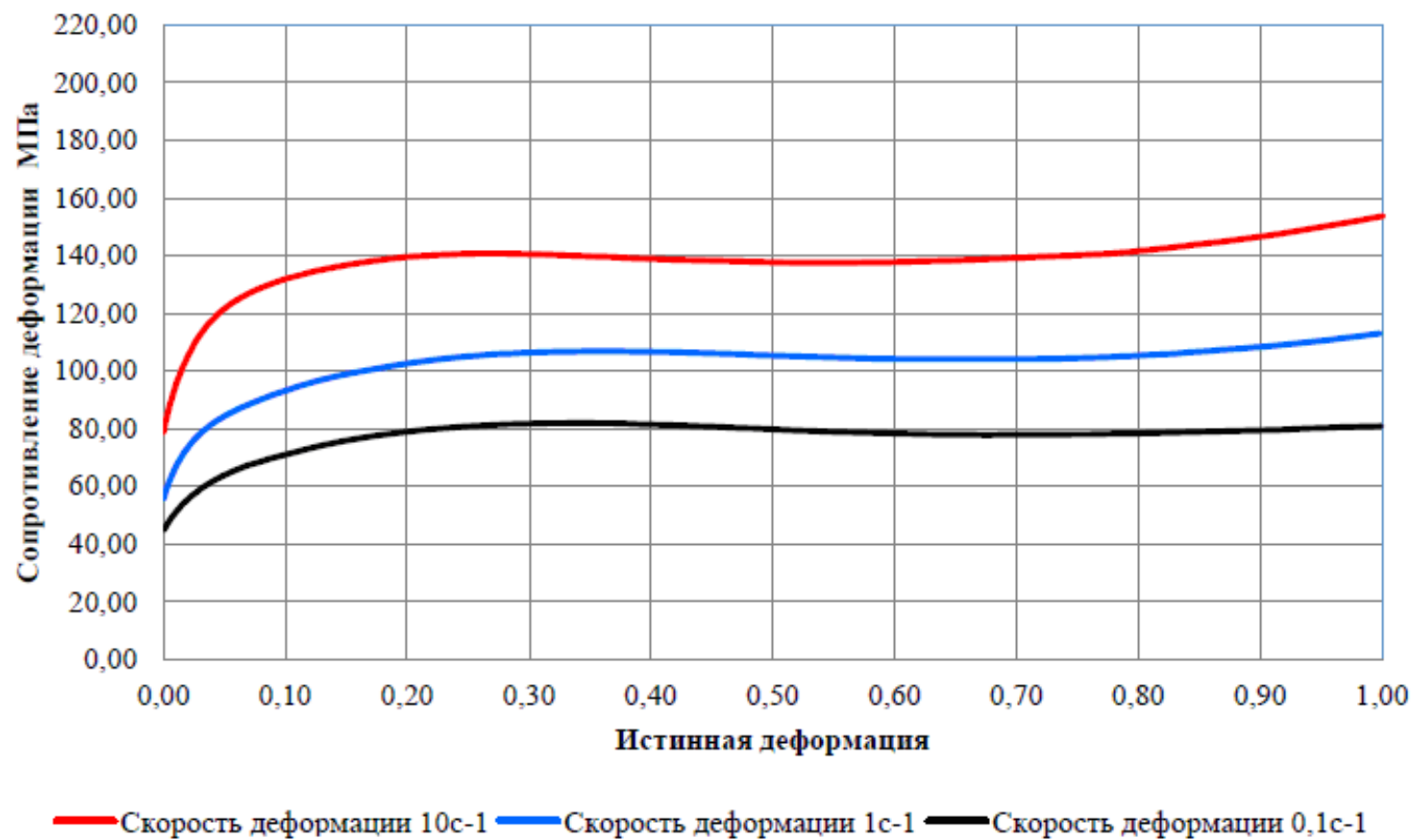


Рисунок 38 – Зависимость сопротивления деформации от степени деформации образцов рельсов от плавки 28554 при температуре 1000°C

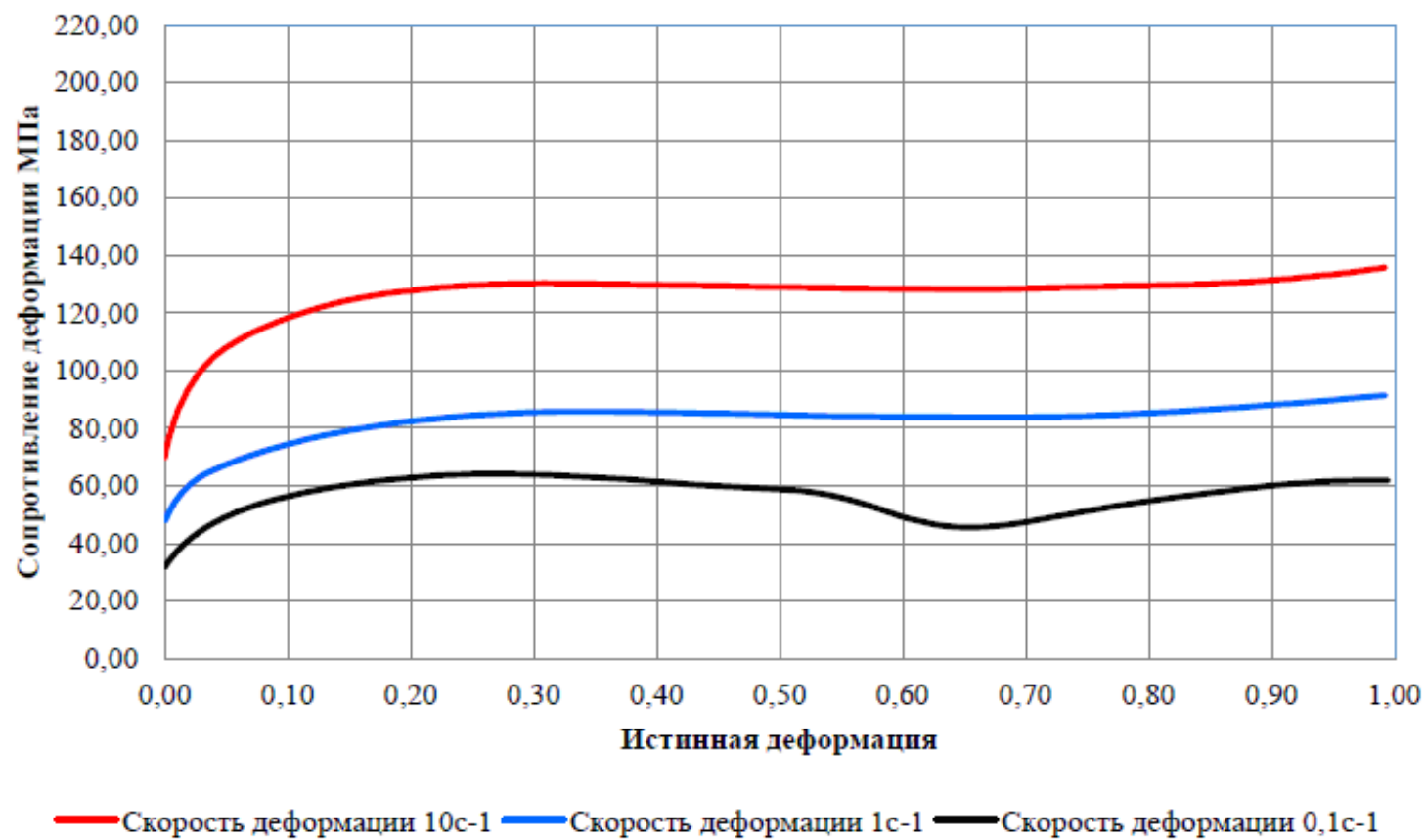


Рисунок 39 – Зависимость сопротивления деформации от степени деформации образцов рельсов от плавки 28554 при температуре 1050°C

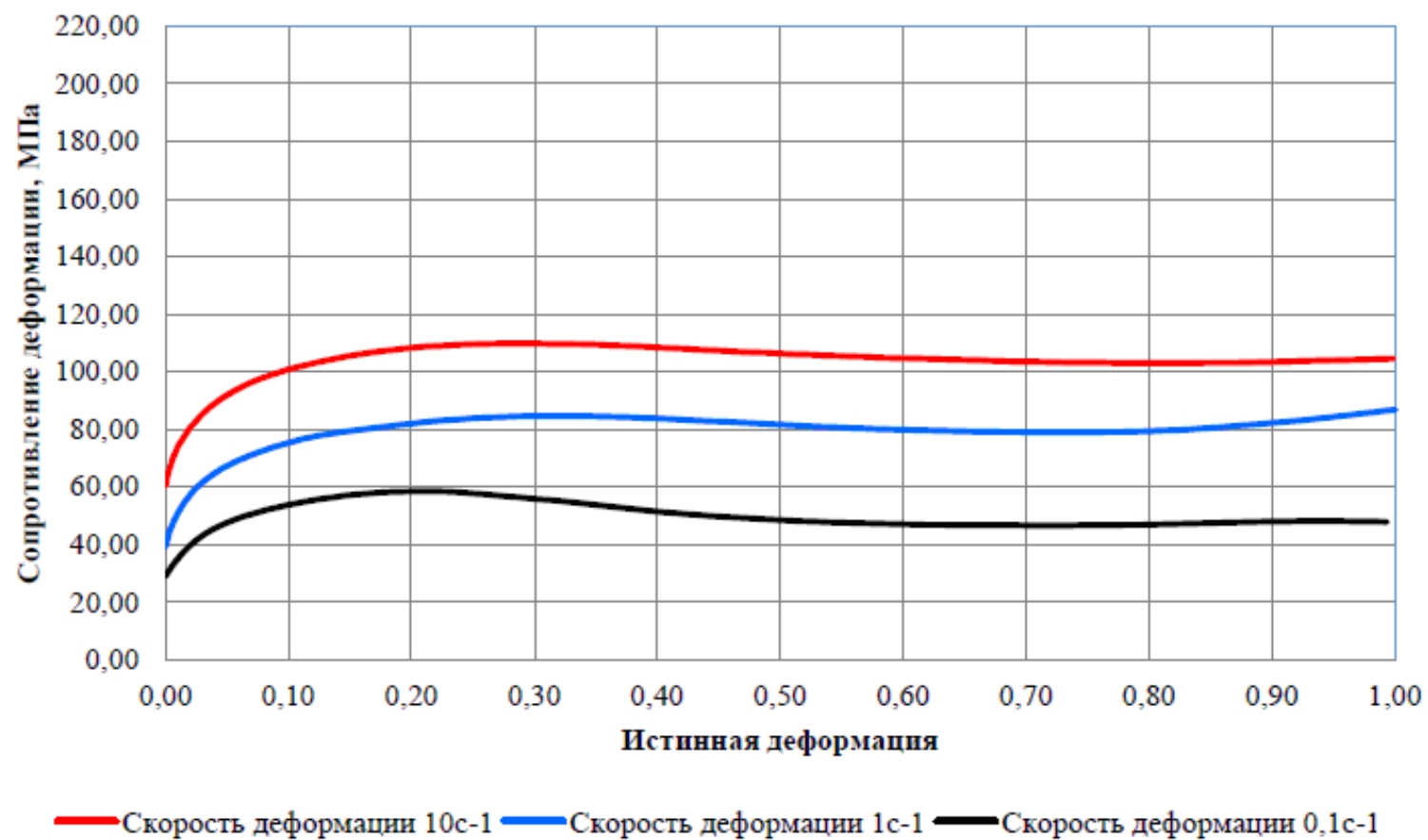


Рисунок 40 – Зависимость сопротивления деформации от степени деформации образцов рельсов от плавки 28554 при температуре 1100°C

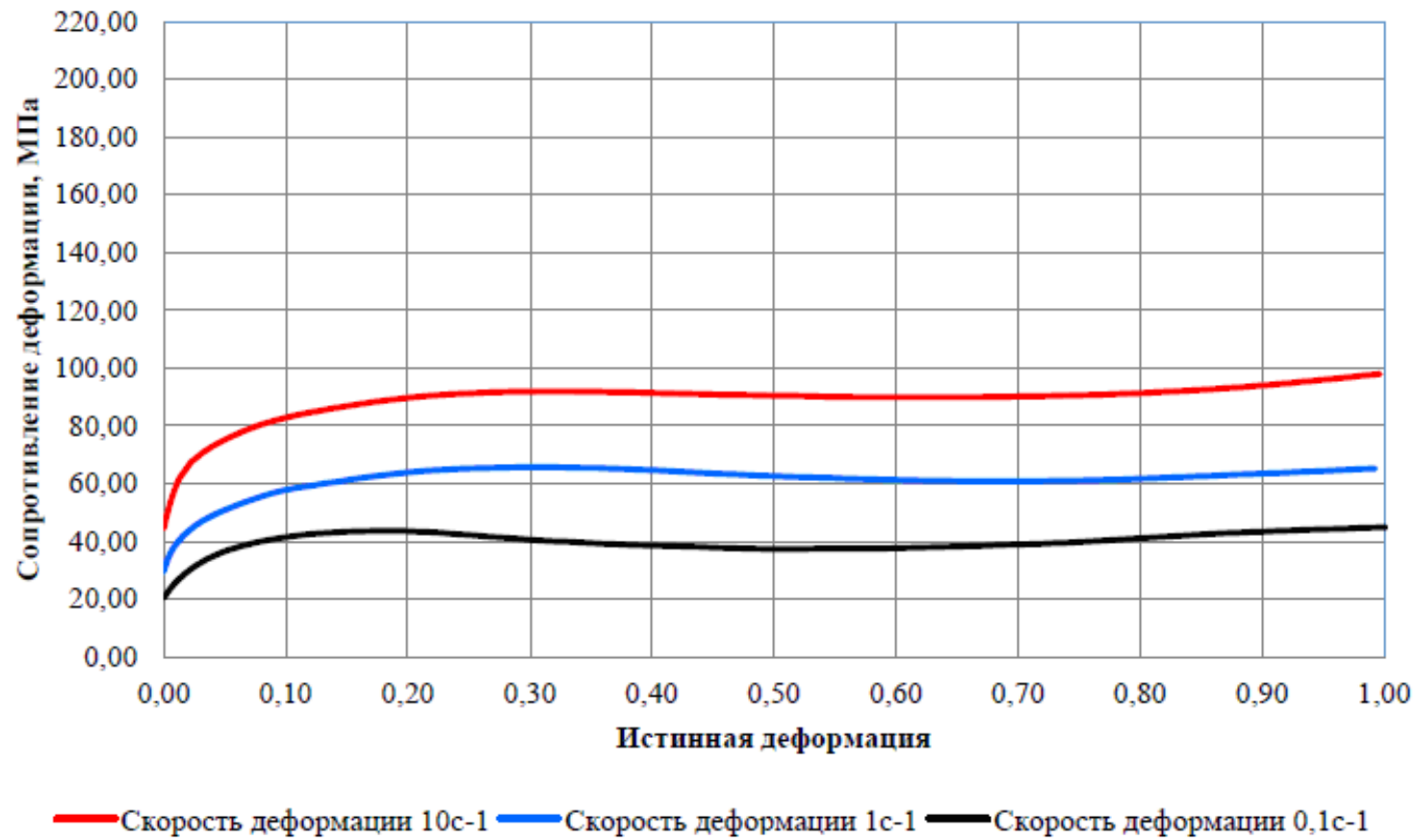


Рисунок 41 – Зависимость сопротивления деформации от степени деформации образцов рельсов плавки 28554 при температуре 1150°C



Такой характер зависимостей согласуется с существующими представлениями по теории прокатки, поскольку, как отмечалось ранее (раздел 1.2), при увеличении температуры происходит ослабление материальных связей частиц, что облегчает их взаимное смещение, а увеличение скорости деформации приводит к преобладанию процессов упрочнения над конкурирующими процессами разупрочнения стали.

На основании обработки полученных экспериментальных зависимостей сопротивления деформации от термомеханических параметров прокатки получено уравнение вида:

$$\sigma = A \cdot e^{m_1 \cdot t} \cdot \varepsilon^{m_2} \cdot e^{\frac{m_3}{\varepsilon}} \cdot (1 + \varepsilon)^{m_4 \cdot t} \cdot e^{m_5 \cdot \varepsilon} \cdot u^{m_6 \cdot t}, \quad (8)$$

где  $A$ ,  $m_1$ - $m_6$  – коэффициенты уравнения, зависящие от химического состава стали;

$t$  – температура прокатки,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\varepsilon$  – степень деформации;

$u$  – скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ .

Результаты расчетов коэффициентов  $A$ ,  $m_1$ - $m_6$  для 4-х анализируемых плавок, полученные путем обобщения экспериментальных данных, представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Коэффициенты уравнения для расчета сопротивления деформации рельсовой стали Э78ХСФ

Номер плавки	Абсолютные значения коэффициентов уравнения						
	$A$	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$m_5$	$m_6$
22674	4537,17	-0,00344	0,17591	0,00022	-0,00116	0,32523	0,00018
22376	4639,45	-0,00346	0,17947	0,00006	-0,00082	0,08697	0,00017
28551	5665,91	-0,00358	0,19754	0,00014	-0,00088	0,17071	0,00015
28554	5176,33	- 0,00358	0,14967	0,00020	-0,00034	0,12732	0,00014

С целью проверки адекватности полученной статистической модели (уравнение 8) проведен сравнительный анализ расчетных и экспериментальных значений сопротивления деформации (рисунки 42-46).

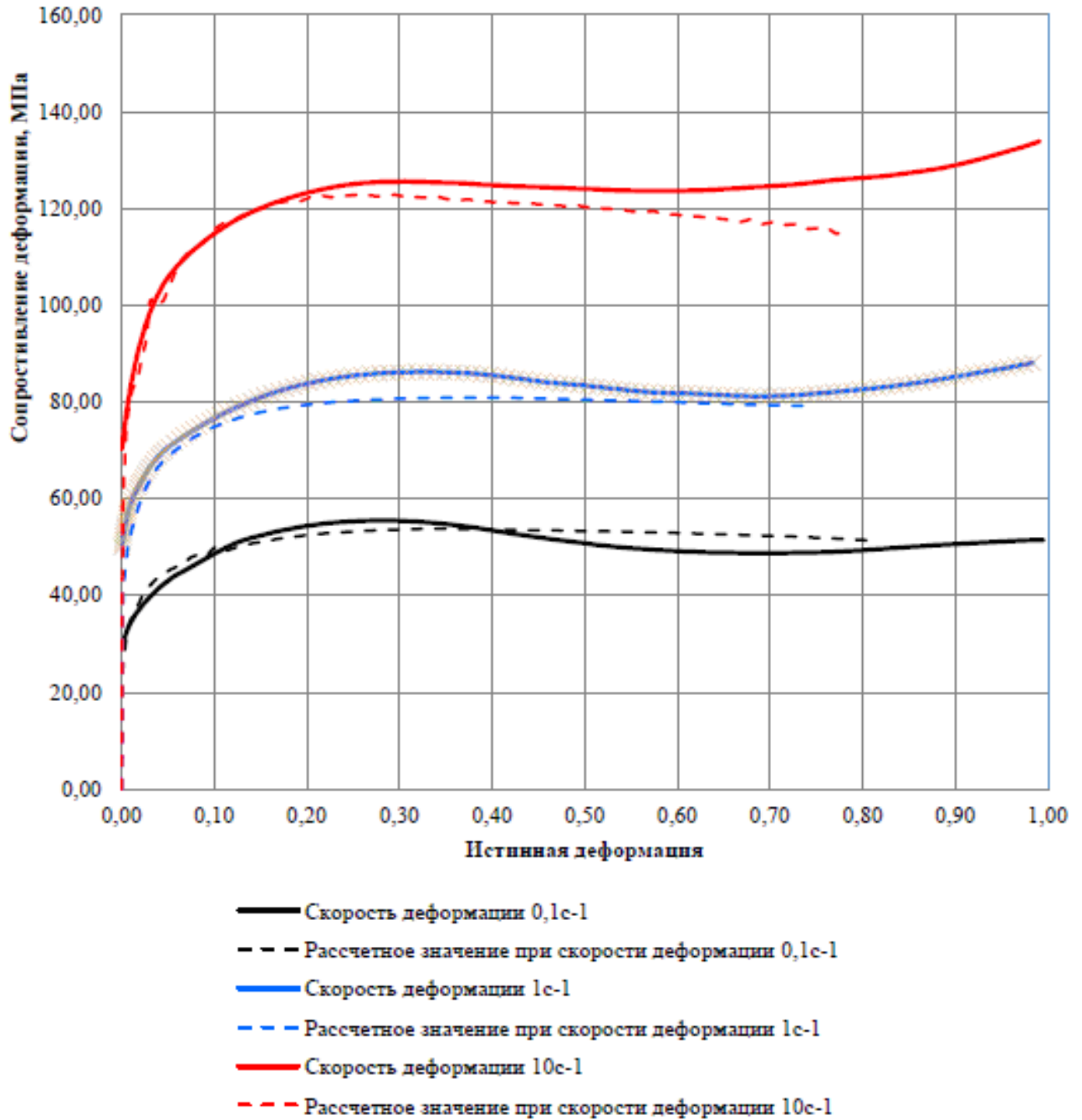


Рисунок 42 – Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных по сопротивлению деформации рельсовой стали Э78ХСФ плавка 22376 при температуре 1050°C

