

На правах рукописи



СИМАЧЕВ АРТЕМ СЕРГЕЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ
НЕПРЕРЫВНО-ЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ РЕЛЬСОВОЙ
ЭЛЕКТРОСТАЛИ И ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ
СВОЙСТВ РЕЛЬСОВ НА ОСНОВЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

Специальность: 05.16.01 – Metalловедение и термическая обработка
металлов и сплавов

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Новокузнецк, 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Научный руководитель: Осколкова Татьяна Николаевна,
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Черняк Саул Самуилович,
доктор технических наук, профессор кафедры
«Автоматизация производственных процессов»,
ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет
путей сообщения», г. Иркутск

Ефимов Олег Юрьевич,
доктор технических наук,
ООО «Проммест», г. Новокузнецк,
директор

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Липецкий государственный техниче-
ский университет», г. Липецк

Защита состоится «19» декабря 2017 г. в 10.00 в аудитории ЗП на заседании
диссертационного совета Д 212.252.01 при Сибирском государственном индуст-
риальном университете по адресу: 654007, Кемеровская область, г. Новокузнецк,
ул. Кирова, 42, СибГИУ.
Факс (3843) 46-57-92.
E-mail: ds21225201@sibsiu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»

Автореферат разослан « » 2017 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д 212.252.01,
д.т.н., профессор

Нохрина Ольга Ивановна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Мировое производство рельсовой продукции составляет 10 – 12 млн. тонн ежегодно. Непрерывно возрастающая интенсивность использования железных дорог приводит к необходимости создания новых рельсовых сталей и совершенствования технологий их производства, обеспечивающих повышение надежности рельсов, контактно-усталостной прочности, вязкости разрушения и живучести, ликвидации случаев хрупкого разрушения в пути.

В этой связи повышение качества рельсовой продукции и улучшение ее эксплуатационных свойств посредством совершенствования температурных режимов термомеханической обработки стали, нагрева непрерывно-литых заготовок (НЛЗ) и прокатки рельсов является актуальной научно-практической задачей. При производстве рельсов из НЛЗ особенно важно обеспечить необходимую технологическую пластичность стали при высоких температурах и создать благоприятные условия для интенсивной проработки в процессе пластической деформации всех зон по сечению заготовки. Формирование максимальной технологической пластичности рельсовой стали, посредством реализации рациональных температурных режимов нагрева и прокатки, является эффективным направлением энерго- и ресурсосбережения, способствующим повышению качества рельсов.

Степень разработанности темы исследования.

Значительный объем теоретических и экспериментальных исследований высокотемпературной пластичности в России и за рубежом проведен по сталям мартеновского производства (с ориентацией на прокатку рельсов из слитков), которые в настоящее время фактически не используются при производстве рельсовой продукции. Критический анализ состояния проблемы разработки энергоэффективных режимов термомеханической обработки, нагрева и прокатки на основе максимального использования ресурса технологической (высокотемпературной) пластичности металла позволяет заключить, что недостаточно изученными остаются вопросы, связанные с влиянием микро-, макроструктуры, неметаллических включений на высокотемпературную пластичность в различных зонах по сечению НЛЗ рельсовых сталей текущего производства.

Работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» (СибГИУ); в рамках плана научно-исследовательских работ с ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» рег. № 114090172212 (2014 г.).

Цель работы. Разработка ресурсосберегающих температурных режимов нагрева и прокатки, основанных на эффективном использовании технологической пластичности стали, обеспечивающих производство железнодорожных рельсов с повышенным уровнем ударной вязкости.

Для достижения цели работы были сформулированы следующие **задачи**:

1. Определение интервала температур максимальной пластичности рельсовых сталей марок Э76Ф, Э76ХФ, Э90ХАФ в различных зонах по сечению непрерывно-литых заготовок.

2. Исследование химического и фазового состава неметаллических включений в различных зонах по сечению непрерывно-литых заготовок рельсовых сталей марок Э76Ф, Э76ХФ, Э90ХАФ.

3. Исследование и научное обоснование механизмов влияния структуры и неметаллических включений на высокотемпературную пластичность рельсовых сталей в различных зонах по сечению непрерывно-литых заготовок.

4. Определение рационального температурного режима нагрева непрерывно-литых заготовок и прокатки рельсов, обеспечивающего повышение показателей ударной вязкости сталей марок Э76Ф, Э76ХФ, Э90ХАФ.

5. Разработка рекомендаций по совершенствованию температурного режима нагрева непрерывно-литых заготовок в методической печи с шагающими балками и прокатки рельсов с целью максимального использования ресурса пластичности рельсовых сталей марок Э76Ф, Э76ХФ, Э90ХАФ.

Научная новизна.

1. Выявлены и научно обоснованы новые закономерности и механизмы влияния температуры, химического состава стали, неметаллических включений, микро- и макроструктуры металла на технологическую пластичность рельсовых сталей марок Э76Ф, Э76ХФ, Э90ХАФ в различных зонах по сечению непрерывно-литых заготовок.

2. Установлено, что основными неметаллическими включениями в корковой зоне непрерывно-литых заготовок рельсовых сталей марок Э76Ф, Э76ХФ, Э90ХАФ являются оксиды точечные и нитриды алюминия, в зоне столбчатых кристаллов – оксиды точечные и силикаты, а в центральной зоне непрерывно-литого слитка – силикаты, оксиды точечные, сульфиды.

3. Определены интервалы температур максимальной пластичности рельсовых сталей марок Э76Ф, Э76ХФ, Э90ХАФ, позволяющие рационально использовать данные показатели в производственных условиях.

4. Разработан и научно обоснован ресурсосберегающий температурный режим нагрева непрерывно-литых заготовок и прокатки рельсов, основанный на эффективном использовании технологической пластичности металла, обеспечивающий повышение ударной вязкости рельсовой стали.

Практическая значимость и реализация результатов работы.

1. Для практического использования получены эмпирические зависимости влияния температуры на технологическую пластичность металла непрерывно-литых заготовок рельсовых сталей марок Э76Ф, Э76ХФ, Э90ХАФ.

2. В целях совершенствования технологий производства и повышения металлургического качества металла установлены виды, морфология, химический и фазовый составы неметаллических включений в различных зонах по сечению непрерывно-литых заготовок рельсовых сталей марок Э76Ф, Э76ХФ, Э90ХАФ.

3. Ресурсосберегающий температурный режим нагрева и прокатки рельсов, основанный на эффективном использовании технологической пластичности металла, апробированный в условиях рельсобалочного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК», обеспечил увеличение значения ударной вязкости рельсовой стали на 20 %. Совокупный экономический эффект от внедрения результатов работы, основанный

на снижении доли несоответствующей продукции и экономии природного газа составил 6,3 млн. рублей в год.

4. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе в Сибирском государственном индустриальном университете при подготовке магистров по направлению 22.04.02 – «Металлургия».

Внедрение результатов работы в производство и учебный процесс подтверждается соответствующими актами о внедрении.

Методология и методы исследования.

Экспериментальные исследования проводились на оборудовании Центров коллективного пользования «Материаловедение» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» и ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» с использованием установки для испытаний на высокотемпературное кручение, оптической металлографии (микроскопы *OLIMPUS – GX 51 F* и ЛабоМет – И1), растровой электронной микроскопии (микроскоп «*Philips SEM 515*», оснащённый микроанализатором *EDAX Genesis*), сканирующей электронной микроскопии (микроскоп *TESCAN MIRA 3 LMH* с автоэмиссионным катодом Шоттки), рентгенографии (рентгеновского дифрактометра ДРОН 2,0 с железным K_{α} - излучением).

Положения, выносимые на защиту.

1. Результаты экспериментальных исследований высокотемпературной пластичности рельсовых сталей марок Э76Ф, Э76ХФ, Э90ХАФ в различных зонах по сечению непрерывно-литой заготовки.

2. Результаты исследований химического и фазового состава неметаллических включений в различных зонах по сечению непрерывно-литых заготовок рельсовых сталей.

3. Закономерности влияния температуры, микро- и макроструктуры металла, неметаллических включений на технологическую (высокотемпературную) пластичность рельсовых сталей марок Э76Ф, Э76ХФ, Э90ХАФ.