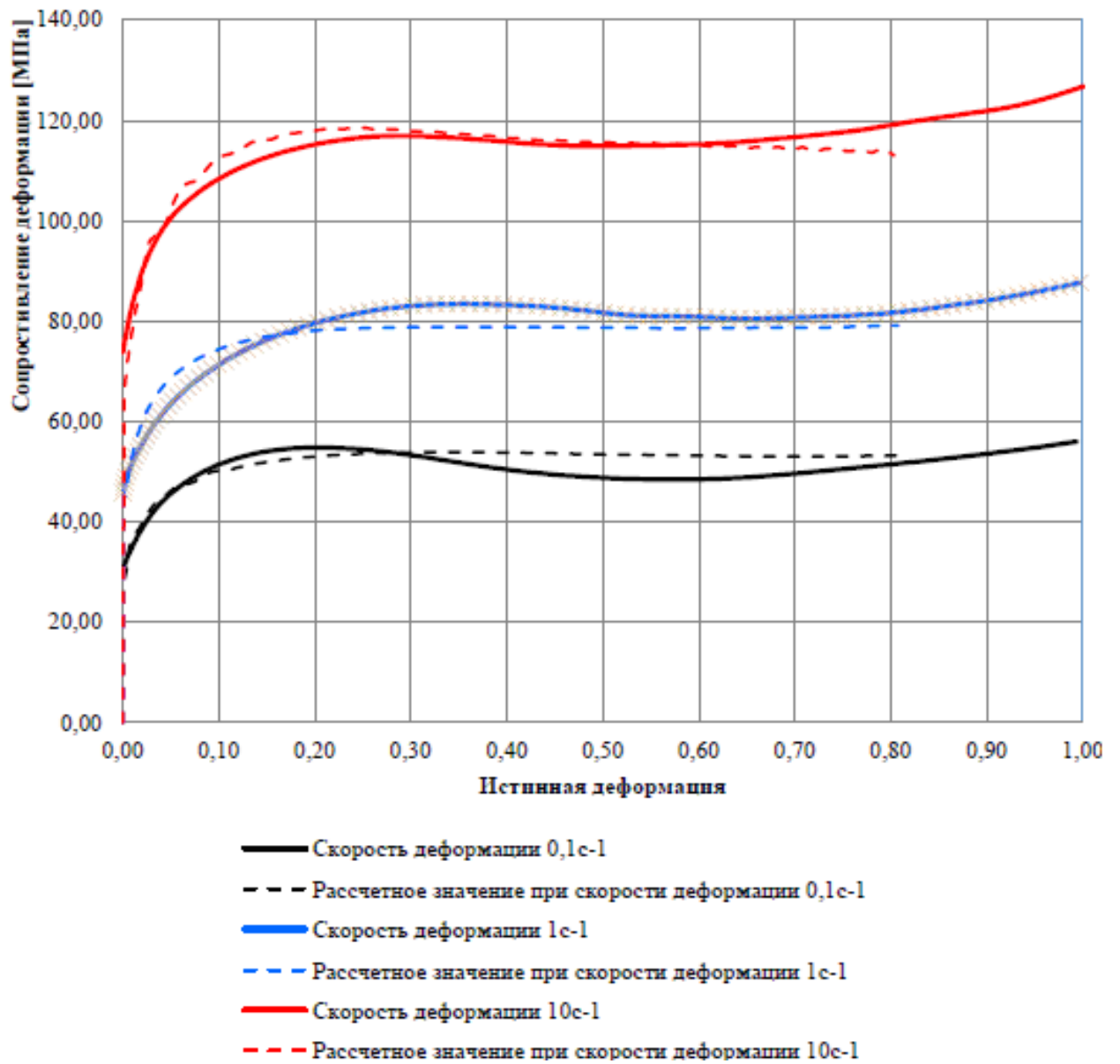


Рисунок 43 – Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных по сопротивлению деформации рельсовой стали Э78ХСФ плавка 22674 при температуре 1050°C

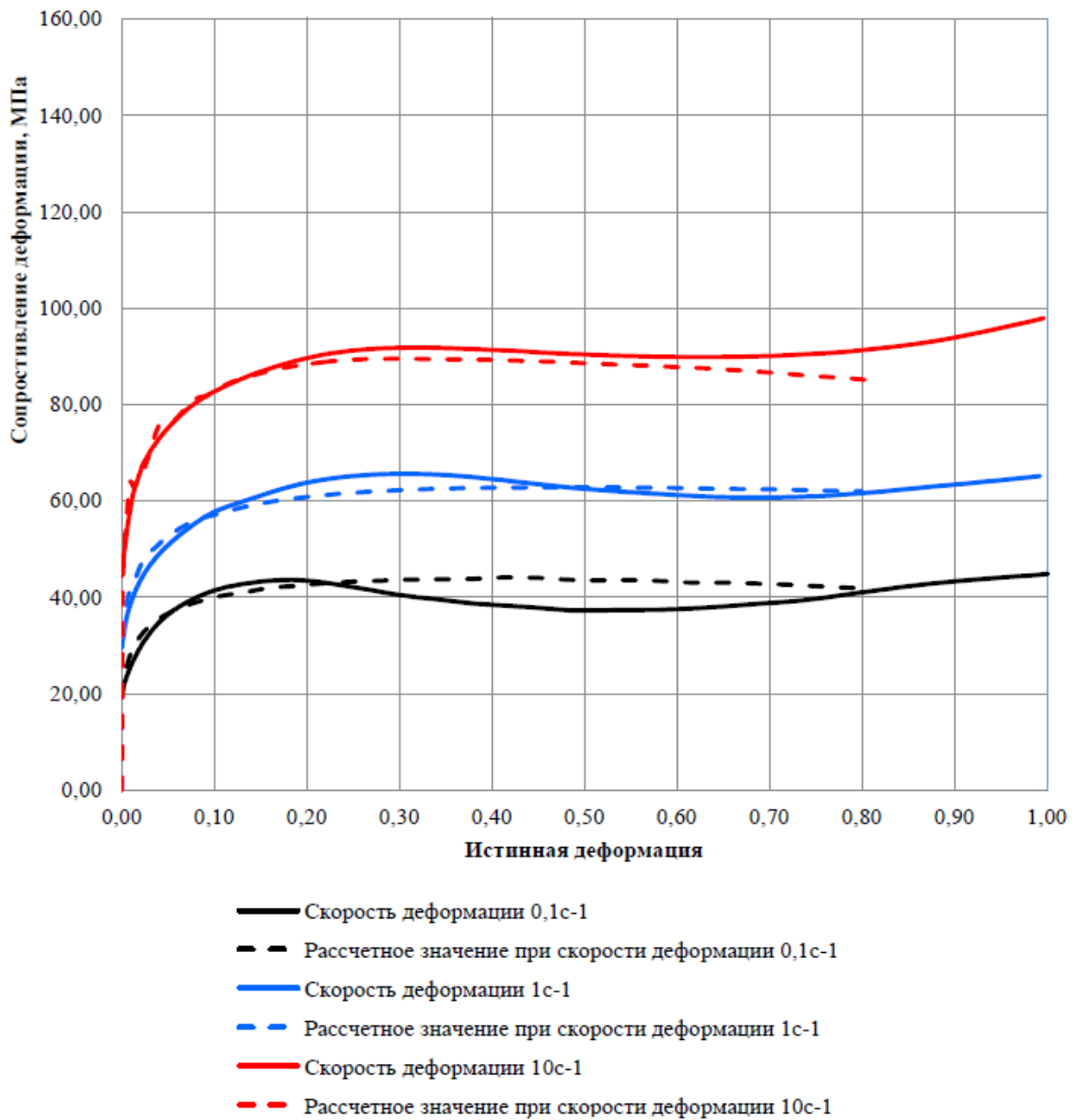


Рисунок 44 – Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных по сопротивлению деформации рельсовой стали Э78ХСФ плавка 28554 при температуре 1050 °C

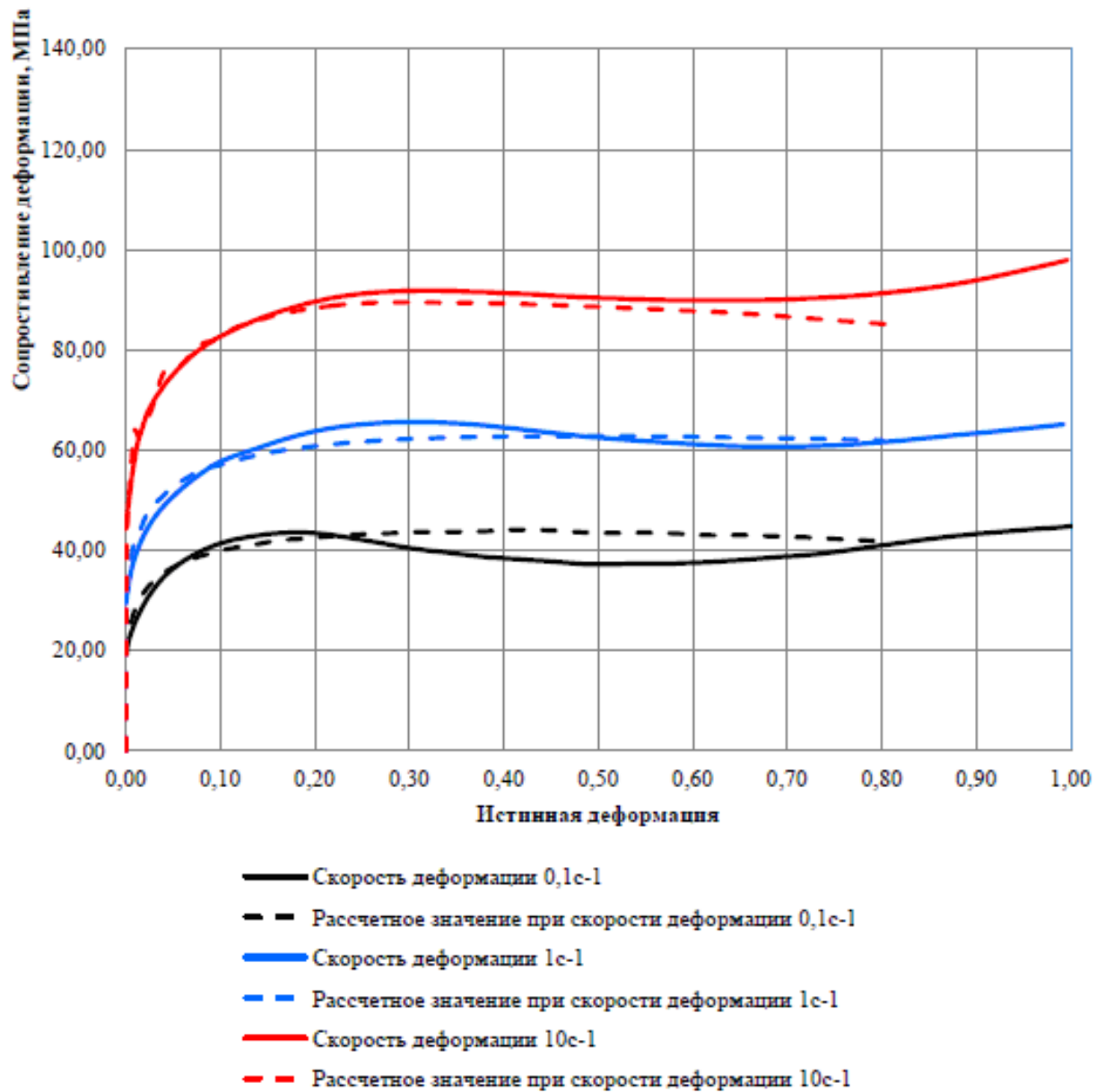


Рисунок 45 – Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных по сопротивлению деформации рельсовой стали Э78ХСФ плавка 28554 при температуре 1150 °С

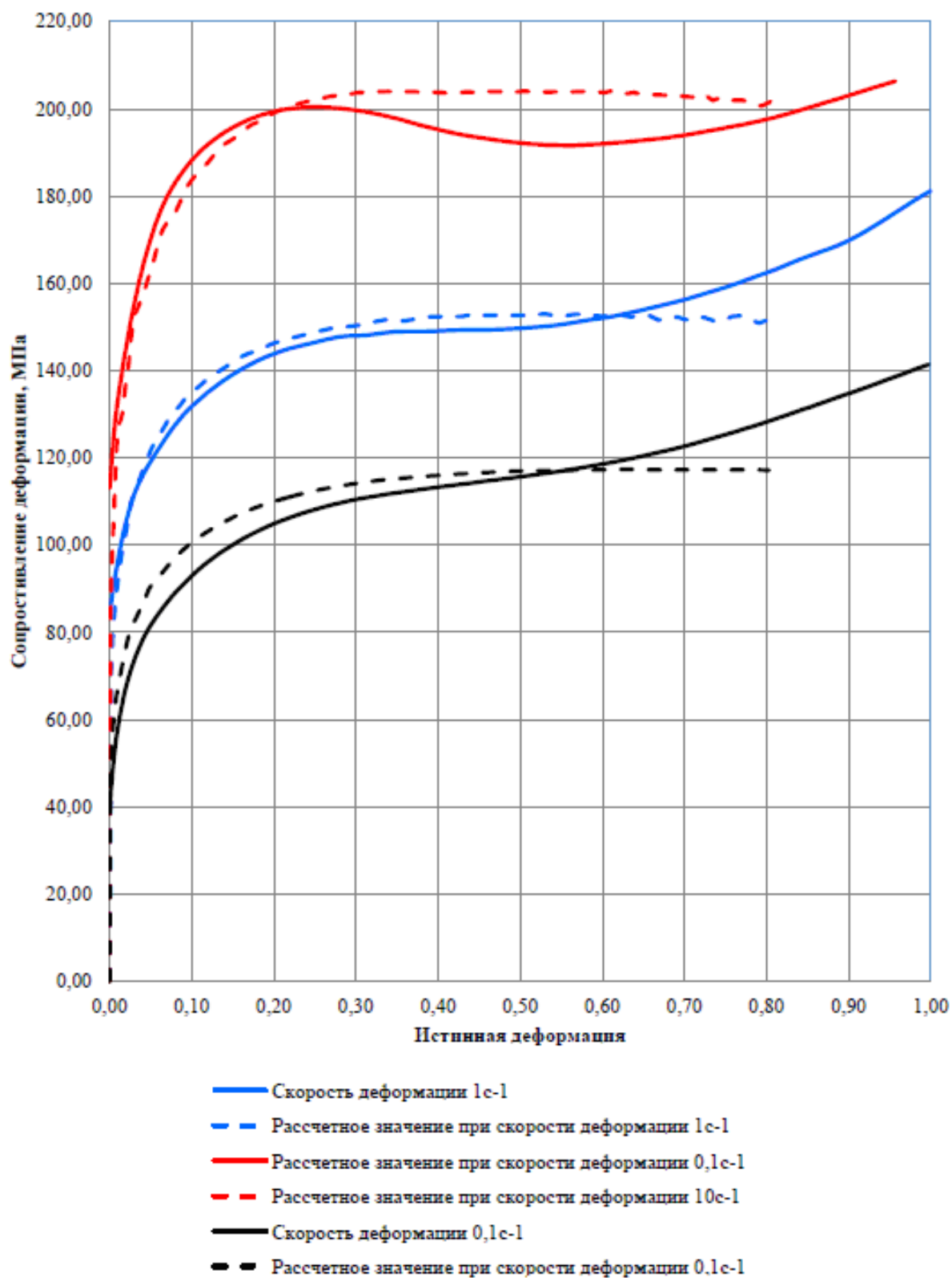


Рисунок 46 – Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных по сопротивлению деформации рельсовой стали Э78ХСФ плавка 28551 при температуре 900°C

Вышеприведенные зависимости свидетельствуют о достаточно высокой сходимости расчетных и фактических данных по сопротивлению деформации рельсовой стали 078ХСФ при степенях деформации до 0,7.

### 2.3 Выводы

1. С использованием установки «Hydrawedge II» комплекса для физического моделирования «Gleeble System 3800» проведены экспериментальные исследования сопротивления деформации рельсовой стали марки Э78ХСФ методом испытаний образцов на горячее сжатие.

2. Полученные экспериментальные зависимости сопротивления деформации рельсовой стали Э78ХСФ от степени деформации имеют выраженный максимум, который смещается в сторону увеличения степени деформации при повышении температуры и смещается в обратном направлении при увеличении скорости деформации, что свидетельствует о протекании в стали динамической рекристаллизация в дополнении к динамическому возврату и полигонизации.

3. По полученным данным повышение температуры прокатки рельсовой стали Э78ХСФ стали в интервале 900-1150<sup>0</sup>С приводит к снижению сопротивления деформации, а повышение скорости деформации в интервале 0,1-10 с<sup>-1</sup> наоборот увеличивает сопротивление деформации, что согласуется с общепринятыми представлениями по теории прокатки.

4. Полученные графические зависимости сопротивления деформации от термомеханических параметров деформации обобщены в виде регрессионного уравнения, адекватность которого подтверждена сравнительным анализом расчетных и экспериментальных данных.

### 3 Исследование влияния химического состава рельсовых сталей на сопротивление деформации при прокатке

#### 3.1 Методика проведения исследований

В полученном ранее (в разделе 2.2) уравнении для расчета сопротивления деформации рельсовой стали (формула 8) используются коэффициенты  $A$ ,  $m_1$ – $m_6$ , зависящие от химического состава стали. При этом численные значения указанных коэффициентов были рассчитаны только для исследованных 4-х плавов путем обобщения экспериментальных кривых сопротивления деформации. С целью создания универсальной методики определения сопротивления деформации провели дополнительное исследование влияния концентрации основных химических элементов (C, Si, Mn, Cr, S, P, V) в стали Э78ХСФ на значения коэффициентов  $A$ ,  $m_1$ – $m_6$  [58]. При проведении исследований использовали методику множественного регрессионного анализа. В качестве объекта для анализа использовали данные по сопротивлению деформации 20-ти плавов стали Э78ХСФ текущего производства, полученные при испытании образцов на горячее сжатие. Методика проведения испытаний приведена в разделе 2.1.

Согласно рекомендаций авторов работ [83-88] алгоритм проведения статистических исследований с использованием методики множественного регрессионного анализа включал в себя следующие этапы.

На первом этапе производился расчёт парных коэффициентов корреляции между переменными, в качестве которых в данном случае выступало содержание химических элементов в стали и параметром оптимизации – коэффициентом уравнения (8):

$$r_{XY} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})}{S_X \cdot S_Y}, \quad (9)$$

где  $\bar{Y}$ ,  $\bar{X}$  – средние арифметические значения переменных;



$S_Y$  ,  $S_X$  – средние квадратические отклонения переменных;

$n$  – количество наблюдений в выборке.

На втором этапе проводили расчёт парных коэффициентов корреляции между переменными (концентрацией химических элементов в стали):

$$r_{X_1 X_2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(X_{1i} - \bar{X}_1) \cdot (X_{2i} - \bar{X}_2)}{S_{X_1} \cdot S_{X_2}}, \quad (10)$$

Для удобства дальнейших расчетов полученные коэффициенты корреляции сводятся в таблицу (таблица 5).

Таблица 5 – Формат представления расчетных значений  
коэффициентов корреляции

	Y	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	...	X <sub>i</sub>
Y	1	$r_{YX_1}$	$r_{YX_2}$	...	$r_{YX_i}$
X <sub>1</sub>	$r_{YX_1}$	1	$r_{X_1 X_2}$	...	$r_{X_1 X_i}$
X <sub>2</sub>	$r_{YX_2}$	$r_{X_2 X_1}$	1	...	$r_{X_2 X_i}$
...	...	...	...	1	...
X <sub>i</sub>	$r_{YX_i}$	$r_{X_i X_1}$	$r_{X_i X_2}$	...	1

При условии, что коэффициент корреляции между какими-либо переменными превышает 0,8, то взаимосвязь между ними считается линейной. В этом случае одна из указанных переменных, а именно имеющая меньшую взаимосвязь с параметром оптимизации (меньшее значение коэффициента корреляции  $r_{YX_i}$ ) отбрасывается и не используется в дальнейших расчетах.

На третьем этапе производился непосредственно расчёт коэффициентов уравнения регрессии.



После отсева незначимых переменных производился расчёт коэффициентов уравнения регрессии только для значимых факторов по вышеизложенной методике.

Следует отметить, что результаты проведенных в последние годы исследований [89, 90] подтвердили эффективность использования указанного алгоритма применительно к металлургическими процессам.

На анализируемых 20-ти плавках текущего производства интервал изменения концентрации вышеуказанных химических элементов составил:

- для углерода – 0,75-0,79 %;
- для кремния – 0,32-0,55 %;
- для марганца – 0,78-1,09 %;
- для хрома – 0,42-0,57 %;
- для серы – 0,005-0,015 %;
- для фосфора – 0,012-0,017%;
- для ванадия – 0,04-0,07 %.

### **3.2 Анализ влияния химического состава стали Э78ХСФ на сопротивление деформации**

В результате проведенного анализа получены уравнения регрессии, характеризующие зависимости коэффициентов статистической модели для расчета сопротивления деформации рельсовой стали (уравнение 8) от содержания в ней основных химических элементов:

$$A = 4365,4 + 69118 \cdot S, \quad (15)$$

$$m_1 = -0,0033 - 0,0043 \cdot V, \quad (16)$$

$$m_2 = 0,2607 - 5,7663 \cdot P, \quad (17)$$

$$m_3 = -0,0025 + 0,00308 \cdot C + 0,00025 \cdot Mn, \quad (18)$$

$$m_4 = -0,0015 + 0,0475 \cdot P, \quad (19)$$

$$m_5 = -0,407 + 0,655 \cdot Mn, \quad (20)$$

$$m_6 = 0,0002 - 0,0012 \cdot V \quad (21)$$

Обобщая полученные данные о влиянии химического состава стали на коэффициенты уравнения (8) и, следовательно, на сопротивление деформации можно констатировать, что на сопротивление деформации рельсовой стали Э78ХСФ значимое влияние оказывает изменение содержания следующих химических элементов: углерод, марганец, сера, фосфор и ванадий. Влияния кремния и хрома в рассматриваемых пределах не выявлено.

Увеличение содержания углерода и марганца в стали в рассматриваемых пределах приводит к повышению сопротивления деформации. Полученные данные согласуются с результатами других исследований [21], которые свидетельствуют о снижении пластичности легированных сталей при увеличении содержания перечисленных элементов.

Повышение концентрации серы и фосфора приводит к увеличению сопротивления деформации стали Э78ХСФ, что обусловлено резко отрицательным влиянием данных элементов на пластические свойства стали. По данным многочисленных исследований влияние серы и фосфора на пластичность стали наблюдается даже при относительно низком их содержании, что обусловлено свойством образуемых ими соединений концентрироваться в межзеренном пространстве в процессе кристаллизации слитков. Так превышение концентрации серы в областях по границам дендритов над среднеплавочным значением может достигать 15...2000 раз, для фосфора разница концентраций составляет 10...25 раз [91]. Например, известно утверждение А. П. Гуляева об отрицательном влиянии фосфора при любых его концентрациях [92].

Увеличение содержания ванадия в рассматриваемой стали с 0,04 до 0,07 % наоборот приводит к снижению сопротивления деформации, что

объясняется значительным влиянием присадок ванадия даже в небольших количествах на повышение пластичности стали.

Отсутствие влияния кремния на сопротивление деформации объясняется его незначительной концентрацией в рассматриваемой стали (до 0,55 %) – имеются данные [21], что кремний повышает сопротивление деформации сталей только при его концентрации на уровне 1,5-2,0 %. Касательно хрома можно отметить, что по данным [21] для высокоуглеродистых хромистых сталей (с содержанием хрома более 0,45 %) решающее влияние на сопротивление деформации оказывает не хром, а углерод.

С целью оценки количественного влияния изменения содержания химических элементов на сопротивление деформации хромистой рельсовой стали проведен вычислительный эксперимент. Анализ проводили путем расчета коэффициентов  $A$ ,  $m_1$ – $m_6$  уравнения (8) при условии поочередного изменения содержания в стали каждого рассматриваемого химического элемента и неизменном содержании остальных элементов. При этом базовый химический состав принимали согласно средним значениям требований ГОСТ Р 51685-2000 для углерода, марганца, кремния, и хрома; а содержание ванадия приняли равным 0,07 %, исходя из того, что на практике его содержание стараются выдерживать ближе к нижнему пределу (0,05 %); содержание серы и фосфора приняли – 0,015 % для каждого элемента – таблица 6.

Таблица 6 – Химический состав стали Э78ХСФ, принятый  
при проведении вычислительного эксперимента

Содержание элемента, %						
C	Si	Mn	Cr	V	S	P
0,78	0,60	0,90	0,50	0,07	0,015	0,015

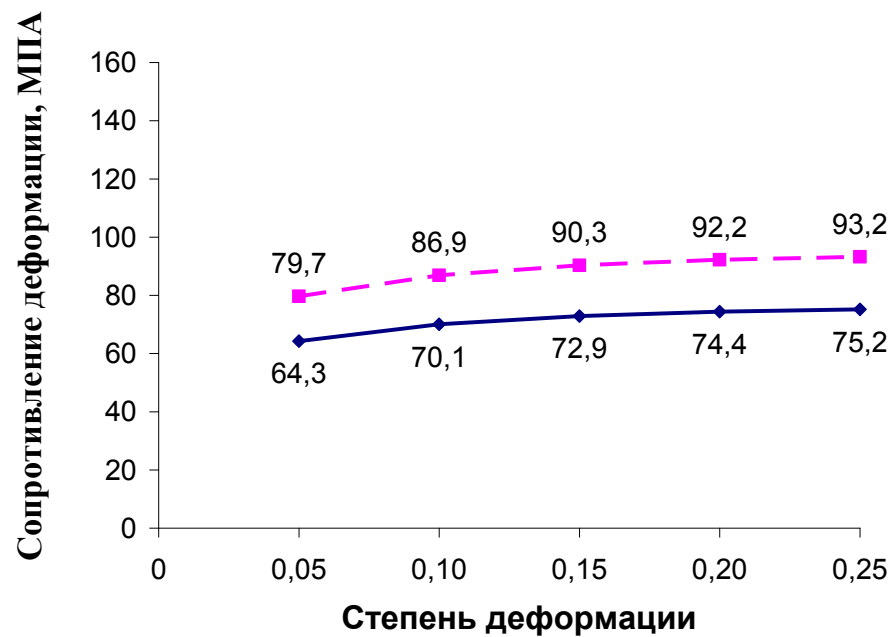
С использованием полученных коэффициентов провели расчет сопротивления деформации для условий прокатки, характерных для черновых и чистовых клетей рельсобалочных станов:

1. Температура прокатки –  $1150^{\circ}\text{C}$ , скорость деформации –  $5\text{ с}^{-1}$  (черновые клетки);

2. Температура прокатки –  $1050^{\circ}\text{C}$ , скорость деформации –  $15\text{ с}^{-1}$  (чистовые клетки);

Результаты вычислительного эксперимента (рисунки 47-50) свидетельствуют, что наиболее значимое влияние на сопротивление деформации хромистой рельсовой стали оказывают ванадий и сера. Повышение содержания ванадия с 0,04 % до 0,07 % приводит к снижению сопротивления деформации в 1,24-1,27 раза (рисунок 47), а увеличение концентрации серы с 0,005 % до 0,015 % обуславливает повышение сопротивления деформации в 1,14 раза (рисунок 48). При этом снижение температуры и повышение скорости деформации способствует усилению влияния ванадия на сопротивление рельсовой стали пластическому деформированию. Повышение содержания фосфора и марганца в стали в рассматриваемых пределах (с 0,012 % до 0,017 % для фосфора и с 0,78 % до 1,09 % для марганца) приводит к увеличению сопротивления деформации до 10 % и 5 % соответственно (рисунки 49, 50), а при увеличении концентрации углерода в стали с 0,75 % до 0,79 % рост сопротивления деформации не превышает 1 %.

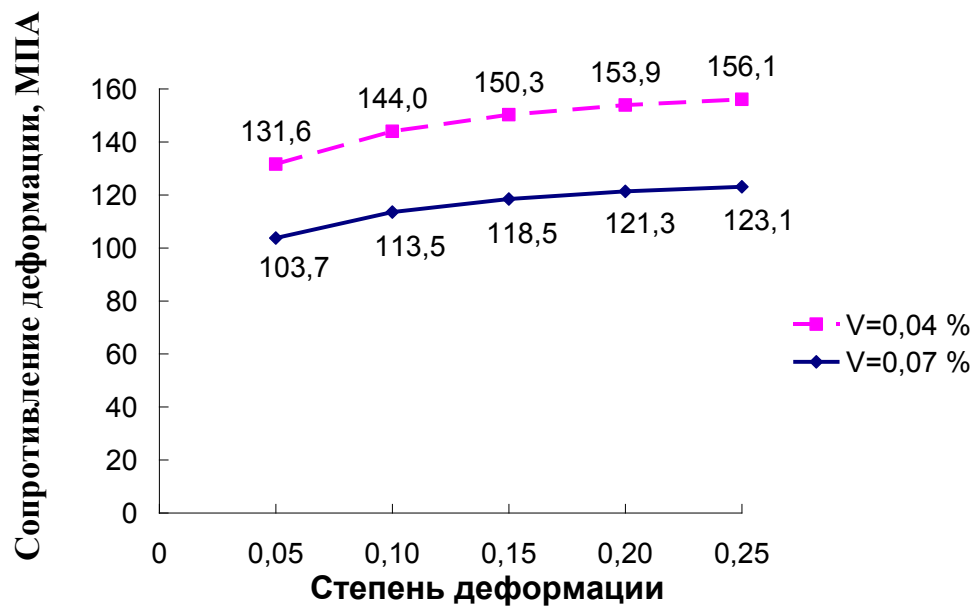
Таким образом, проведенный анализ влияния химического состава рельсовой стали на сопротивление деформации показал, что учет влияния химического состава стали является необходимым условием при расчете энергосиловых параметров деформации в процессе проектирования режимов прокатки.



а

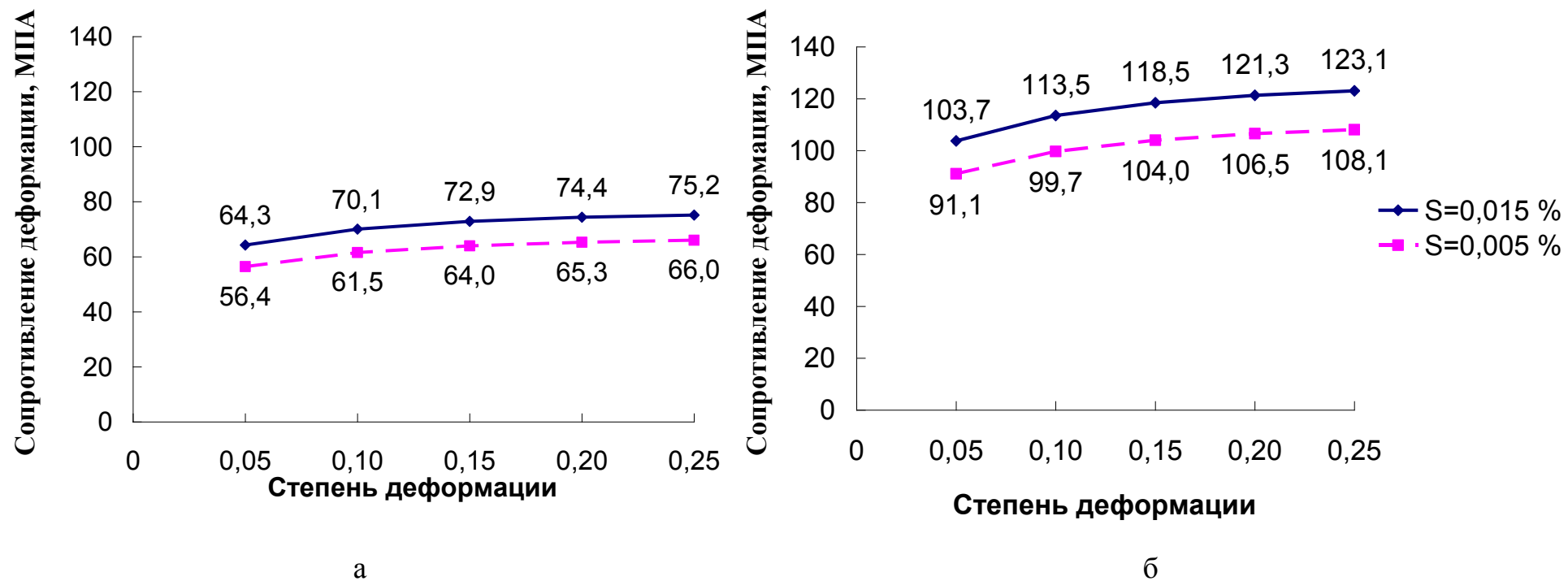
а – скорость деформации  $5 \text{ s}^{-1}$ , температура деформации  $1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

б – скорость деформации  $15 \text{ s}^{-1}$ , температура деформации  $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$



б

Рисунок 47 – Расчетные зависимости сопротивления деформации рельсовой стали от степени ее деформации при различном содержании ванадия

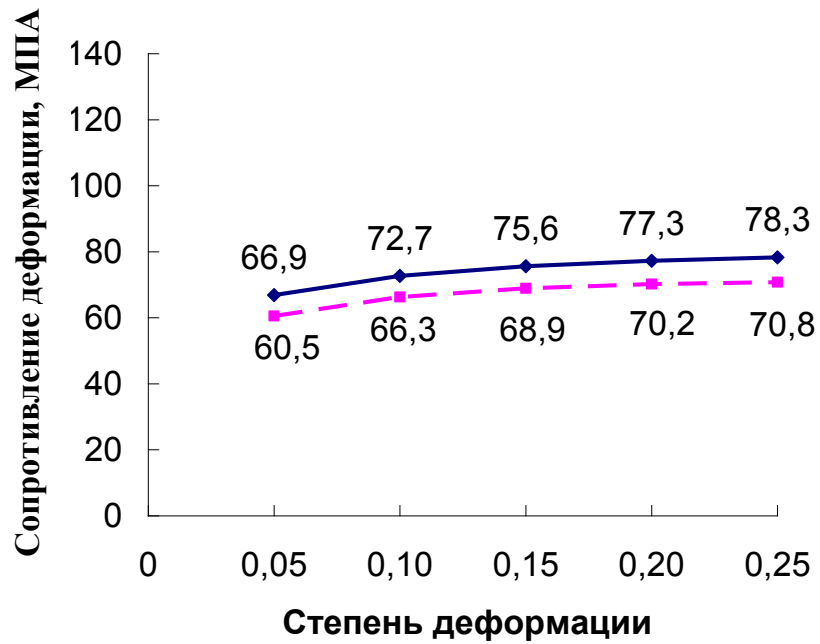


а – скорость деформации  $5 \text{ с}^{-1}$ , температура деформации  $1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

б – скорость деформации  $15 \text{ с}^{-1}$ , температура деформации  $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Рисунок 48 – Расчетные зависимости сопротивления деформации рельсовой стали от степени ее деформации при различном содержании серы

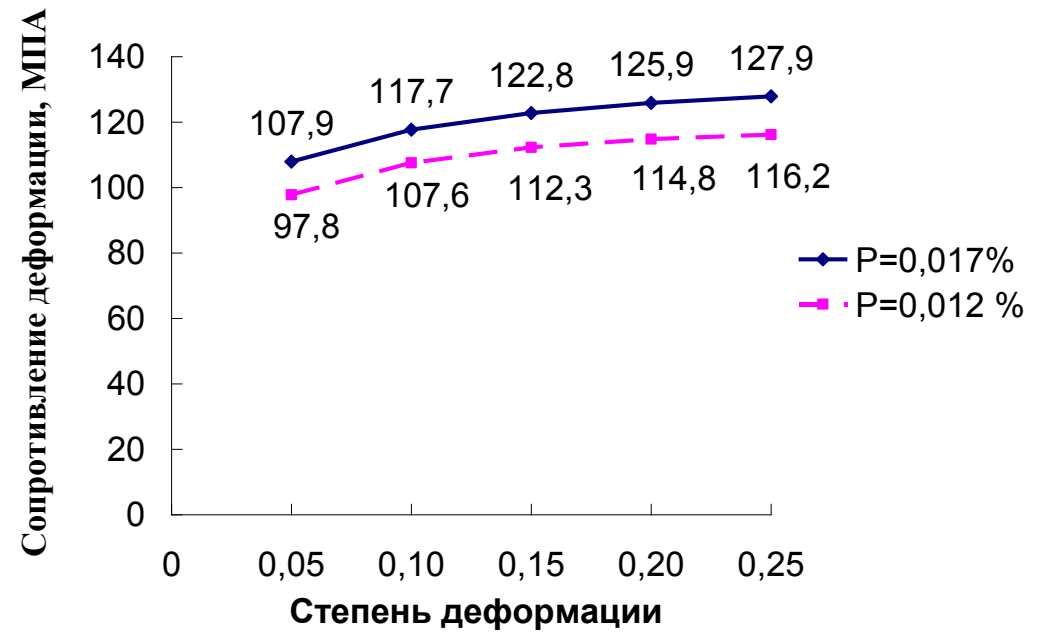




а

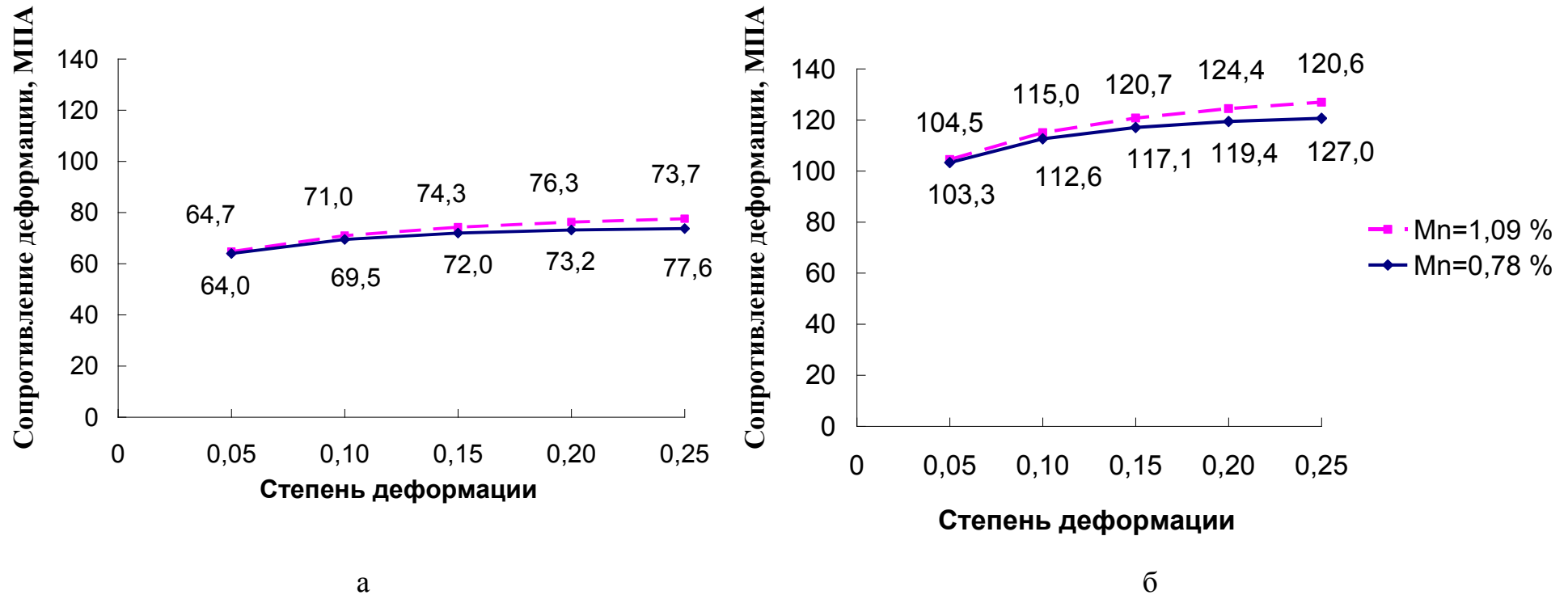
а – скорость деформации  $5 \text{ с}^{-1}$ , температура деформации  $1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

б – скорость деформации  $15 \text{ с}^{-1}$ , температура деформации  $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$



б

Рисунок 49 – Расчетные зависимости сопротивления деформации рельсовой стали от степени ее деформации при различном содержании фосфора



а – скорость деформации  $5 \text{ с}^{-1}$ , температура деформации  $1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  
 б – скорость деформации  $15 \text{ с}^{-1}$ , температура деформации  $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Рисунок 50 – Расчетные зависимости сопротивления деформации рельсовой стали от степени ее деформации при различном содержании марганца

### **3.3 Разработка и использование методики расчета сопротивления деформации рельсовых сталей при изменяющихся условиях прокатки и различном химическом составе стали**

На основании проведенных экспериментальных (раздел 2.2) и статистических (раздел 3.2) исследований разработана методика расчета сопротивления деформации, учитывающая влияние термомеханических параметров деформации и химического состава стали [93-95].

Алгоритм применения указанной методики включает в себя следующие этапы:

1. Расчет коэффициентов уравнения (8) для заданного химического состава стали с использованием уравнений регрессии (15-21).
2. Расчет фактических значений сопротивления деформации для заданных термомеханических параметров прокатки (степень деформации, температура и скорость деформации) с использованием уравнения (8).

С целью проверки адекватности разработанной методики определения сопротивления деформации проведен сравнительный анализ расчетных и фактических усилий прокатки по проходам в обжимной клетки BD1 универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

Расчет производили по стандартной методике, согласно рекомендаций авторов работы [68].

Формулы для определения коэффициентов, учитывающих влияние на среднее контактное давление таких параметров, как: среднее нормальное напряжение (коэффициент  $\gamma$ ), внешнее трение (коэффициент  $n_{\sigma_I}$ ), внешние зоны (коэффициент  $n_{\sigma_{II}}$ ) и натяжение полосы (коэффициент  $n_{\sigma_{III}}$ ), приведены ниже.

Методика расчета коэффициента  $n_{\sigma_I}$  зависит от отношения длины дуги захвата к средней высоте полосы до и после прокатки  $\left( \frac{l_d}{h_{CP}} \right)$ .

Применительно к режиму прокатки, используемому для производства рельсов на рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК», когда  $\left(\frac{l_D}{h_{CP}}\right) < 1$  указанный коэффициент определяется по формуле:

$$n_{\sigma'} = 1 + \frac{l_D}{6 \cdot h_{CP}} \quad (22)$$

Коэффициент, учитывающий влияние внешних зон, находится, как:

$$n_{\sigma''} = \left(\frac{l_D}{h_{CP}}\right)^{-0,4} \quad (23)$$

Так как прокатка в рассматриваемом случае осуществляется без натяжения и подпора, то коэффициент  $n_{\sigma'''} = 1$ .

При проведении расчетов сопротивления деформации использовали два варианта химического состава стали Э78ХСФ:

1. Согласно данным таблицы 6 (средние значения содержания углерода, марганца, кремния и хрома по ГОСТ, содержание ванадия – 0,07 %; содержание серы и фосфора приняли – 0,015 % для каждого элемента);

2. Химический состав аналогичен первому варианту за исключением содержания ванадия и серы (приняты 0,04 % и 0,005 % соответственно).

Температуру выдачи заготовки из нагревательной печи принимали равной 1200 °С (согласно существующей технологии нагрева заготовок), снижение температуры раската в процессе прокатки принимали 5 °С за проход на основании имеющихся практических данных).

При проведении расчетов усилия прокатки в 7-ом проходе использовали значение не абсолютного (как в предыдущих проходах), а приведенного обжатия:

$$\Delta h_{IP} = h_0 - h_{1IP} = h_0 - (S_1 / b_1), \quad (24)$$

где  $S_1$  и  $b_1$  – площадь поперечного сечения и ширина полосы после прокатки.

Принятая методика расчета объясняется сложной формой калибра, используемого в 7-ом проходе (лежащая трапеция); в предыдущих проходах согласно схеме прокатки деформация осуществлялась в ящичных калибрах.