4. Ресурсосберегающий температурный режим нагрева и прокатки рельсов, основанный на эффективном использовании технологической пластичности металла, обеспечивающий увеличение значения ударной вязкости рельсовой стали.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов» по п. 3 «Теоретические и экспериментальные исследования влияния структуры (типа, количества и характера распределения дефектов кристаллического строения) на физические, химические, механические, технологические и эксплуатационные свойства металлов и сплавов», п. 4 «Теоретические и экспериментальные исследования термических, термоупругих, термопластических, термохимических, термомагнитных, радиационных, акустических и других воздействий изменения структурного состояния и свойств металлов и сплавов», п. 6 «Разработка новых и совершенствование существующих технологических процессов объемной и поверхностной термической, химико-термической, термомеханической и других

видов обработок, связанных с термическим воздействием, а также специализированного оборудования».

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается комплексным подходом решения поставленных задач, применением апробированных методов и аттестованных технических средств; сопоставлением литературных данных с результатами экспериментов, а также оценкой погрешности эксперимента статистическими методами и внедрением технологии в производство.

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: III Всероссийской научно-практической конференции. «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (Екатеринбург, 2014); Международная конференция «Фундаментальные исследования» (Доминиканская республика, 2014); Международная конференция «Технические науки и современное производство» (Швейцария, Цюрих-Берн, 2014); Международная конференция «Технические науки и современное производство» (Канарские острова, 2014); Всероссийская научная конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Новокузнецк, 2014); XII Международная научно-техническая конференция (Пенза, 2014); XI Международная научно-практическая конференция «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации» (Курск, 2014); XXV заочная научной конференции Research Journal of International Studies (Екатеринбург, 2014); IV Международная научно-практическая конференция «Современные инновации в науке и технике» (Курск, 2014); XVIII Всероссийская научно-практическая конференция «Металлургия: технологии, управление, инновации, качество» (Новокузнецк, 2014); Международная молодежная научно-практическая конференция «Прогрессивные технологии и процессы» (Курск, 2014).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 18 печатных работ, в том числе 4 в журналах, рекомендованных ВАК для опубликования результатов кандидатских диссертаций, 2 – в иностранных журналах, индексируемых в базе данных Scopus и Web of Science.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, приложений и изложена на 148 страницах машинописного текста, содержит 78 рисунков, 17 таблиц, список литературы из 162 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, отражена степень ее разработанности, методология и методы исследования, степень достоверности и апробация результатов; сформулированы: цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы; изложены положения, выносимые на защиту.

В первом разделе «Современное состояние научной проблемы высокотемпературной пластичности непрерывно-литых заготовок рельсовых сталей и постановка задач исследования» представлен аналитический обзор литературы по исследуемой проблеме. Анализ состояния проблемы высокотемпера-

турной пластичности различных сталей свидетельствует об интенсивной работе учёных в направлении изучения пластической деформации при высоких температурах и факторах, влияющих на этот процесс.

На основании анализа специальной технической литературы установлено, что технологическая (высокотемпературная) пластичность изучается для большой группы сталей и сплавов, основными показателями которой служат скорость и время нагрева, напрямую оказывающих влияние на значения степени деформации сдвига. Однако, в большинстве случаев испытания проведены для мартеновской стали, разлитой в изложницы. В то же время хорошо известно, что пластичность является свойством весьма чувствительным не только к химическому составу, температуре, скорости деформации и напряженному состоянию, но и параметрам структуры и некоторым характеристикам (например, виду, фазовому составу, форме неметаллических включений), которые определяются технологией выплавки, внепечной обработки, раскисления, разливки и т.п.

В настоящее время изучение макроструктуры рельсовой электростали проводится на образцах, вырезанных из непрерывно-литой заготовки хаотичным образом, либо только из центральной зоны.

Проведенный анализ литературных данных состояния проблемы свидетельствует об отсутствии информации влияния температуры, времени выдержки, видов неметаллических включений современных рельсовых электросталей на показатели пластичности по всем зонам НЛЗ.

Во втором разделе «Исследование высокотемпературной пластичности зон кристаллизации непрерывно-литой заготовки рельсовых сталей» в соответствии с целями и задачами, поставленными в работе, для исследований был выбран метод, позволяющий получить наиболее полную картину о высокотемпературной пластичности НЛЗ исследуемых рельсовых сталей марок Э76Ф, Э76ХФ и Э90ХАФ – высокотемпературное кручение. Выбор данного способа испытаний основывается на том, что в сравнении с другими видами механических испытаний представляется возможность дифференцировать разрушение металла, перед которым наблюдается максимум пластичности.