Результаты расчетов усилия прокатки по проходам при прокатке в обжимной клетки BD1 и данные по их сопоставлению с фактическими усилиями представлены в таблице 7 и на рисунке 51. Фактические усилия прокатки фиксировались при прокатке рельсов Р65 на плавках химического состава, близкого к использованным при расчете вариантам (первый вариант – согласно данным таблицы 6, второй вариант с пониженным содержанием ванадия (0,04 %) и серы (0,005 %)). По каждому варианту проанализированы данные по 5-ти плавкам и использованы усредненные значения полученных данных.

Из представленных данных видно, что отклонения расчетных от фактических данных не превышают 10 %.

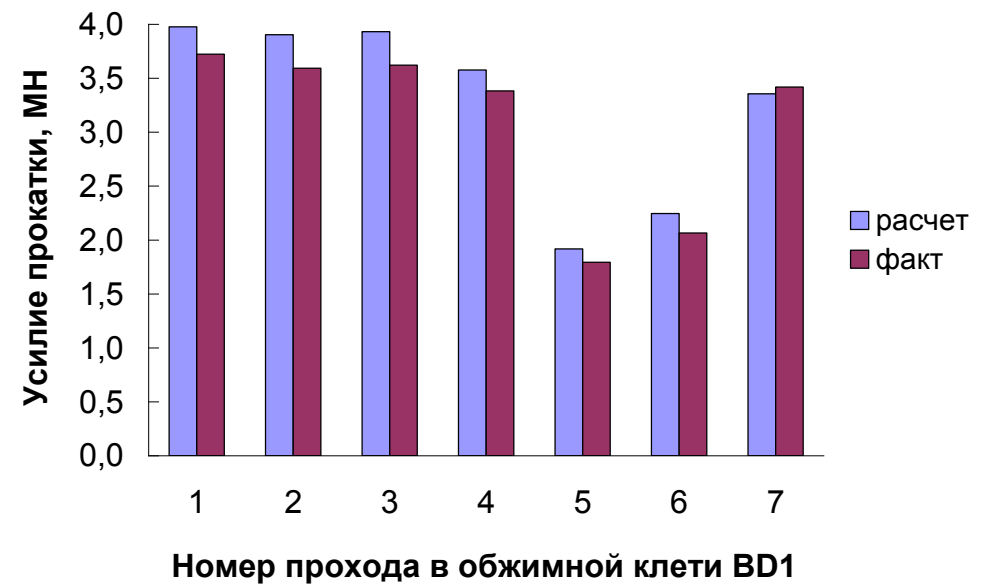
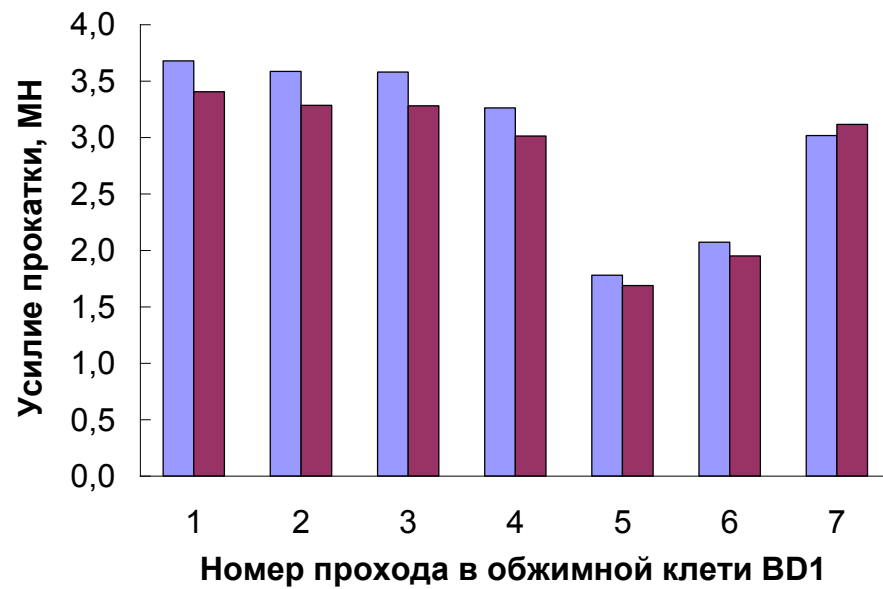
Поскольку по полученным данным не выявлено значимого влияния на сопротивление деформации рельсовой стали содержания таких элементов, как кремний и хром, то область применения указанной методики может быть распространена не только на сталь Э78ХСФ, но и на рельсовые стали, нелегированные указанными элементами, в частности Э76Ф и Э76.

Таким образом, разработанную методику определения сопротивления деформации рельсовой стали возможно использовать при проектировании новых и совершенствовании существующих режимов прокатки рельсов в производственных условиях.

Таблица 7 – Сравнительный анализ расчетных и фактических данных по усилию прокатки в обжимной клети  
BD1 универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Номер прохода	Сечение, мм		$\Delta h$ , мм	$\varepsilon$	D, мм	F, мм <sup>2</sup>	v, м/с	u, с <sup>-</sup>	$t_{\text{ПР}}$ , °C	$\sigma_{\phi}$ , МПа		$p_{\text{CP}}$ , МПа		P, кН			
	№1	№2								№1	№2	№1		№2			
												расч.	факт (откл., %)	расч.	факт (откл., %)		
0	360	300							1200								
1	305	310	55	0,17	940	40304	3,0	3,5	1195	59,5	64,3	91,8	99,2	3701	3405 (-8,7)	4000	3723 (-7,4)
2	260	320	45	0,16	940	38963	3,5	4,2	1190	62,0	67,5	92,6	100,8	3607	3286 (-9,8)	3927	3593 (-9,3)
кантовка																	
3	260	270	60	0,21	940	37850	4,0	5,3	1185	66,2	72,7	95,1	104,5	3601	3281 (-9,8)	3955	3621 (-9,2)
4	215	280	45	0,19	940	35123	3,8	5,1	1180	66,9	73,3	93,4	102,4	3282	3013 (-8,9)	3598	3382 (-6,4)
кантовка																	
5	260	220	20	0,07	940	17936	4,0	3,5	1175	59,0	63,6	99,7	107,3	1788	1688 (-5,9)	1925	1793 (-7,4)
6	235	225	25	0,10	940	20887	4,0	4,1	1170	63,7	69,0	99,8	108,1	2084	1950 (-6,9)	2258	2065 (-9,4)
кантовка																	
7	210	245	15 (44)*	0,20	940	29893	5,0	7,7	1165	74,7	83,1	101	112,3	3018	3117 (+3,2)	3356	3418 (+1,8)

\* значение приведенного обжатия  $\Delta h_{\text{ПР}}$



а – стандартный химический состав стали; б – сталь с пониженным содержанием ванадия и серы

Рисунок 51 – Сравнительный анализ расчетных и фактических данных при деформации раската стали Э78ХСФ в обжимной клетке BD1 универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

### 3.4 Выводы

1. На основании теоретических и экспериментальных исследований установлено значимое влияние изменения химического состава хромистой рельсовой стали Э78ХСФ в рамках требований стандартов на сопротивление деформации при прокатке. Показано, что повышение содержания серы, фосфора, марганца и углерода в стали Э78ХСФ приводит к увеличению сопротивления деформации, а увеличение концентрации ванадия в указанной стали снижает ее сопротивление пластическому деформированию. При этом наибольшее влияние на сопротивление деформации оказывает изменения содержания ванадия и серы в стали.

2. Обобщение и математическая обработка полученных данных о влиянии физико-химических параметров на сопротивление хромистых рельсовых сталей пластическому деформированию позволили разработать статистическую модель и методику расчета сопротивления деформации при изменяющихся термомеханических параметрах деформации и нестабильном химическом составе рельсовой сталей различных марок.

3. Проверка адекватности разработанной статистической модели расчета сопротивления деформации рельсовых сталей, проведенная в условиях рельсобалочного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК», показала достаточную сходимость расчетных и фактических данных (погрешность не превышает 10 %), что говорит о возможности ее использования при проектировании новых и совершенствовании существующих режимов прокатки рельсов в производственных условиях.



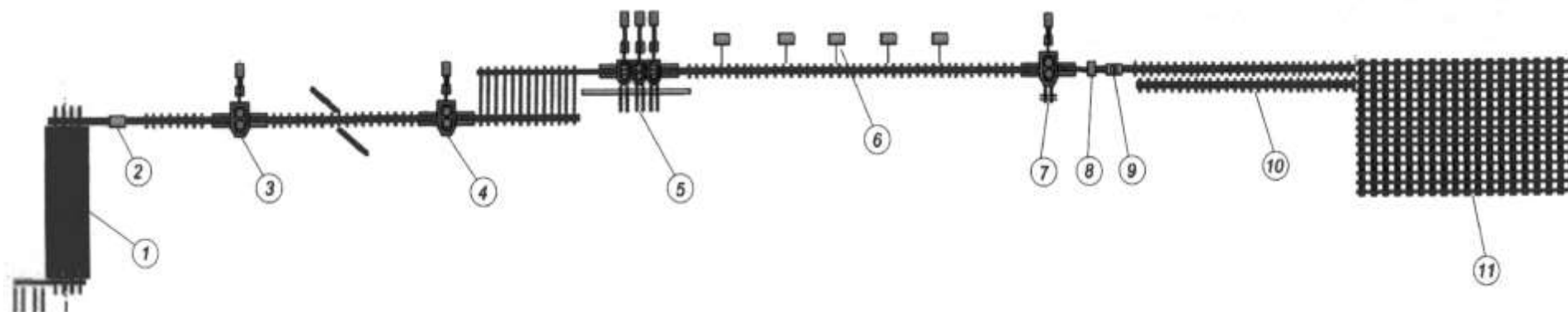
## **4 Разработка и совершенствование режимов прокатки длинномерных железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане**

### **4.1 Исследование и разработка энергоэффективных режимов прокатки длинномерных железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК»**

В 2013 г. после полномасштабной реконструкции рельсобалочного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК» [96, 97] запущен в эксплуатацию новый непрерывный универсальный рельсобалочный стан. Основным сортаментом стана являются длинномерные (длиной 100 м) железнодорожные рельсы, также предусмотрена возможность производства фасонного и сортового проката широкого номенклатурного ряда.

В состав универсального рельсобалочного стана входит следующее основное оборудование (рисунок 52): нагревательная печь с шагающими балками; устройства для гидросбива первичной и вторичной окалины; последовательно расположенные двухвалковые реверсивные обжимные клетки (BD1 и BD2); универсальный тандем стан, установленный со смещением от линии прокатки и состоящий из двух универсальных (UR и UF) клеток и одной горизонтальной вспомогательной клетки (E), отдельно расположенной чистовой калибрующей универсальной клетки ( $U_0$ ), устройств для автоматического измерения чистового профиля, автоматической клеймовочной машины.

В соответствии с контрактной калибровкой предусмотрены две основные схемы прокатки. Первая схема прокатки включает в себя следующие этапы (рисунок 53 а). Прокатка в первой обжимной клетки BD1 производится за 7 проходов, из которых первые 6 пропусков осуществляются в ящичных калибрах, а последний пропуск – в калибре «лежачая трапеция».



1 – нагревательная печь; 2 – устройство гидросбива окалины; 3 – обжимная клеть BD1; 4 – черновая клеть BD2;  
 5 – тандем-группа; 6 – пилы горячей резки; 7 – чистовая клеть; 8 – лазерный измеритель профиля;  
 9 – клеймитель; 10 – участок дифференцированной закалки; 11 – участок холодильника

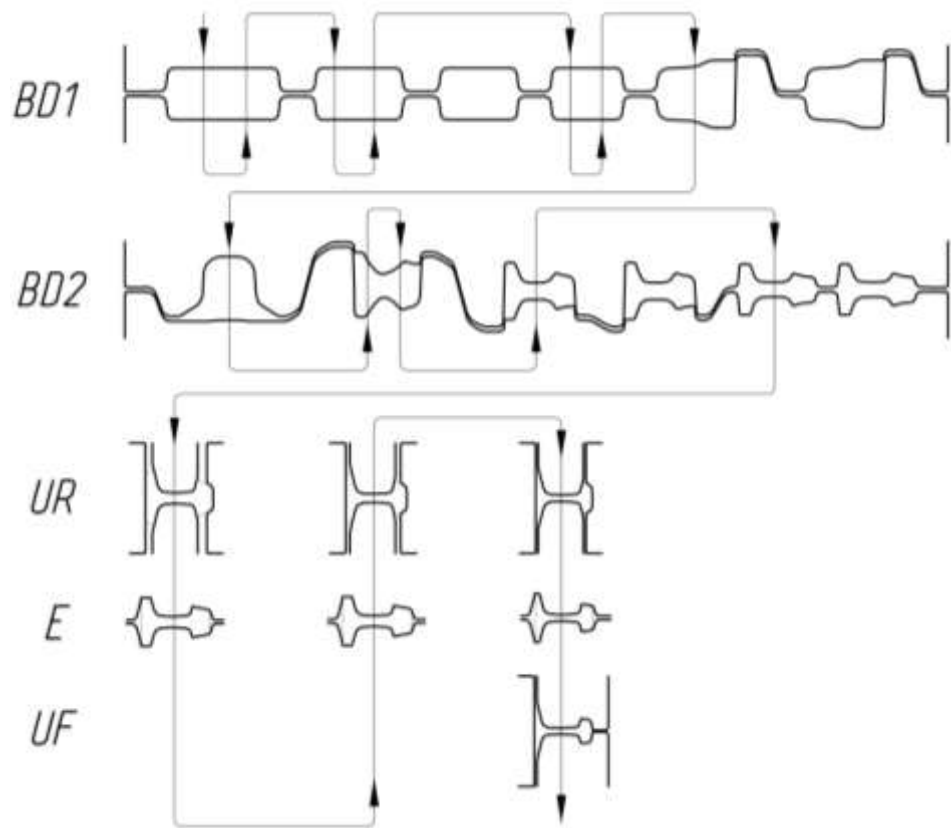
Рисунок 52 – Схема расположения оборудования универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Прокатка во второй обжимной клетке BD2 осуществляется за 5 проходов: первый пропуск – в трапецевидном калибре без разрезки со стороны будущей подошвы; второй и третий пропуски – в первом закрытом рельсовом калибре «балочного типа»; четвертый пропуск – во втором закрытом рельсовом калибре «балочного типа»; пятый пропуск – в открытом симметричном рельсовом калибре. После прокатки в обжимных клетках раскат поступает для дальнейшей деформации в клетках тандем-стана, которая осуществляется за три прохода: первый пропуск – непрерывная прокатка в первой универсальной клетке (UR) и вспомогательной клетке (ER), валки второй универсальной клетки (UF) при этом разведены; второй пропуск – в первой универсальной клетке (UR) после ее реверсирования с разведенными валками вспомогательной клетки (ER); третий пропуск – непрерывная прокатка во всех трех клетках непрерывной группы (UR, ER, UF).

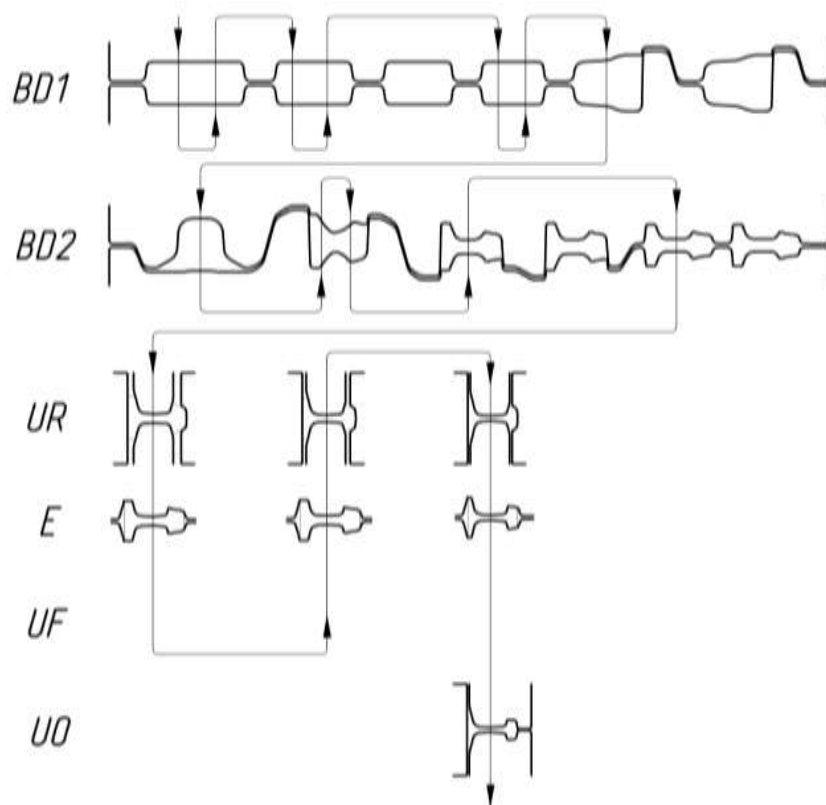
Вторая схема прокатки (рисунок 53 б) отличается тем, что при ее использовании задействована отдельно расположенная универсальная клетка ( $U_0$ ). В этом случае чистовой универсальный калибр перенесен из второй универсальной клетки непрерывной группы (клетки UF) в клетку  $U_0$ .

Запуск и начальный период эксплуатации универсального рельсобалочного стана позволил выявить существенные недостатки контрактной калибровки фирмы «SMS Meer» и имеющиеся значительные резервы по совершенствованию режимов прокатки [98].

При использовании контрактной калибровки имел место изгиб переднего конца раската при прокатке во втором рельсовом калибре (второй и третий пропуски в клетке BD2) и деформации в симметричном рельсовом калибре (пятый пропуск в клетке BD2), что приводило к необходимости осуществления прокатки с «затравкой» раската в указанных проходах. В результате такого режима прокатки происходило образование «прокатных плен» на поверхности рельсов.



а



б

а – стандартная схема прокатки; б – схема прокатки с использованием отдельно расположенной чистовой универсальной клетки

Рисунок 53 – Контрактная калибровка валков для прокатки рельсов Р65 на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Как показано ранее (раздел 1.3 данной работы) механизм возникновения указанного дефекта заключается в раскатывании имеющихся механических повреждений поверхности раската при прокатке. Кроме того, прокатка с «затравкой» приводила к снижению стойкости прокатных валков за счет повышенной выработки калибров и повышению времени прокатки в обжимной клетке BD2. Таким образом, на практике показано, что использование контрактного режима прокатки железнодорожных рельсов является нетехнологичным и приводит к значительному ухудшению технико-экономических показателей работы рельсобалочного стана и снижению качества готовых рельсов.

С целью устранения указанных недостатков существующего режима прокатки железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК» разработан новый интенсифицированный режим прокатки с уменьшенным количеством проходов во второй обжимной клетке BD2 [75] (рисунок 54).

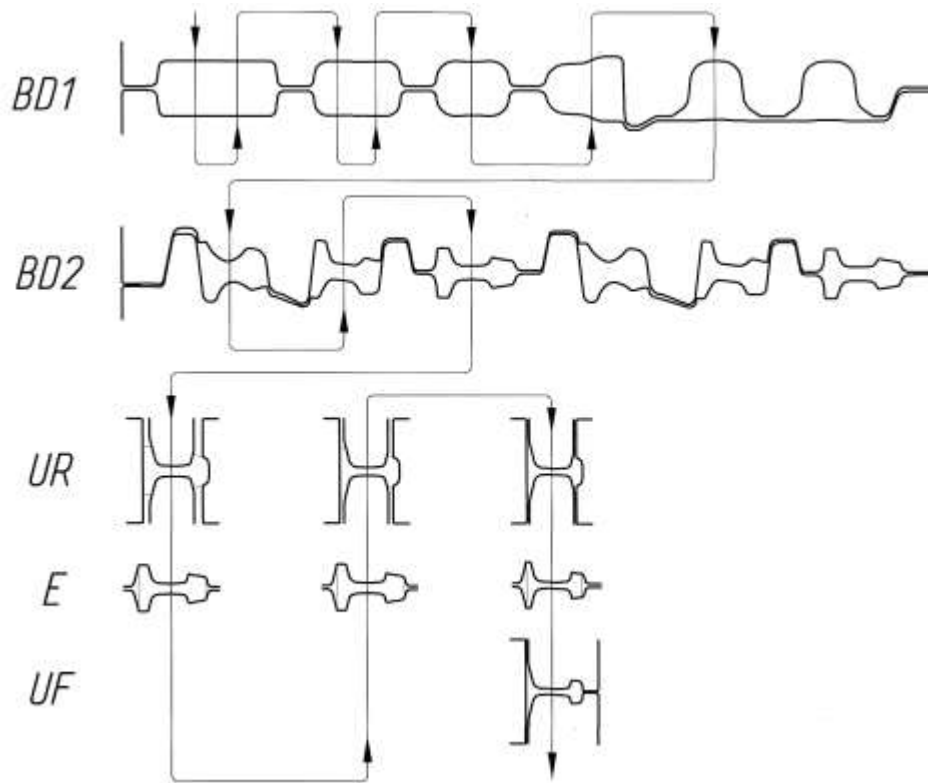


Рисунок 54 – Интенсифицированный режим прокатки рельсов Р65 на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

При использовании нового режима прокатки деформация в клетях BD1, также, как и при использовании контрактной схемы, осуществляется за 7 проходов. Однако при этом прокатка в ящичных калибрах производится только в первых 5 проходах, в шестом проходе деформация осуществляется в калибре «лежачая трапеция», а в седьмом проходе – в трапецевидном калибре. Прокатка в клетях BD2 производится за 3 прохода: первый и второй проходы производятся в косорасположенных рельсовых калибрах с уклонами боковых стенок до 18% и использованием упорных конусов с уклонами 25%, а последний проход – в открытом симметричном рельсовом калибре. После обжимных клетей раскат, как и контрактной схеме прокатки, поступает для дальнейшей деформации в клетях тандем-стана. Контрактный и интенсифицированный режимы обжатий представлены в таблице 8.

Возможность снижения количества проходов предварительно обоснована расчетами усилия прокатки в обжимных клетях, которые проведены с использованием ранее разработанной методики расчета сопротивления деформации (раздел 3.3). По полученным данным при использовании нового режима прокатки усилие прокатки не превысит 61 % от допустимых значений (рисунок 55).

С целью определения технологичности нового режима прокатки проведены опытно-промышленные исследования загруженности двигателей обжимных клетей универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК» [99].

При проведении исследований использовали три режима прокатки:

1. Существующий режим (7 пропусков в клетях BD1 и 5 пропусков в клетях BD2) – режим № 1;
2. Режим с перераспределением обжатий между клетями (9 пропусков в клетях BD1 и 3 пропуска в клетях BD2) – режим № 2;
3. Разработанный интенсифицированный режим (7 пропусков в клетях BD1 и 3 пропуска в клетях BD2) – режим № 3.

Таблица 8 – Схемы прокатки рельсов в обжимных клетях  
рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Наименование клетей	Контрактная схема прокатки SMS Meer				Интенсифицированный режим прокатки		
	№ прохода	H, мм	B, мм	Δh, мм	H, мм	B, мм	Δh, мм
BD1	0	300	360	—	300	360	—
	1	кантовка			кантовка		
		305	310	55	305	310	60
	2	260	320	45	257	320	48
	3	кантовка			кантовка		
		260	270	60	260	267	60
	4	215	280	45	229	277	31
	5	кантовка			кантовка		
		260	220	20	217	239	60
	6	235	225	25	кантовка		
					210	246	29
	7	кантовка			кантовка		
		210	245	15	192,5	250 (170)*	53,5
BD2	1	кантовка			кантовка		
		200 (170)*	255	45	80**	—	90**
	2	103**	—	67**	55**	—	25**
	3	73**	—	30**	43**	—	12**
	4	53**	—	20**	—	—	—
	5	45**	—	8**	—	—	—

\* - в скобках указана высота полосы формируемой шейки рельсового профиля;

\*\* - высота полосы и обжатие приняты по формируемой шейке рельсового профиля.

Исследования проводили методом осциллографирования параметров работы двигателей приводов клетей.

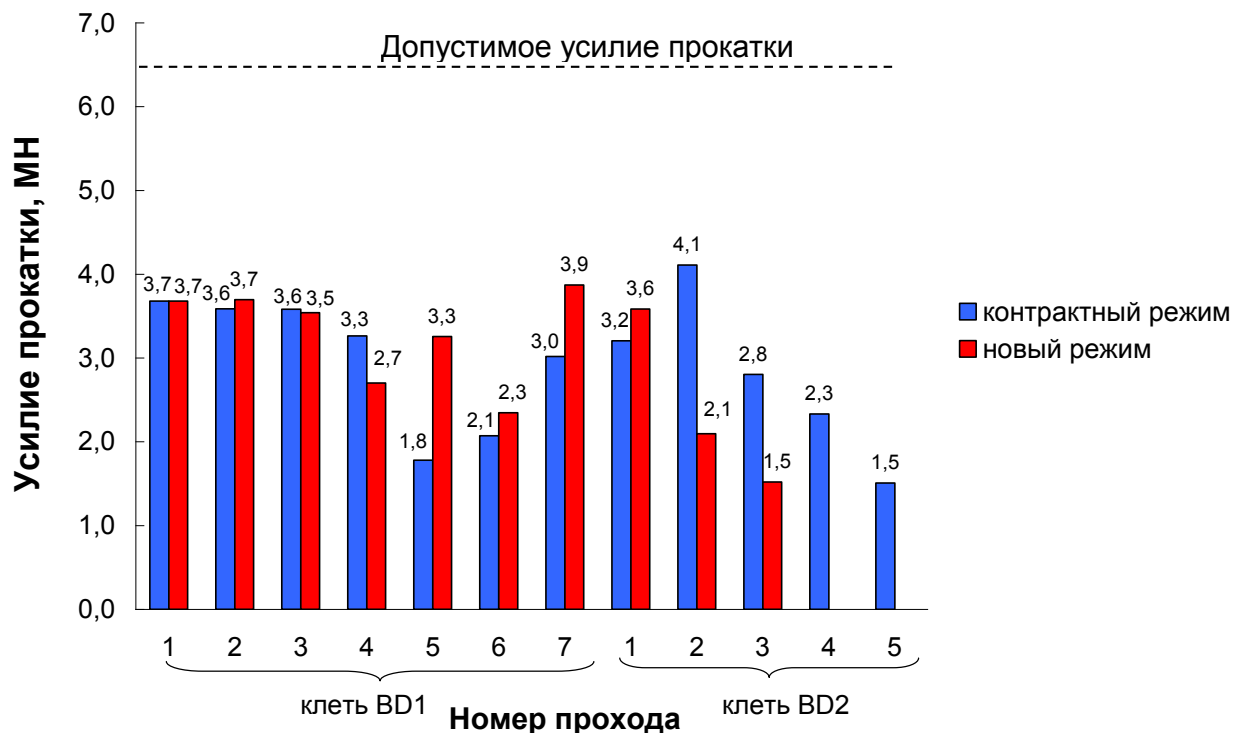


Рисунок 55 – Расчетные данные по усилию прокатки при использовании различных режимов деформации

Обе обжимные клетки BD1 и BD2 оборудованы одинаковыми синхронными двигателями типа AMZ 0900LT08 LSB, технические характеристики которых представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Технические характеристики двигателей обжимных клеток BD1 и BD2

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра
1	Номинальная скорость вращения	310 об/мин
2	Максимальная скорость вращения	982 об/мин
3	Номинальная сила тока	744 А
4	Номинальное напряжение статора	3165 В
5	Номинальная мощность	4000 кВт
6	Номинальный момент на валу двигателя	
	- при номинальной скорости вращения	123 кН·м
	- при максимальной скорости вращения	39 кН·м



Для рассматриваемых двигателей существуют следующие ограничения по перегрузке от номинала в процессе работы:

- не более 115 % от номинала при непрерывной перегрузке;
- не более 225 % от номинала при перегрузке в течение 30 с;
- не более 250 % от номинала при перегрузке в течение 2 с.

Результаты обработки полученных осциллограмм (рисунки 56-61), представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Статические моменты двигателей обжимных клетей

Клеть	Номер прохода	Статические моменты на валу двигателя ( $M_{CT}$ ) и скорости вращения ( $n$ ) вала двигателя для различных схем прокатки					
		Режим №1		Режим №2		Режим №3	
		$M_{CT}$ , % от ном.	$n$ , об/мин	$M_{CT}$ , % от ном.	$n$ , об/мин	$M_{CT}$ , % от ном.	$n$ , об/мин
BD1	1	100	370	135	315	110	210
	2	82	370	110	368	100	370
	3	105	475	135	485	110	415
	4	77	463	95	465	80	476
	5	35	504	40	485	80	476
	6	30	463	40	465	55	420
	7	55	525	70	420	76	580
	8	-		55	355	-	-
	9	-		35	537	-	-
BD2	1	66	495	85	366	105	355
	2	20	455	70	344	68	315
	3	92	377	35	484	38	485
	4	70	344	-	-	-	-
	5	33	385	-	-	-	-

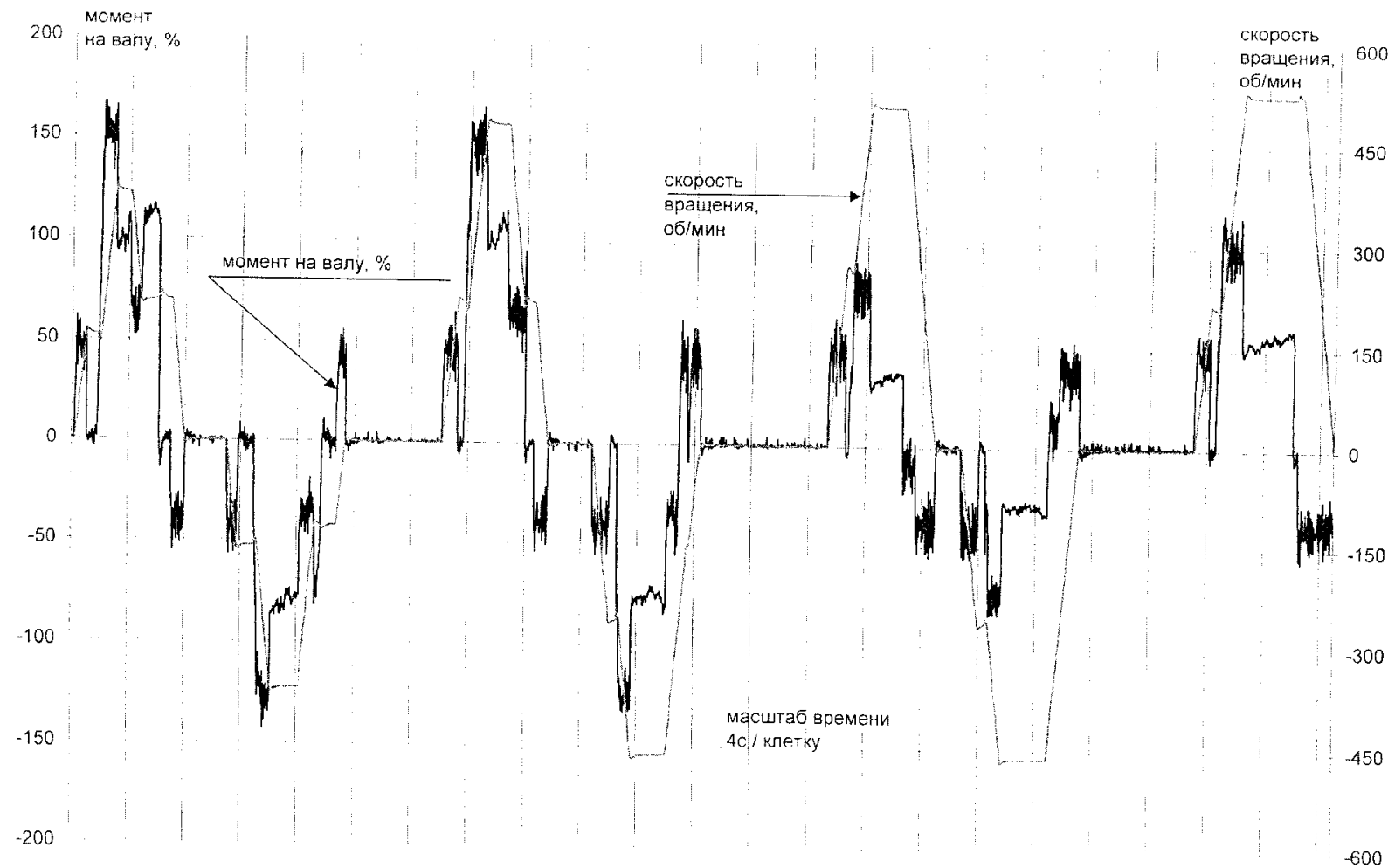


Рисунок 56 – Осциллограмма режимов работы клетки BD1 при прокатке рельсов Р65 по режиму №1

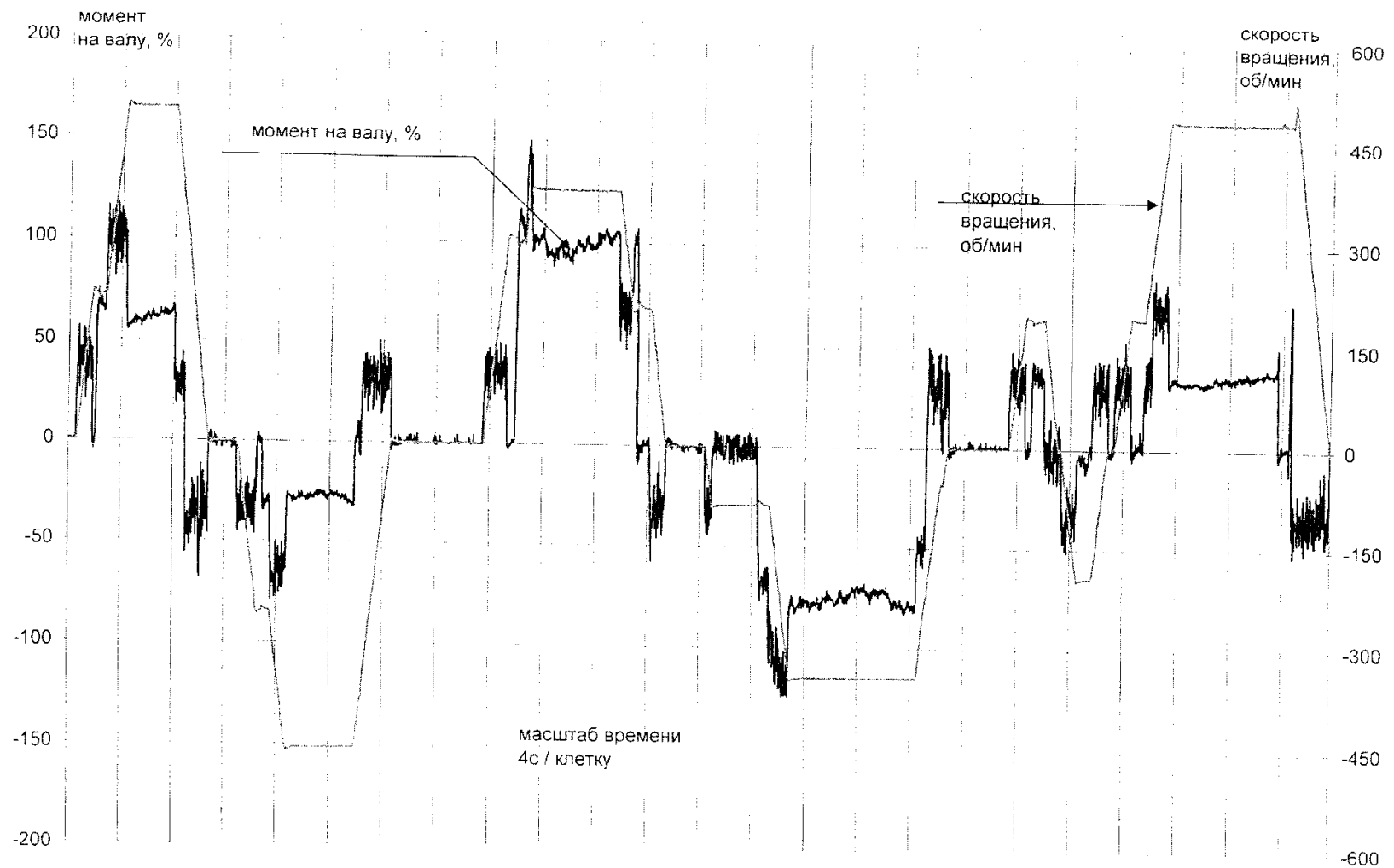


Рисунок 57 – Осциллограмма режимов работы клетки BD2 при прокатке рельсов Р65 по режиму №1

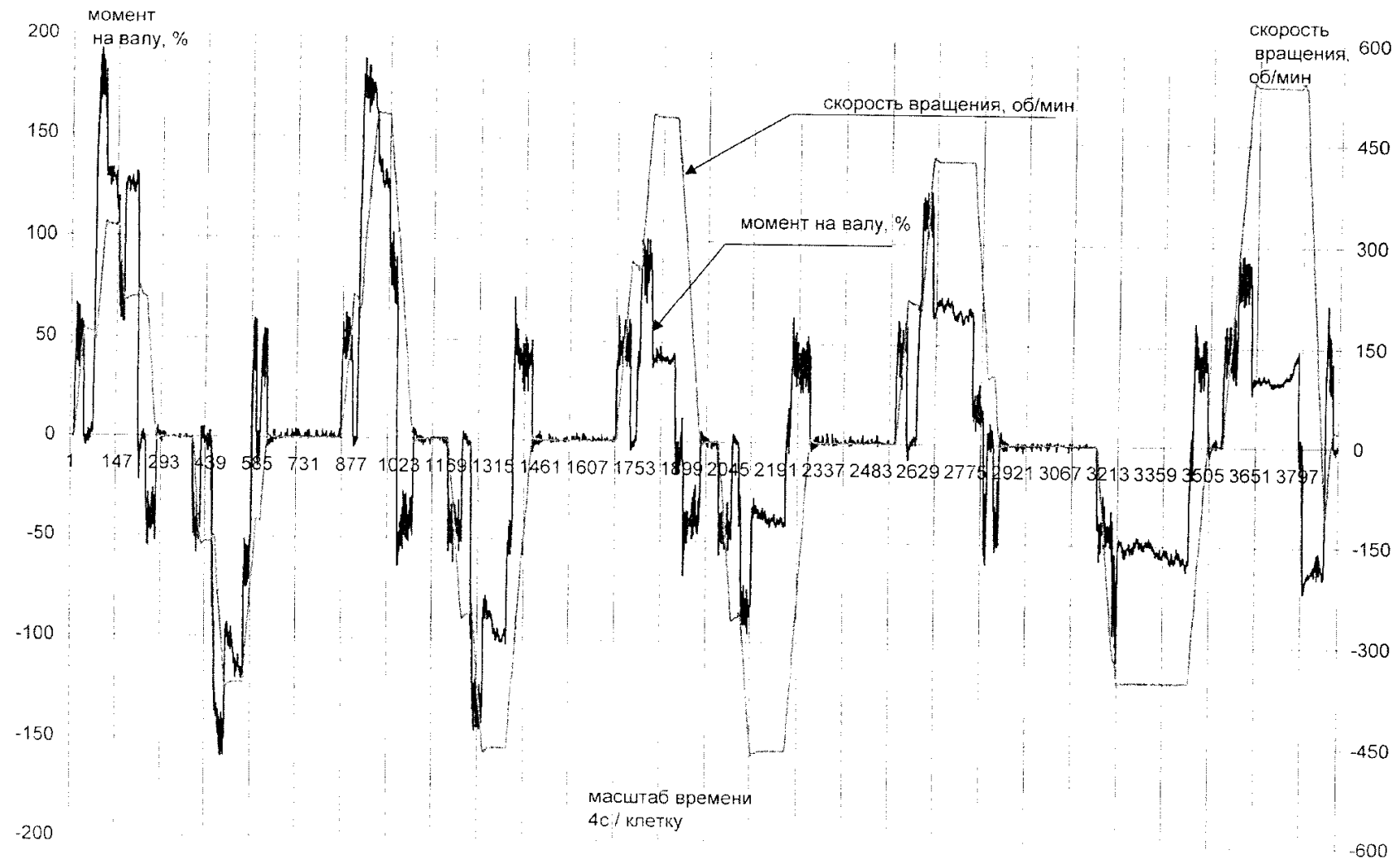


Рисунок 58 – Осциллограмма режимов работы клетки BD1 при прокатке рельсов Р65 по режиму №2

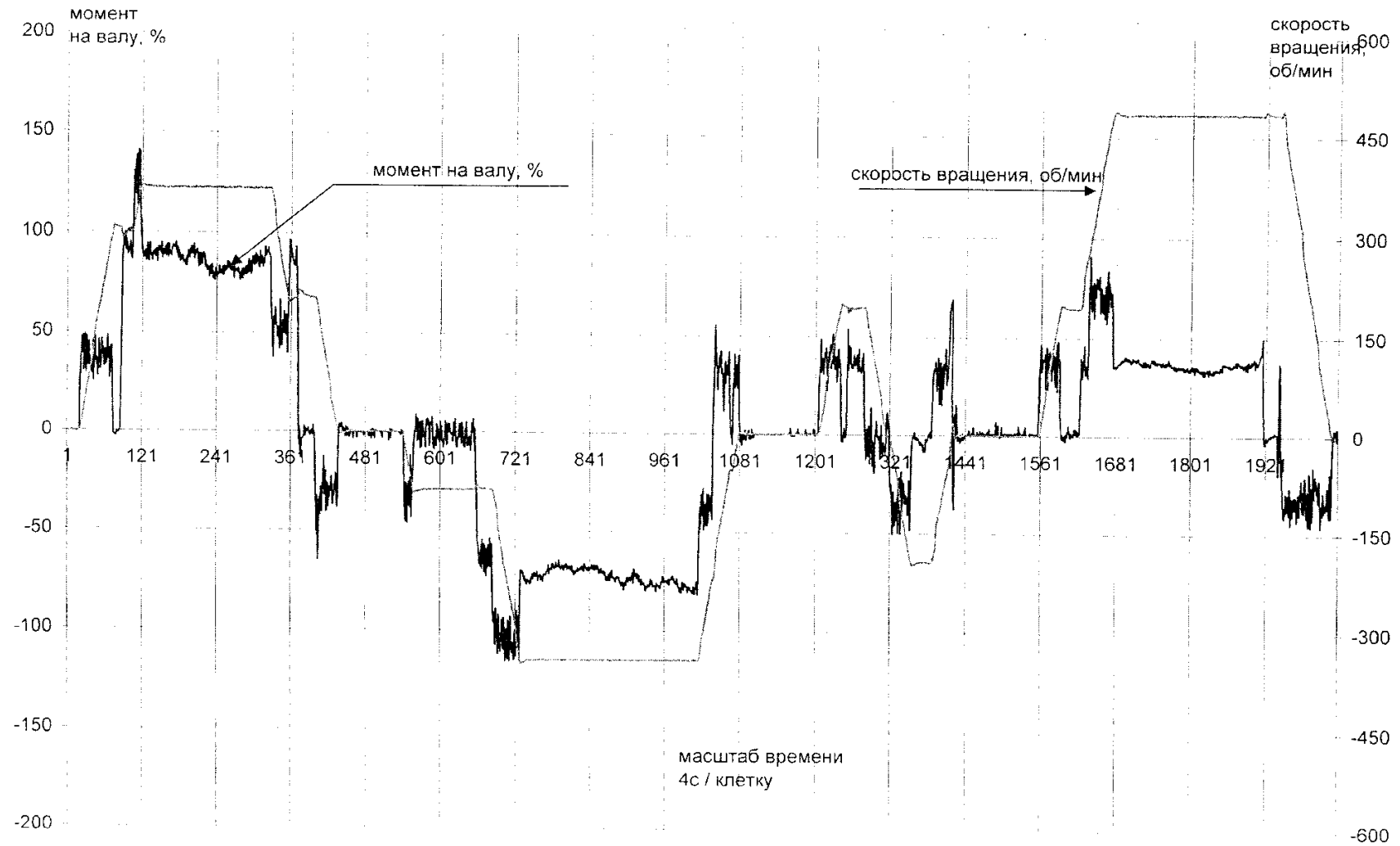


Рисунок 59 – Осцилограмма режимов работы клетки BD2 при прокатке рельсов Р65 по режиму №2