Для испытаний использовались образцы, вырезанные из разных зон (корковой, столбчатых кристаллов и центральной) вдоль слитка НЛЗ из сталей марок Э76Ф, Э76ХФ и Э90ХАФ (рисунок 1), химический состав которых соответствует ГОСТ 51685-2013.

Исходя из двухстороннего нагрева в печи сопротивления, время выдержки выбиралось из расчета $(0,83 \div 2,5)$ минуты на 1 мм сечения, что соответствует реальным значениям выдержки НЛЗ в производственных условиях.

Образцы из стали марки Э76Ф нагревали до температур 950, 1050, 1150, 1250 °С и выдерживались в течение 5, 10 и 15 минут при этих температурах, затем производилось кручение со скоростью, приближенной к скорости прокатки рельсобалочного производства, ~ 60 об/мин до излома. Стали марок Э76ХФ и Э90ХАФ нагревали в интервале от 900 через каждые 50 °С до 1200 °С, выдерживали в течение 10 минут.

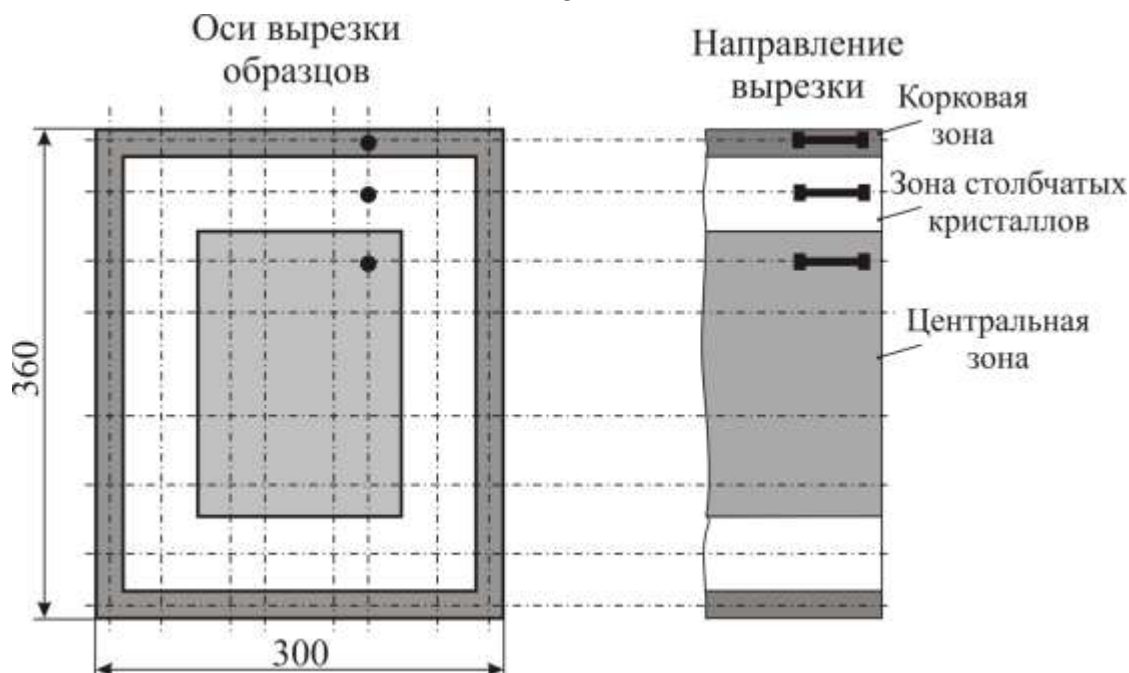


Рисунок 1 – Схема вырезки образцов из зон НЛЗ рельсовых сталей для испытаний на высокотемпературное кручение

Работа на установке (рисунок 2) для исследования технологической (высокотемпературной) пластичности металлов и сплавов проводилась следующим образом: образец (11) устанавливался в пазы неподвижного (9) и вращающегося (7) валов, захваты которых находятся в печи сопротивления (2). Печь предварительно разогревалась силистовыми нагревателями (5), находящимися на поду и крышке, до температуры испытаний. После загрузки образцы выдерживались при исследуемых температурах. Электродвигателем (12) типа ПБСТ мощностью 2,3 кВт с тиристорным приводом ПТЗР приводился в движение вращающийся вал, скорость которого 60 об/мин. После излома образца, с помощью груза (14), который привязан к фиксирующему винту неподвижного вала, размыкался контакт (13), останавливающий электродвигатель. Количество оборотов до излома образца измерялось на механическом фиксаторе (6). Контроль температуры осуществлялся термопарой ТХА с помощью прибора «ОВЕН» ТРМ 138-Р-ИП с разрешающей способностью 1 °С и пределом основной приведенной погрешности 0,25 %.