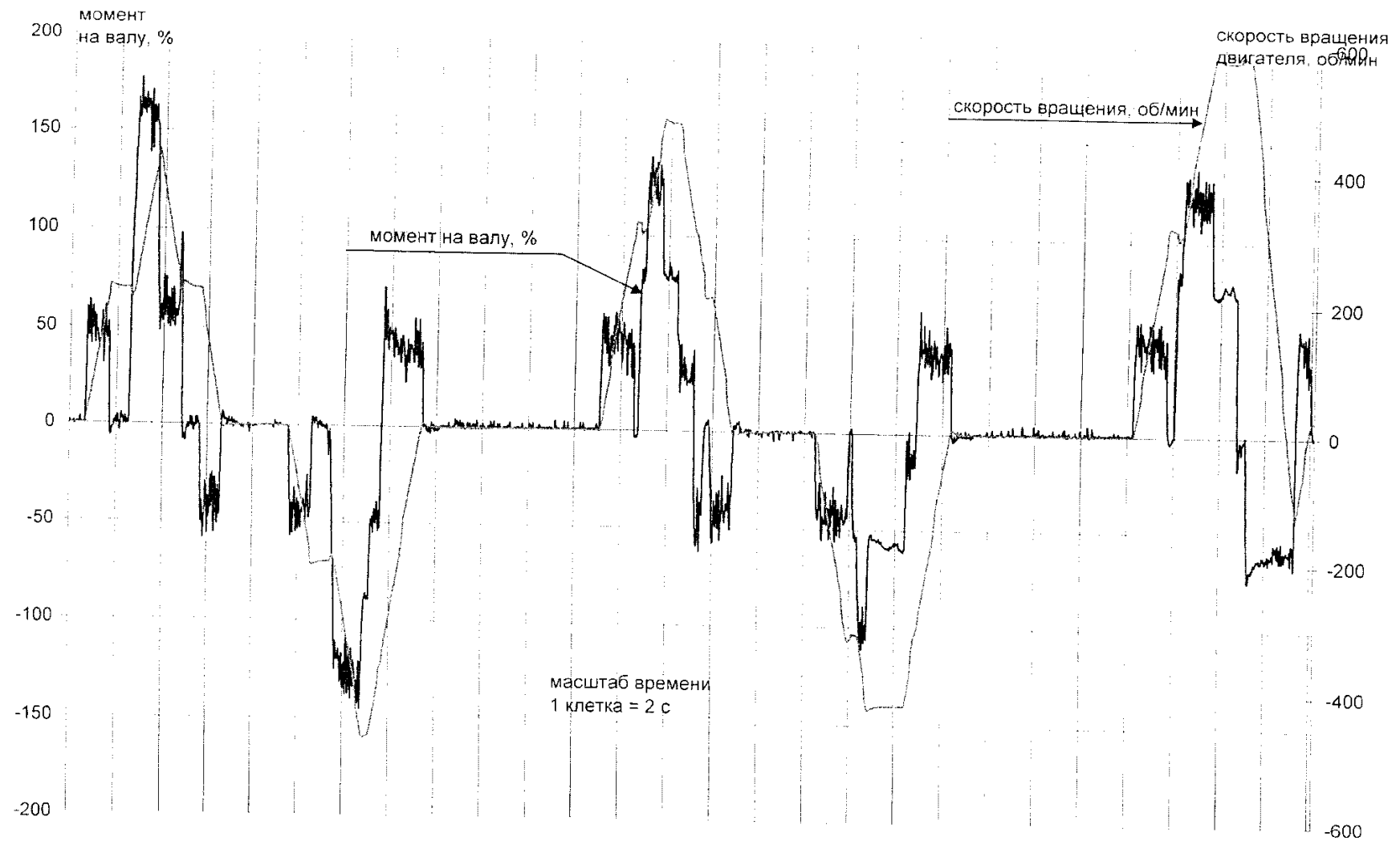


Рисунок 60 – Осциллограмма режимов работы клетки BD1 при прокатке рельсов Р65 по режиму №3

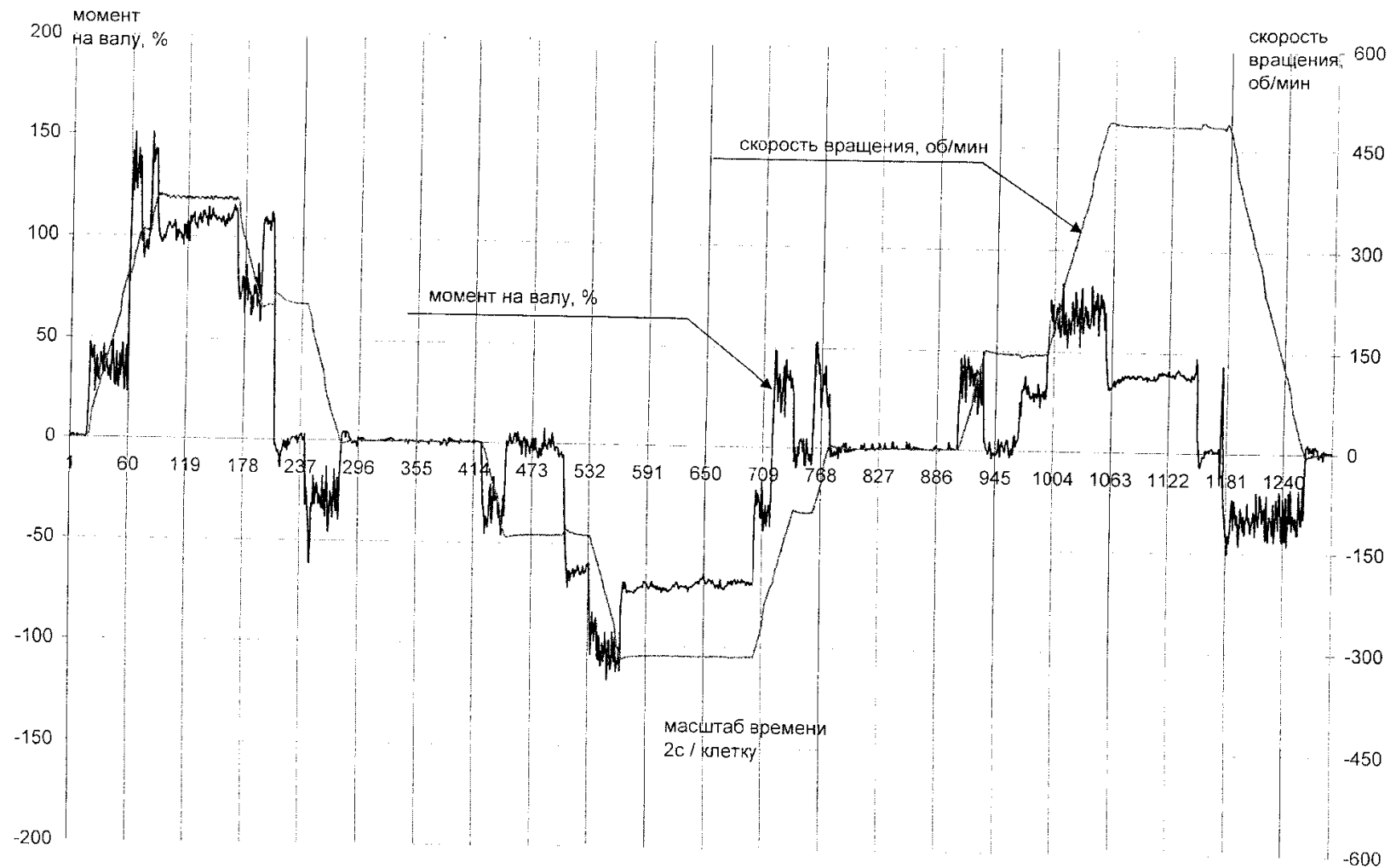


Рисунок 61 – Осциллограмма режимов работы клетки BD2 при прокатке рельсов Р65 по режиму №3

На основе проведенного анализа можно констатировать, что при использовании всех трех использованных схем прокатки режимы работы двигателей обжимных клеток BD1 и BD2 не выходят за пределы допустимых.

С целью сравнительной оценки энергоэффективности разработанных и используемой в настоящее время схем прокатки определены удельные расходы электроэнергии на тонну проката. Результаты представлены в таблице 11 и на рисунке 62.

Таблица 11 – Удельный расход электроэнергии при использовании различных схем прокатки в обжимных клетях BD1 и BD2

Клеть	Удельный расход электроэнергии для различных схем прокатки, кВт·ч/т		
	Режим №1	Режим №2	Режим №3
BD1	4,23	5,63	5,19
BD2	5,43	4,38	3,96
<b>Итого</b>	<b>9,66</b>	<b>10,01</b>	<b>9,15</b>

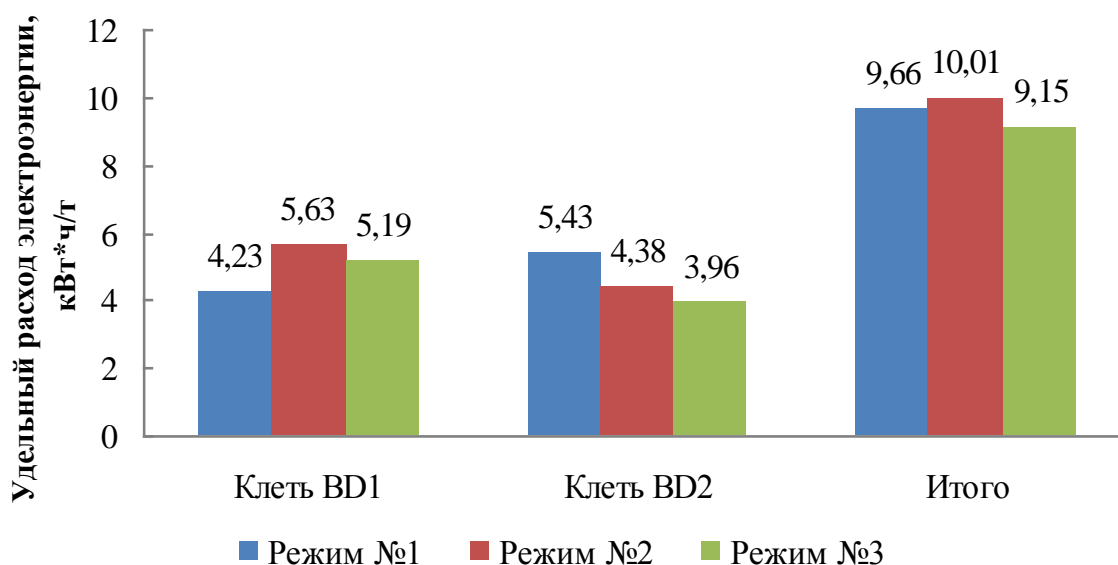


Рисунок 62 – Удельный расход электроэнергии при использовании различных режимов прокатки рельсов Р65 в обжимных клетях



По полученным данным режим прокатки №3 является наиболее энергоэффективным: по отношению к существующей схеме прокатки (режим №1) зафиксировано снижение удельного расхода электроэнергии на 0,51 кВт·ч/т, а по сравнению с режимом прокатки №2 удельный расход электроэнергии ниже на 0,86 кВт·ч/т.

В ходе опытно-промышленного опробования и внедрения интенсифицированного режима обжатий в обжимных клетях (режим №3) зафиксировано снижение отбраковки готовых рельсов по дефектам поверхности по сравнению с периодами использования режима прокатки №1 (рисунок 63).

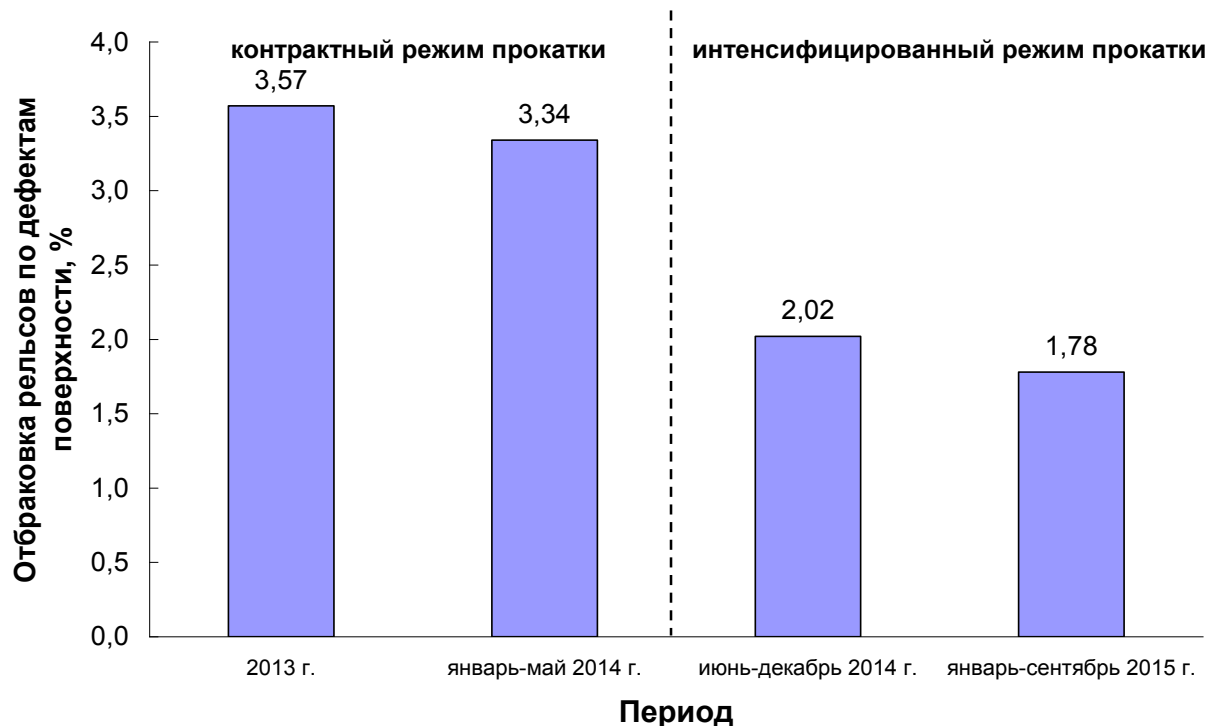


Рисунок 63 – Динамика отбраковки рельсов по дефектам поверхности на рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Проведенная оценка влияния изменения режима прокатки на отбраковку по дефекту «прокатная плена» показала, что использование интенсифицированного режима прокатки позволяет уменьшить отбраковку по указанному дефекту на 0,5 %. Данный факт обусловлен тем, что при

использовании нового режима прокатки появилась технологическая возможность отказа от прокатки с «затравкой» раската при отсутствии риска изгиба полосы после выхода из калибров обжимных клетей.

На основании полученных положительных результатов опытно-промышленного опробования, режим прокатки с уменьшенным количеством проходов в обжимных клетях принят в качестве основного для производства длинномерных железнодорожных рельсов на рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Внедрение указанного режима прокатки в производство позволило кроме вышеуказанного снижения удельного расхода электроэнергии и повышения качества поверхности рельсов добиться также снижения удельного расхода прокатных валков клетки BD2 на 0,51 кг/т, уменьшения такта прокатки на обжимных клетях на 10 сек. (что привело к увеличению производительности стана при производстве рельсов до 146,8 т/ч.) и увеличения межремонтного объема проката с 3,5 до 6,0 тыс. т. Экономическая эффективность внедрения составила 98,588 млн. руб./год.

#### **4.2 Разработка режимов прокатки железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК», обеспечивающих повышение качества рельсовых профилей**

Как показано выше использование отдельно расположенной чистовой клетки позволяет повысить точность геометрических размеров готового профиля, что и было учтено при проектировании универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Однако при этом контрактная калибровка валков тандем-стана для прокатки рельсов обладала существенным недостатком – согласно указанной калибровки получение предчистового профиля происходит в процессе непрерывной прокатки в двух клетях (UR и E) – рисунок 64. В этом случае геометрические размеры профиля по длине раската перед задачей в чистой калибр могут быть

нестабильными, что отрицательным образом сказывается на качестве готовых рельсов.

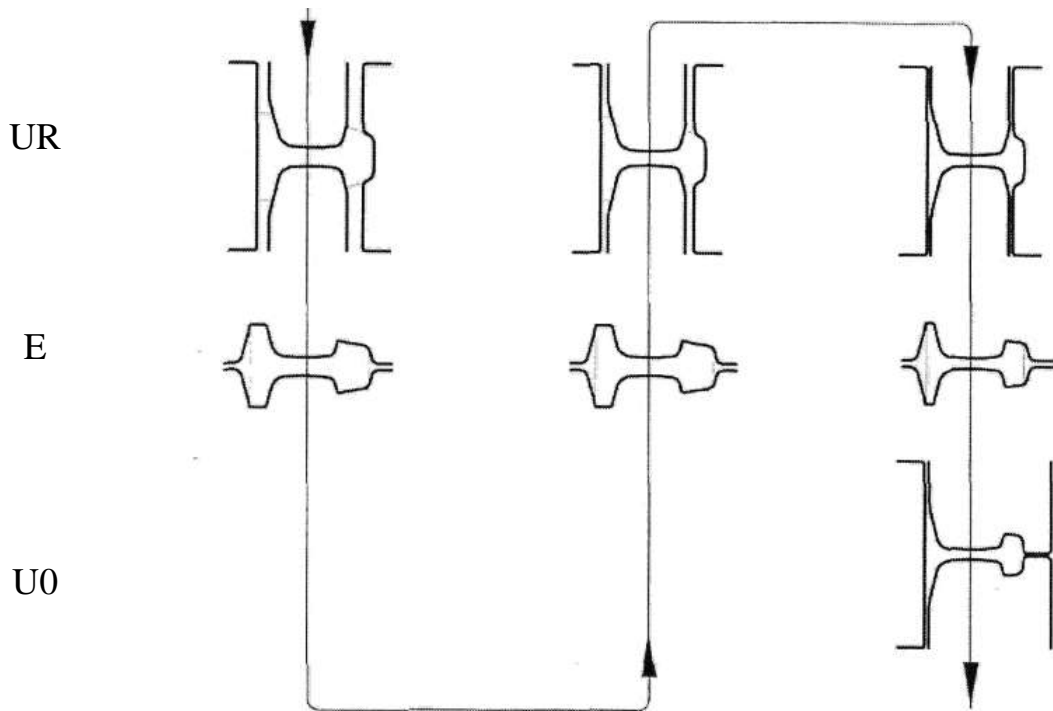


Рисунок 64 – Контрактная схема прокатки рельсов на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» с использованием отдельно расположенной универсальной клетки

Для устранения вышеуказанного недостатка разработана калибровка валков, в которой режим непрерывности отсутствует в трех последних калибрах [100, 101] (рисунок 65). Согласно новой калибровке непрерывный режим прокатки используется только в первом проходе, когда задействованы все три клетки непрерывной группы. В этом случае полученные отклонения геометрических размеров профиля по длине раската исправляются в трех последующих калибрах, прокатка в которых осуществляется при отсутствии непрерывного режима.

Областью применения разработанного режима прокатки с использованием отдельно расположенной чистовой клетки является производство рельсов с повышенными требованиями к точности геометрических размеров (рельсы для высокоскоростных магистралей и рельсы, произведенные по требованиям европейских стандартов).

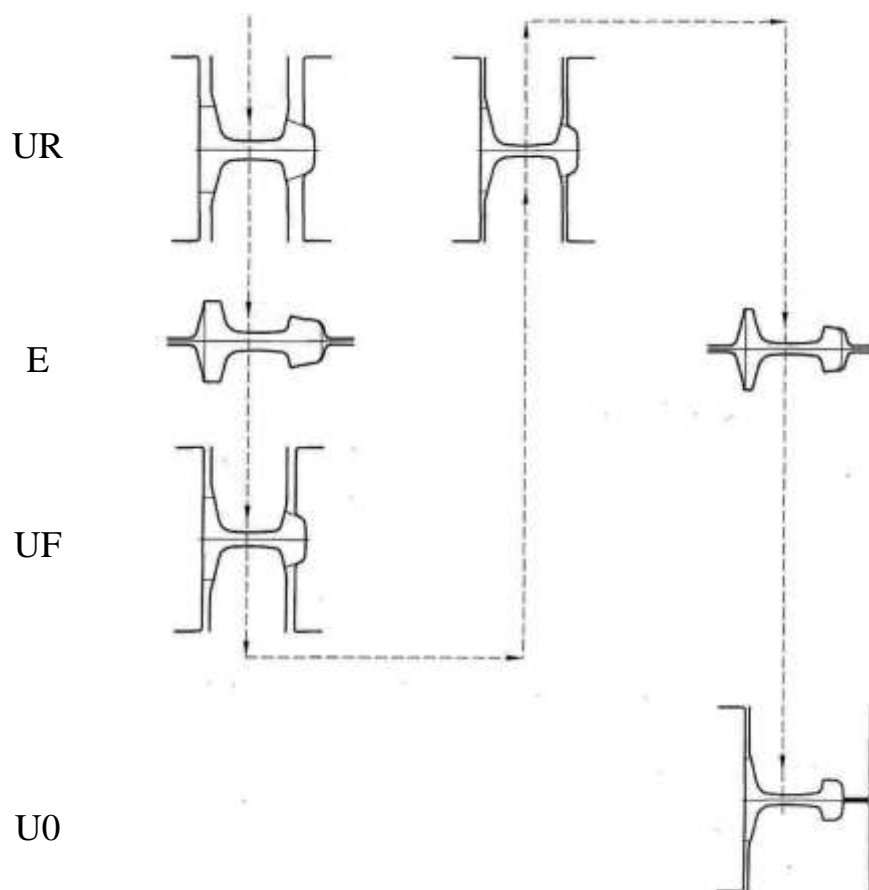
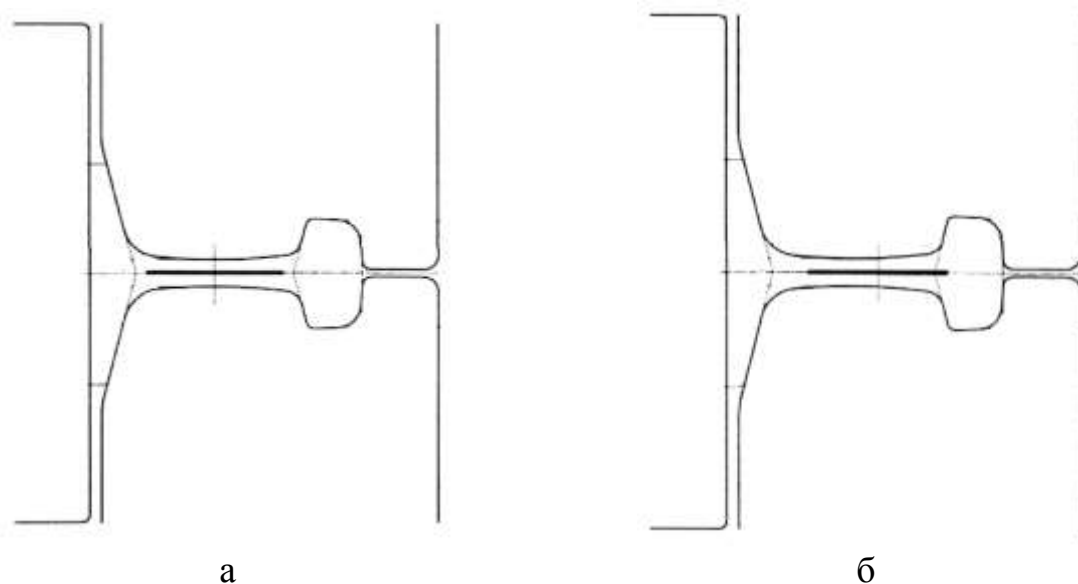


Рисунок 65 – Новая схема прокатки рельсов с использованием отдельно расположенной чистовой универсальной клетки

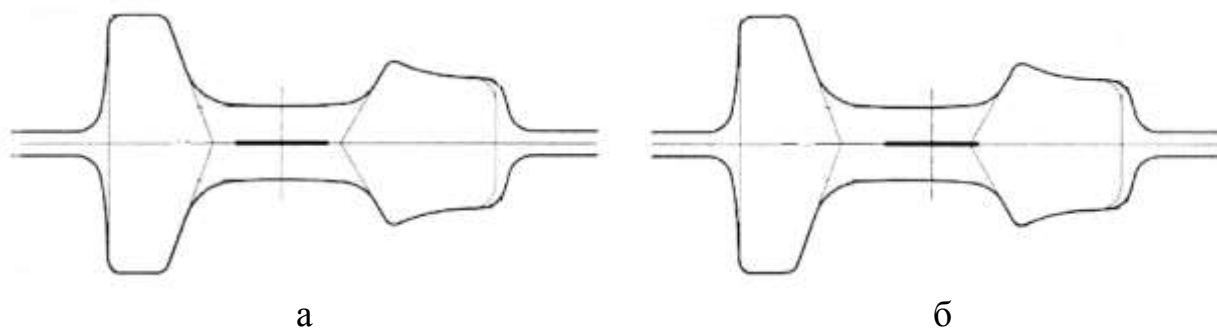
Одной из основных проблем, возникающих при использовании для производства рельсовых профилей непрерывнолитых заготовок со значительной осевой пористостью и центральной ликвацией, является высокая вероятность перехода указанных внутренних дефектов заготовок в головку рельса после прокатки. Обобщение результатов ранее проведенных лабораторных и промышленных исследований [102] позволило установить, что при использовании стандартной схемы прокатки без разрезки заготовки в трапецевидных калибрах (рисунок 53) произойдет значительное смещение осевой пористости к головке рельса (рисунок 66).



а – схема прокатки с резкой заготовки со стороны будущей подошвы;  
 б – стандартная схема прокатки

Рисунок 66 – Расположение осевой пористости в готовом рельсе Р65

Данный факт обусловлен тем, что при формировании чернового профиля в обжимных двухвалковых клетях центральная часть заготовки располагается значительно ближе к внутренним поверхностям головки рельса по сравнению с внутренними поверхностями подошвы рельса (рисунок 67), а при дальнейшей прокатке в универсальных калибрах обжатие головки вертикальными валками превышает обжатие подошвы практически в 2 раза.



а – схема прокатки с резкой заготовки со стороны будущей подошвы;  
 б – стандартная схема прокатки

Рисунок 67 – Расположение осевой пористости в подготовительном калибре при прокатке рельса Р65

Для условий нового универсального рельсобалочного стана разработан режим прокатки рельсовых профилей с разрезкой заготовки в трапецевидном калибре (рисунок 68).

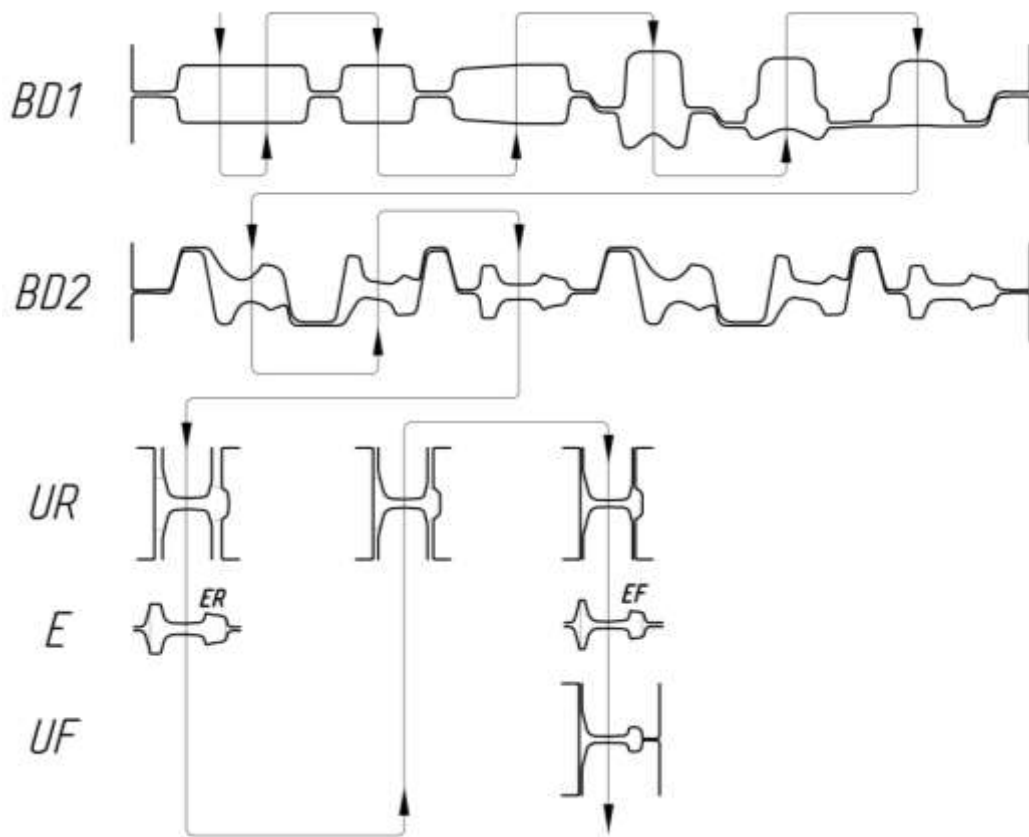


Рисунок 68 – Схема калибровки для прокатки рельсов с резкой заготовки в трапецевидном калибре

Разработанный режим прокатки позволяет предотвратить смещение внутренних дефектов в головку рельса, что подтверждено данными опытно-промышленной прокатки заготовок со значительной осевой пористостью — после прокатки в разрезном калибре происходит перемещение внутренних дефектов в сторону формируемой подошвы рельса (рисунок 69 а), в результате чего в готовом профиле осевая пористость не выходит за пределы шейки (рисунок 69 б). Полученные данные свидетельствуют, что схема прокатки с резкой заготовки в трапецевидном калибре является оптимальной при использовании исходных непрерывнолитых заготовок со значительной осевой пористостью и центральной ликвацией.



а



б

а – разрезной калибр; б – чистовой калибр

Рисунок 69 – Макроструктура рельсового профиля при прокатке из заготовок со значительной осевой пористостью

В настоящее время на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» проблема недостаточно высокого качества внутренней структуры исходных непрерывнолитых заготовок для производства рельсов практически решена, что обусловлено внедрением электромагнитного перемешивания расплава и технологии «мягкого обжатия» при разливке стали на МНЛЗ. Однако указанная проблема остается актуальной при использовании исходных заготовок сторонних поставщиков.

Таким образом, на основании результатов лабораторных и опытно-промышленных исследований разработаны режимы прокатки железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК», обеспечивающие повышение точности геометрических размеров профиля и повышение качества макроструктуры рельсов.

#### 4.3 Выводы

1. На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также производственных данных периода запуска в эксплуатацию универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

разработан интенсифицированный режим прокатки длинномерных железнодорожных рельсов с уменьшенным количеством проходов в обжимных клетях. В ходе опытно-промышленного опробования нового режима прокатки установлено значительное улучшение технико-экономических и качественных показателей работы стана: снижение удельного расхода электроэнергии на 0,51 кВт·ч/т; уменьшение отбраковки рельсов по поверхностным дефектам на 0,5 %; снижение удельного расхода прокатных валков клетки BD2 на 0,51 кг/т; уменьшение такта прокатки на обжимных клетях на 10 сек., что привело к увеличению производительности стана при производстве рельсов до 146,8 т/ч.; увеличение межремонтного объема проката с 3,5 до 6,0 тыс. т. Экономическая эффективность от использования разработанного режима прокатки рельсов составила 98,588 млн. руб/год.

2. Разработана новая схема прокатки железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане с использованием отдельно расположенной чистовой клетки, отличительной особенностью которой является отсутствие режима непрерывности при деформации в предчистовом и чистовом проходах. Показано, что применение данной схемы прокатки позволяет обеспечить повышенную точность геометрических размеров рельсов, что актуально при производстве рельсов для высокоскоростных магистралей и рельсов по европейским стандартам.

3. Обобщение результатов лабораторных и опытно-промышленных исследований позволило установить отсутствие смещения внутренних дефектов исходных заготовок в головку рельса при использовании схемы прокатки с разрезкой заготовки в трапецевидном калибре. На основании полученных данных разработана калибровка валков универсального рельсобалочного стана с использованием трапецевидных калибров с глубокой разрезкой заготовки со стороны подошвы, обеспечивающая повышение качества внутренней структуры рельсов при значительной осевой пористости исходных заготовок.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании экспериментальных исследований, проведенных с использованием современного комплекса для физического моделирования «Gleeble System 3800», получены научно-обоснованные аналитические зависимости сопротивления хромистой рельсовой стали Э78ХСФ пластическому деформированию от термомеханических параметров деформации (температура, скорость и степень деформации).

2. Совокупность проведенных теоретических и экспериментальных исследований позволила установить значимое влияние изменения химического состава хромистой рельсовой стали Э78ХСФ на сопротивление деформации при прокатке. Получены регрессионные зависимости сопротивления деформации хромистой рельсовой стали от содержания основных примесных и легирующих элементов. Показано, что указанные зависимости могут быть использованы применительно к широкому номенклатурному ряду рельсовых марок стали.

3. Разработана статистическая модель и универсальная методика расчета сопротивления деформации рельсовых сталей при изменяющихся термомеханических параметрах деформации и нестабильном химическом составе, проверка адекватности которой в производственных условиях рельсобалочного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК» показала достаточную сходимость расчетных и фактических данных (погрешность не превышает 10 %).

4. На основании результатов теоретических исследований и экспериментальных исследований, проведенных в лабораторных и производственных условиях, разработаны новые схемы и режимы прокатки длинномерных железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане, обеспечивающие экономию энергоресурсов и повышению качества рельсов:

- интенсифицированный режим прокатки с уменьшенным количеством проходов в обжимных клетях, обеспечивающий снижение удельного расхода

электроэнергии на 0,51 кВт·ч/т, уменьшение отбраковки рельсов по поверхностным дефектам на 0,5 %, снижение удельного расхода прокатных валков клетки BD2 на 0,51 кг/т, уменьшение такта прокатки на обжимных клетях на 10 сек. и увеличение межремонтного объема проката с 3,5 до 6,0 тыс. т;

- схема прокатки железнодорожных рельсов с использованием отдельно расположенной чистовой универсальной клетки и отсутствием режима непрерывности при деформации в предчистовом и чистовом проходах, обеспечивающая повышение точности размеров готовых рельсов;

- режим прокатки с разрезкой заготовки в трапецевидном калибре, применение которого обеспечивает повышение качества макроструктуры рельсов при использовании исходных заготовок со значительной осевой пористостью.

5. Использование результатов диссертационного исследования при разработке и совершенствовании технологии производства длинномерных железнодорожных рельсов на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» позволило получить фактический экономический эффект 98,588 млн. руб./год, при долевом участии автора 30% или 29,576 млн. руб.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов, В. К. Исследование прокатки рельсов в универсальных клетях / В. К. Смирнов, А. Р. Бондин, А. М. Михайленко // Производство проката. – 2002. – №12. – С. 24-30.
2. Desvallees, J. Universal rolling of rails – State of the art / J. Desvallees, A. Faessey, G. Gouth, G. Mennel // Iron and steel engineer. – March 1987. – pp. 25-31.
3. Литвинов, Р.А. Разработка и моделирование технологических режимов прокатки рельсов с применением универсальных клетей : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.16.05 / Литвинов Роман Александрович. – Екатеринбург, 2009. – 147 с.
4. Свейковски, У. Производство рельсов высокого качества с использованием компактных универсальных клетей и технологий Rail Cool. Металлургическое производство и технология (МРТ) / У. Свейковски, Т. Нерзак // Черные металлы. – 2006. – №2. – С. 50-56.
5. Никитина, Л. А. Состояние и перспективы развития производства проката в России и за рубежом. Ч. IV / Л. А. Никитина // Производство проката. – 2000. – №11. – С. 2-10.
6. Смирнов, В. К. Производство рельсов с применением универсальных клетей за рубежом / В. К. Смирнов [и др.] // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». – 1983. – №20. – С. 28-29.
7. Поляков, В. В. Развитие прокатки рельсов за рубежом: Обзор. информ. ин-та «Черметинформация» / В. В. Поляков, Е. А. Артамонова. – 1989. – 29 с.
8. Артамонова, Е. А. Производство рельсового проката повышенного качества за рубежом / Е. А. Артамонова // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». – 1984. – №6. – С. 16-24.

9. Кузнецов, А. Ф. Производство рельсов с использованием универсальной клетки в качестве предчистовой / А. Ф. Кузнецов, В. В. Дорофеев, И. А. Шарапов, Е. Л. Кравченко // Сталь. – 1990. – №7. – С. 64-67.
10. Шарапов, И. А. Рациональная расточка четырехвалкового комплекта валков прокатки рельсов / И. А. Шарапов, В. В. Дорофеев, В. А. Бердышев, В. Е. Громов // Сталь. – 1998. – №5. – С. 45-46.
11. Шилов, В. А. Расчет формоизменения металла при прокатке рельсов в универсальных калибрах / В. А. Шилов, Д. Л. Шварц, Р. А. Литвинов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2008. – №3. – С. 51-54.
12. Шилов, В. А. Приращение и утяжка фланцев при прокатке рельсов в универсальных калибрах / В. А. Шилов, Д. Л. Шварц, Р. А. Литвинов // Производство проката. – 2008. – №7. – С. 30-33.
13. Шилов, В. А. Развитие метода расчета калибровок для прокатки рельсов / В. А. Шилов, Д. Л. Шварц, Р. А. Литвинов // Производство проката. – 2008. – №1. – С. 29-32.
14. Шилов, В. А. Моделирование процесса прокатки рельсов в универсальных калибрах / В. А. Шилов, Р. А. Литвинов, Д. Л. Шварц // Производство проката. – 2009. – №8. – С. 20-25.
15. Шилов, В. А. Скоростные режимы прокатки рельсов в непрерывных реверсивных группах клетей современного рельсобалочного стана / В. А. Шилов, Д. Л. Шварц, Р. А. Литвинов // Производство проката. – 2010. – №7. – С. 27-30.
16. Шилов, В. А. Силовые воздействия при прокатке рельсового профиля в универсальном калибре / В. А. Шилов, Д. Л. Шварц // Известия вузов. Черная металлургия. – 2009. – №11. – С. 25-29.
17. Зяблицева, Е. О. Моделирование температурных полей при прокатке рельсов / Е. О. Зяблицева, Р. А. Литвинов, В. А. Шилов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2011. – № 5. – С. 51-53.
18. Скосарь, Е. О. Исследование температурных условий прокатки длинномерных рельсов на универсальном рельсобалочном стане / Е. О.

Скосарь, В. А. Шилов, Д. Л. Шварц // Производство проката. – 2012. – №11. – С. 7-11.

19. Скосарь, Е. О. Температурное и напряженно-деформированное состояние металла при прокатке рельсов / Е. О. Скосарь, В. А. Шилов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2012. – №11. – С. 63-64.

20. Скосарь, Е. О. Моделирование температурных полей и напряженно-деформированного состояния металла при прокатке длинномерных рельсов : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.16.05 / Скосарь Екатерина Олеговна. – Екатеринбург, 2013. – 117 с.

21. Зюзин, В. И. Сопротивление деформации сталей при горячей прокатке / В. И. Зюзин, М. Я. Бровман, А. Ф. Мельников – М.: Металлургия, 1964. – 270 с.

22. Полухин, П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.

23. Развитие теории и практики металлургических технологий: монография: в 3 т. / Под ред. В.Н. Перетялько, Е.В. Протопопова, И.Ф. Селянина. Т. 2 : Пластичность и разрушение стали в процессах нагрева и обработки давлением / В.Н. Перетялько, М.В. Темлянцев, М.В. Филиппова. – М.: Теплотехник, 2010. – 352 с.

24. Ефимов, В. Н. Сопротивление деформации в процессах прокатки / В. Н. Ефимов, М. Я. Бровман – М.: Металлургия, 1996. – 254 с.

25. Сопротивление деформации и пластичность металлов при обработке давлением / Ю. Г. Калпин [и др.] – М.: Машиностроение, 2011. – 244 с.

26. Nadai A. Plastizity. Mc Graw-Hill Book Co., New York, 1931. P. 251.

27. Зайков, М. А. Режимы деформации и усилия при горячей прокатке / М. А. Зайков – Свердловск: Металлургиздат, 1960. – 300 с.

28. Курнаков, Н. С. Давление истечения и твердости пластических тел / Н. С. Курнаков, С.Ф. Жемчужный // ЖРМО. – №3. – 1913. – С. 256.

29. Карпов, С. В. Сопротивление деформации марганцовистых сталей / С. В. Карпов, А. А. Банщиков, А. С. Карпова // Ползуновский альманах. – 2008. – №3. – С. 123-126.

30. Приходько, И. Ю. Метод определения сопротивления деформации металлов со сложной зависимостью реологических свойств от параметров деформирования / И. Ю. Приходько, А. А. Сергеев, В. В. Разносилин // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Днепропетровск.: ИЧМ НАН Украины, 2007. – Вып. 14. – С. 187-193.

31. Железнодорожные рельсы из электростали / Н. А. Козырев [и др.] – Новокузнецк, 2006. – 388 с.

32. Перетяtko, В. Н. Формоизменение металла в трапециевидных калибрах при прокатке рельсов Р65 / В. Н. Перетяtko, Е. М. Пятакин, Е. Р. Браунштейн // Известия вузов. Черная металлургия. – 1998. – №8. – С. 41-43.

33. Шарапов, И. А. Рациональная система калибров для прокатки рельсов в черновых пропусках / И. А. Шарапов, В. В. Дорофеев, В. А. Бердышев, В. Е. Громов // Сталь. – 1997. – №6. – С. 61-62.

34. Дорофеев, В. В. Усовершенствование технологии проката железнодорожных рельсов / В. В. Дорофеев, В. А. Бердышев, И. А. Шарапов, В. Е. Громов // Известия вузов. Черная металлургия. – 1997. – №4. – С. 39-41.

35. Челышев, Н. А. Прокатка заготовки рельсов / Н. А. Челышев, Н. В. Дадочкин // Известия вузов. Черная металлургия. – 1994. – №2. – С. 30-33.

36. Шарапов, И. А. Калибровка несимметричных рельсовых профилей / И. А. Шарапов, Е. Л. Кравченко, В. В. Дорофеев // Сталь. – 1990. – №12. – С. 47-51.

37. А.с. 1445823 СССР, МКИ<sup>4</sup> В 21 В 1/08. Способ калибровки рельсов / Кузнецов А. Ф., Лысенко И. К., Шарапов И. А., Кравченко Е. Л.; заявитель и патентообладатель «Кузнецкий металлургический комбинат». – №4251569/23-02; заявл. 01.06.1987; опубл. 23.12.1988, Бюл. №47.

38. А.с. 1614869 СССР, МКИ<sup>5</sup> В 21 В 1/08. Способ прокатки рельсов / Кузнецов А. Ф., Шарапов И. А., Кравченко Е. Л., Дорофеев В. В.; заявитель и

патентообладатель «Кузнецкий металлургический комбинат». – №4404236/27-02; заявл. 06.04.1988; опубл. 23.12.1988, Бюл. №47.

39. А.с. 1667952 СССР, МКИ<sup>5</sup> В 21 В 1/08. Способ прокатки несимметричных рельсовых профилей / Шарапов И. А., Кравченко Е. Л., Дорофеев В. В.; заявитель и патентообладатель «Кузнецкий металлургический комбинат». – №466674/02; заявл. 27.03.1989; опубл. 07.08.1991, Бюл. №29.

40. А.с. 1694271 СССР, МКИ<sup>5</sup> В 21 В 1/08. Способ прокатки рельсов / Кузнецов А. Ф., Кравченко Е. Л., Шарапов И. А.; заявитель и патентообладатель «Кузнецкий металлургический комбинат». – №4426971/02; заявл. 16.05.1988; опубл. 30.11.1991, Бюл. №44.

41. Пат. 2097154 Российская Федерация, МКИ<sup>6</sup> В 21 В 1/08. Способ производства железнодорожных рельсов / Галицын Г. А., Рейхарт В. А., Лебедев В.И. [и др.]; патентообладатели Уральский институту металлов; АО «Кузнецкий металлургический комбинат». – №96114792/02; заявл. 23.07.1996; опубл. 27.11.1997, Бюл. №33.

42. Пат. 2394660 Российская Федерация, МПК В 21 В 1/08. Способ прокатки рельсов / Дорофеев В.В., Юрьев А.Б., Каретников А.Ю. [и др.]; заявитель и патентообладатель АО «Новокузнецкий металлургический комбинат». – №2008135537/02; заявл. 01.09.2008; опубл. 20.07.2010, Бюл. №20.

43. Пат. 2103077 Российская Федерация, МПК<sup>6</sup> В 21 В 1/08. Система калибров для прокатки рельсов в черновых пропусках / Шарапов И.А., Дорофеев В.В., Юнин Г.Н.; заявитель и патентообладатель Кузнецкий металлургический комбинат им. В.И. Ленина. – №93001973/02; заявл. 12.01.1994; опубл. 27.01.1998, Бюл. № 3 (II ч.). – 12 с.: ил.

44. Пат. 2223156 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 21 В 1/08, В 21 В 108:02. Способ прокатки рельсов / Дорофеев В.В., Литвин С.Г., Пятайкин Е.М., Павлов В.В.; заявитель и патентообладатель АО «Кузнецкий

металлургический комбинат». – №2001131270/02; заявл. 19.11.2001; опубл. 10.02.2004, Бюл. № 4 (III ч.). – 7 с.: ил.

45. Пат. 2241556 Российская Федерация, МПК7 В 21 В 1/08, В 21 В 108:02. Способ прокатки рельсов / Павлов В.В., Дорофеев В.В., Кравченко Е.Л., Пятайкин Е.М., Юнин Г.Н., Ерастов В.В.; патентообладатель ООО «Рельсы Кузнецкого металлургического комбината». – №2003124405/02; заявл. 04.08.2003; опубл. 10.12.2004, Бюл. №34(IV ч.). – 7 с.: ил.

45. Пат. 2288045 Российская Федерация, МПК8 В 21 В 1/088. Способ прокатки симметричных профилей сложной формы / Пятайкин Е.М., Кравченко Е.Л., Шарапов И.А., Дорофеев В.В., Каретников А.Ю., Марамзин В.С.; патентообладатель АО «Новокузнецкий металлургический комбинат». – №2005112379; заявл. 25.04.2005; опубл. 27.11.2006, Бюл. № 33 (I ч.). – 7 с.: ил.

47. Пат. 2394660 Российская Федерация, МПК В 21 В 1/08. Способ прокатки рельсов / Дорофеев В.В., Юрьев А.Б., Каретников А.Ю. [и др.]; заявитель и патентообладатель АО «Новокузнецкий металлургический комбинат». – №2008135537/02; заявл. 01.09.08; опубл. 20.07.10, Бюл. №20.

48. Пат. 2429090 Российская Федерация, МПК В 21 В 1/08. Способ прокатки рельсов / Кушнарев А.В., Киричков А.А., Егоров В.Д. [и др.]; заявитель и патентообладатель АО «Нижнетагильский металлургический комбинат». – №2010114609/02; заявл. 12.04.2010; опубл. 20.09.2011, Бюл. №26.

49. Штайгер, М. Г. О качестве железнодорожных рельсов, рельсовых скреплений и стрелочной продукции по результатам их приемочного контроля ЦТА / М. Г. Штайгер // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений (по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» 25-27 октября 2013 г.): Сборник научных докладов – Екатеринбург: АО «УИМ», 2014. – С. 21-31.

50. Исследование причин образования поверхностных дефектов рельсов / А. И. Троцан [и др.] // Вестник Приазовского государственного



технического университета. Серия технические науки. – 2012. – Вып. 25. – С. 106-114.

51. Патент US3 583 139 (США).

52. Патент UC 1 245 628 (Великобритания).

53. Патент JP 45-40779 (Япония).

54. Авторское свидетельство 1 225 622 (СССР).

55. Авторское свидетельство. 1 423 197 (СССР).

56. Особенности деформации металла в ящичных калибрах кузнечного рельсобалочного стана / Н. А. Челышев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1966. – №2. – С. 77-82.

57. Деформация металла в ящичных калибрах рельсобалочного стана КМК с применением резки / Н. А. Челышев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1966. – №4. – С. 99-103.

58. Браунштейн, Е. Р. Выработка поверхностных дефектов при прокатке рельсов / Е. Р. Браунштейн, В. Н. Перетяtko // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1997. – №8. – С. 32-35.

59. Браунштейн, Е. Р. Деформация металла в ящичных калибрах при прокатке рельсов Р65 / Е. Р. Браунштейн, В. Н. Перетяtko // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1997. – №4. – С. 32-34.

60. Браунштейн, Е. Р. Совершенствование технологии прокатки рельсов на АО КМК / Е. Р. Браунштейн, В. Н. Перетяtko, И. А. Шарапов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1997. – №12. – С. 32-35.

61. Зильберг, Ю. В. Формоизменение поверхностных дефектов при прокатке в простых калибрах / Ю. В. Зильберг, С. В. Ревякин // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1996. – №8 – С. 23-25.

62. Выкатываемость дефектов при прокатке крупносортовой стали / В. Д. Егоров [и др.] // Сталь. – 1995. – №1. – С. 32-34.

63. Выработка поверхностных дефектов в ящичных калибрах / В. Н. Перетятыко [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2011. – №2 – С. 26-29.

64. Исследование закономерностей формоизменения поверхностных дефектов при прокатке / Ю. В. Зильберг [и др.] // Сталь. – 1997. – №10. – С. 44-46.

65. Изменение поверхностных дефектов при прокатке трубной заготовки из коррозионностойкой стали / Ю.В. Зильберг [и др.] // Сталь. – 1991. – №10. – С. 33-36.

66. Интенсификация выработки поверхностных дефектов при производстве заготовок / Г.С. Уткин [и др.] // Производство проката. – 2004. – №4. – С. 18-22.

67. Теория прокатки крупных слитков / А. П. Чекмарёв, В. Л. Павлов, В. И. Мелешко, В. А. Токарев. – М.: Металлургия, 1968. – 252 с.

68. Теория продольной прокатки / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.

69. Мартьянов, Ю. А. Совершенствование режимов прокатки и калибровки валков на основе исследований выкатываемости поверхностных дефектов с целью повышения качества сортового проката : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.16.05 / Мартьянов Юрий Анатольевич. – Красноярск, 2013. – 117 с.

70. Исследование качества рельсов из непрерывнолитой заготовки / Д. К. Нестеров [и др.] // Сталь. – 1989. – №5. – С. 64-68.

71. Нестеров, Д. К. Производство железнодорожных рельсов из непрерывнолитых заготовок / Д. К. Нестеров [и др.] // Металлург. – 1989. – №7. – С. 33-34.

72. Качество железнодорожных рельсов из непрерывнолитой стали, выплавленной в электропечи / В. В. Могильный [и др.] // Сталь. – 1997. – №8. – С. 53-56.

73. Нестеров, Д. К. Производство железнодорожных рельсов из непрерывнолитых заготовок / Д. К. Нестеров, А. Я. Глазко // Сталь. – 1995. – №8. – С. 36-44.

74. Качество рельсов из марганцовистой стали производства комбината «Азовсталь» / Д. К. Нестеров [и др.] // Сталь. – 1998. – №8. – С. 55-58.

75. Качество рельсов из непрерывнолитой стали, выплавленной на основе первородной шихты / Д. К. Нестеров [и др.] // Сталь. – 1998. – №8. – С. 55-58.

76. Освоение технологии производства объемно-закаленных рельсов I группы качества из непрерывнолитых заготовок / Д. К. Нестеров [и др.] // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 1991. – №4. – С. 47-49.

77. Резинкова, Н. Н. Рельсы из НЛЗ / Н. Н. Резинкова, В. С. Пасько, Ю. А. Восковец // Путь и путевое хозяйство. – 1993. – №9. – С. 22.

78. Улучшение качества железнодорожных рельсов из электростали / А. И. Катунин [и др.] // Metallург. – 1998. – №7. – С. 31-32.

79. Анализ формоизменения осевой пористости при универсальной прокатке рельсов в зависимости от схемы деформации рельсов в черновых калибрах / В. В. Дорофеев [и др.] // Сталь. – 2012. – №11. – С. 32-35.

80. Головатенко, А. В. Анализ экспериментальной зависимости сопротивления деформации рельсовой стали Э76ХСФ от температуры, скорости и степени деформации / А. В. Головатенко [и др.] // Metallург. – 2014. – №6. – С. 118-123.

81. Головатенко, А.В. Исследование сопротивления деформации рельсовой стали Э78ХСФ при различных условиях прокатки / А. В. Головатенко, В. Н. Кадыков, А. А. Уманский // Вестник горно-металлургической секции российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. – Москва-Новокузнецк, 2014. – Вып. 33. – С. 64-71.

82. Уманский, А. А. Исследование влияния химического состава и термомеханических условий прокатки рельсовой стали Э78ХСФ на

сопротивление деформации / А. А. Уманский, А. В. Головатенко, В. Н. Кадыков // Актуальные проблемы современного машиностроения: сб. тр. Международной научно-практической конференции – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – С. 347-352.

83. Кнотек, М. Анализ металлургических процессов методами математической статистики / М. Кнотек, Р. Войта, И. Шефц – М.: Металлургия, 1968. – 212 с.

84. Регрессионный анализ качества сталей и сплавов / Ю. Н. Ефимычев [и др.] – М.: Металлургия, 1976. – 224 с.

85. Статистическое описание промышленных объектов / В. П. Бородюк [и др.] – М.: Энергия, 1971.

86. Налимов, В. В. Статистические методы описания химических и металлургических процессов / В. В. Налимов – М.: Металлургиздат, 1963. – 50 с. с ил.

87. Лукомский, Я. И. Теория корреляции и её применение к анализу производства / Я. И. Лукомский – М.: Госстатиздат, 1961. – 338 с. с ил.

88. Пустыльник, Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е. И. Пустыльник – М.: Наука, 1968. – 288 с. с ил.

89. Уманский, А. А. Исследование процессов формирования качества металлопродукции ответственного назначения на переделе сталь-прокат / А. А. Уманский // Фундаментальные исследования. – 2014. – №8 – Ч.2 – С. 335-339.

90. Влияние технологических факторов прокатного производства на дефектность заготовок сортамента обжимных цехов комбината «Криворожсталь» / В. Г. Писаренко [и др.] // Производство проката – 2004. – №10. – С. 27–32.

91. Suzuki, H. // Testu to hagane. J.I.S.I. Japan, 1981. – V. 67. – №4. – P. 166.

92. Голубцов, В.А. Теория и практика введения добавок в сталь вне печи / В. А. Голубцов – Челябинск, 2006. – 423 с.

93. Уманский, А. А. Анализ и разработка универсальной математической модели расчета сопротивления деформации рельсовой стали Э78ХСФ при прокатке / А. А. Уманский, А. В. Головатенко, В. Н. Кадыков // Теоретические и прикладные аспекты современной науки. Сборник научных трудов по материалам IV Международной научно-практической конференции. – Белгород: ИП Петрова М.Г., 2014. – Ч. I. – С. 182-187.

94. Уманский, А. А. Разработка методики прогнозирования сопротивления деформации рельсовой стали при изменяющихся условиях прокатки / А. А. Уманский, А. В. Головатенко, В. Н. Кадыков // Инновации в материаловедении и металлургии. Материалы IV Международной интерактивной научно-практической конференции. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – С. 199-202.

95. Уманский, А. А. Исследование влияния химического состава рельсовой стали на сопротивление деформации при прокатке / А. А. Уманский, А. В. Головатенко, В. Н. Кадыков // Вестник горно-металлургической секции российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. – Москва-Новокузнецк, 2015. – Вып. 35. – С. 52-59.

96. Ввод в эксплуатацию универсального рельсобалочного стана и освоение технологии производства рельсов на современном оборудовании в рельсобалочном цехе АО «ЕВРАЗ ЗСМК» / А. В. Головатенко [и др.] // Черная металлургия. – 2014. – №6 (1374). – С. 32-38.

97. Полевой, Е. В. Совершенствование технологии производства рельсов на АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» / Е. В. Полевой, К. В. Волков, А. В. Головатенко, О. П. Атконова, А. М. Юнусов // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2013. – №4. – С. 26-28.

98. Развитие технологии прокатки и процессов калибровки железнодорожных рельсов / А. В. Головатенко [и др.] // Производство проката. – 2014. – №2. – С. 25-39.

99. Повышение качества железнодорожных рельсов при прокатке за счет усовершенствования системы черновых калибров в условиях нового универсального рельсопрокатного стана ЕВРАЗ ЗСМК / А.В. Головатенко [и др.] // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений (по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» 7-9 октября 2014 г.): Сборник научных докладов – Екатеринбург: ОАО «УИМ», 2015. – С. 201-210.

100. Головатенко, А. В. Исследование энергосиловых параметров прокатки в клетях универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК» с целью совершенствования режимов прокатки / А. В. Головатенко, В. Н. Кадыков, А. А. Уманский // Вестник горно-металлургической секции российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. – Москва-Новокузнецк, 2014. – Вып. 33. – С. 72-77.

101. Технические и технологические особенности освоения прокатки рельсовых профилей на новом рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК» / А.В. Головатенко [и др.] // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений (по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» 25-27 октября 2013 г.): Сборник научных докладов – Екатеринбург: АО «УИМ», 2014. – С. 75-92.

102. Головатенко, А. В. Разработка и совершенствование режимов прокатки длинномерных железнодорожных рельсов на универсальном рельсобалочном стане / А. В. Головатенко, А. А. Уманский, В. Н. Кадыков // Вестник горно-металлургической секции российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. – Москва-Новокузнецк, 2015. – Вып. 35. – С. 43-51.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

## Акт использования результатов диссертационной работы



Утверждаю:

Управляющий директор  
АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Юрьев А.Б.

2015 г.

Акт

использования результатов диссертационной работы  
Головатенко Алексея Валерьевича «Исследование и разработка  
энергоэффективных режимов прокатки  
длинномерных железнодорожных рельсов на  
универсальном рельсобалочном стане»

Настоящим актом подтверждается, что по результатам выполнения исследований в рамках диссертационной работы Головатенко А.В. в рельсобалочном цехе АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК») разработан новый эффективный режим прокатки рельсов типа Р65, включая новую калибровку прокатных валов.

Основными отличительными особенностями разработанного режима прокатки являются:

1. Уменьшение количества проходов во второй обжимной клетке (BD2) с 5 до 3 при неизменном количестве проходов в первой обжимной клетке (BD1).
2. Перенос калибра «стоячая трапеция» с клетки BD2 на клетку BD1.
3. Замена балочных калибров клетки BD2 на косорасположенные рельсовые калибры с уклонами боковых стенок до 18% и использованием упорных конусов с уклонами 25% для осевой фиксации ручьев калибров при прокатке.

Указанные изменения позволили:

1. Снизить удельный расход электроэнергии при производстве рельсов на 0,51 кВт·ч/т.
2. Уменьшить отбраковку рельсов Р65 по поверхностным дефектам («плен», «отпечаток») на 0,5 абс. %.
3. Снизить удельный расход прокатных валков клетки BD2 с 1,41 кг/т до 0,90 кг/т.
4. Уменьшить такт прокатки на обжимных клетках на 10 сек., что привело к увеличению производительности стана при производстве рельсов до 146,8 т/ч.
5. Увеличить межремонтный объем проката с 3,5 до 6,0 тыс. т.


Новая технология прокатки рельсов используется в рельсобалочном цехе АО «ЕВРАЗ ЗСМК» с июня 2014 г., что позволило получить экономический эффект в размере 98,588 млн. руб., при долевом участии автора 30% или 29,576 млн. руб.


Начальник технического отдела  
рельсового производства

Е.П. Кузнецов



## Расчет экономического эффекта от использования результатов диссертационной работы





Утверждаю:  
Управляющий директор  
АО «ЕВРАЗ ЗСМК»  
Юрьев А.Б.  
« 19 » 11 2015 г.

**Расчет  
экономического эффекта от использования  
результатов диссертационной работы  
Головатенко Алексея Валерьевича  
на рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК»**

Экономический эффект от внедрения нового режима прокатки рельсов Р65, разработанного в ходе проведения диссертационного исследования А.В. Головатенко, рассчитан за счет уменьшения удельных затрат электроэнергии на производство рельсов, снижения отбраковки рельсов Р65 по поверхностным дефектам и уменьшения удельного расхода прокатных валков второй обжимной клетки BD2.

1. Экономический эффект от снижения расхода электроэнергии:

$$\mathcal{E}_1 = \Delta P_{\mathcal{E}} \times \Pi_{P65} \times C_{\mathcal{E}},$$

где  $\Delta P_{\mathcal{E}}$  – снижение удельного расхода электроэнергии, кВт·ч/т;  
 $\Pi_{P65}$  – объем производства рельсов Р65 всех категорий, т;  
 $C_{\mathcal{E}}$  – цена электроэнергии, руб/кВт·ч.

$$\mathcal{E}_1 = 0,51 \times 631174 \times 1,66 = 0,534 \text{ млн. руб.}$$

2. Экономический эффект от уменьшения отбраковки рельсов Р65:

$$\mathcal{E}_2 = \Pi_{ДТ350} \times \frac{\Delta Бр}{100} \times (C_{ДТ350} - C_{л}),$$

где  $\Pi_{ДТ350}$  – объем производства рельсов Р65 категории ДТ 350, т;  
 $\Delta Бр$  – снижение отбраковки рельсов Р65 категории ДТ 350, %;  
 $C_{ДТ350}$  – себестоимость производства рельсов Р65 категории ДТ 350, руб/т;  
 $C_{л}$  – цена металлолома, руб/т.

$$\mathcal{E}_2 = 527127,2 \times \frac{0,5}{100} \times (24801,05 - 9582,00) = 40,112 \text{ млн. руб.}$$

3. Экономический эффект от снижения расхода прокатных валков клетки BD2:

■ Акционерное общество «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» ■ ш. Космическое, д. 16,  
г. Новокузнецк, Кемеровская область, Россия, 654043 ■ тел. (3843) 59-59-00, факс (3843) 59-43-43 ■ e-mail zsmk@zsmk.ru  
■ ОГРН 1024201670020, ОКПО 05757676, ИНН/КПП 4218000951/997550001 ■ www.zsmk.ru



$$\mathcal{E}_3 = \Pi_{P65} \times C_B \times (P_{B1} - P_{B2})$$

где  $\Pi_{P65}$  – объем производства рельсов Р65 всех категорий, т;

$C_B$  – цена прокатных валков, руб/т;

$P_{B1}$  и  $P_{B2}$  – удельный расход прокатных валков на клети BD2 до и после внедрения нового режима прокатки соответственно, т/т;

$$\mathcal{E}_3 = 631174 \times 180000 \times (0,00141 - 0,0009) = 57,942 \text{ млн.руб.}$$

Суммарный экономический эффект составит:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 = 0,534 + 40,112 + 57,942 = 98,588 \text{ млн.руб.}$$

Начальник технического отдела  
рельсового производства

Е.П. Кузнецов

## Приложение В

## Справка о внедрении в учебный процесс результатов диссертационной работы

Утверждаю:  
Проректор по учебной работе  
– первый проректор  
к.т.н., доцент  
А.В. Феоктистов



« 02 » 12 2015 г.

**Справка**  
о внедрении в учебный процесс  
результатов диссертационной работы  
соискателя Головатенко Алексея Валерьевича

Результаты диссертационного исследования А.В. Головатенко внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет» и используется при подготовке бакалавров по направлению подготовки 150400.62 Metallurgy, profile «Processing of metals by pressure». Obtained by the author new scientific data on the influence of thermomechanical parameters of rolling and chemical composition of rail steels on resistance to deformation are used in the conduct of lecture and practical classes in the discipline «Theory of metal processing by pressure»; developed methodology of calculation of resistance to deformation of rail steels, as well as obtained data on the influence of rolling regimes on quality indicators of long-section railway rails are used in the conduct of lecture and practical classes in the discipline «Technology of rolling production». Implementation in the educational process is conducted on the basis of the decision of the department «Processing of metals by pressure and metal science. EVRAZ ZSMK», protocol No 1 of 25.08.2015 g.

Начальник учебно-методического  
управления,  
к.т.н., доцент



О.Г. Приходько

Заведующий кафедрой  
«Обработка металлов давлением  
и металловедение. EVRAZ ZSMK»,  
д.т.н., доцент



А.Р. Фастыковский