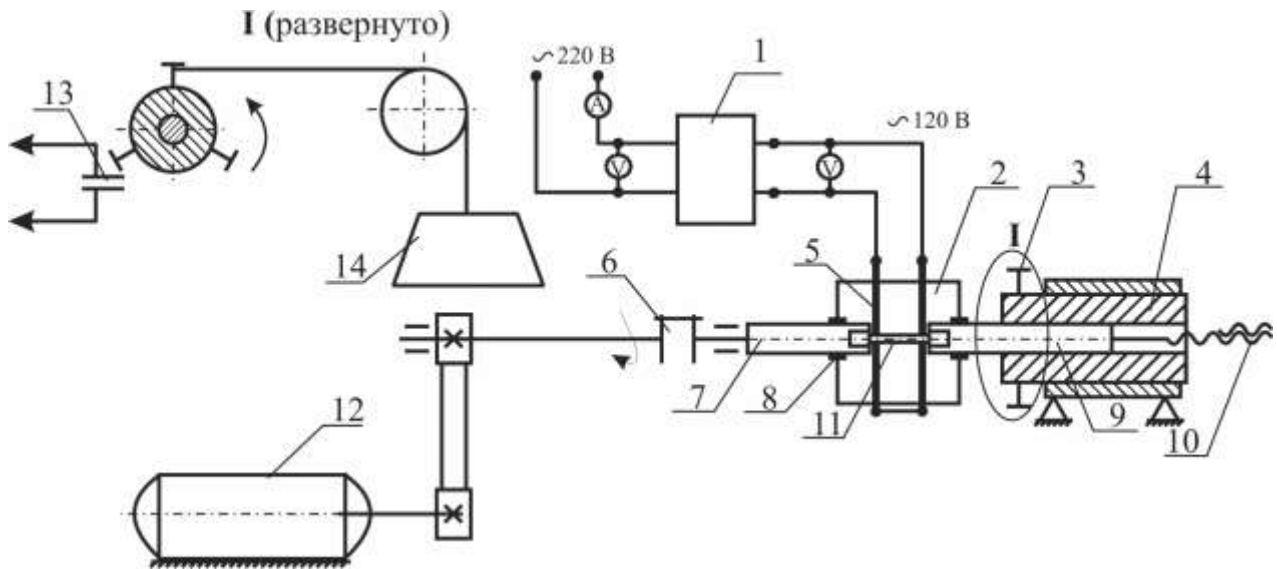
Полученное количество оборотов до излома переводилось в критерий пластичности (степень деформации сдвига) по формуле:

$$\Lambda_p = \gamma = \frac{\pi d_0 Z}{l_0}, \quad (1)$$

где d_0 и l_0 – рабочий диаметр и рабочая длина образца, мм;
 Z – количество оборотов до разрушения.

Результаты при пересчете в показатель пластичности с учетом всех параметров образцов показали постепенное увеличение степени деформации сдвига до температуры 1150 °С при всех выдержках. Дальнейшее повышение температуры испытаний приводит к снижению пластичности. Следует отметить, что

максимум пластичности выявлен при температуре 1150 °С и выдержке 10 минут (рисунок 3).



1 – трансформатор; 2 – печь; 3 – стопорный винт; 4 – корпус для неподвижного вала;
5 – силовые нагреватели; 6 – фиксатор количества оборотов;
7 – вращающийся вал; 8 – огнеупорное уплотнение; 9 – неподвижный вал;
10 – винт-гайка; 11 – образец; 12 – электродвигатель; 13 – размыкающий контакт; 14 – груз.

Рисунок 2 – Схема установки для исследования высокотемпературной пластичности металлов и сплавов

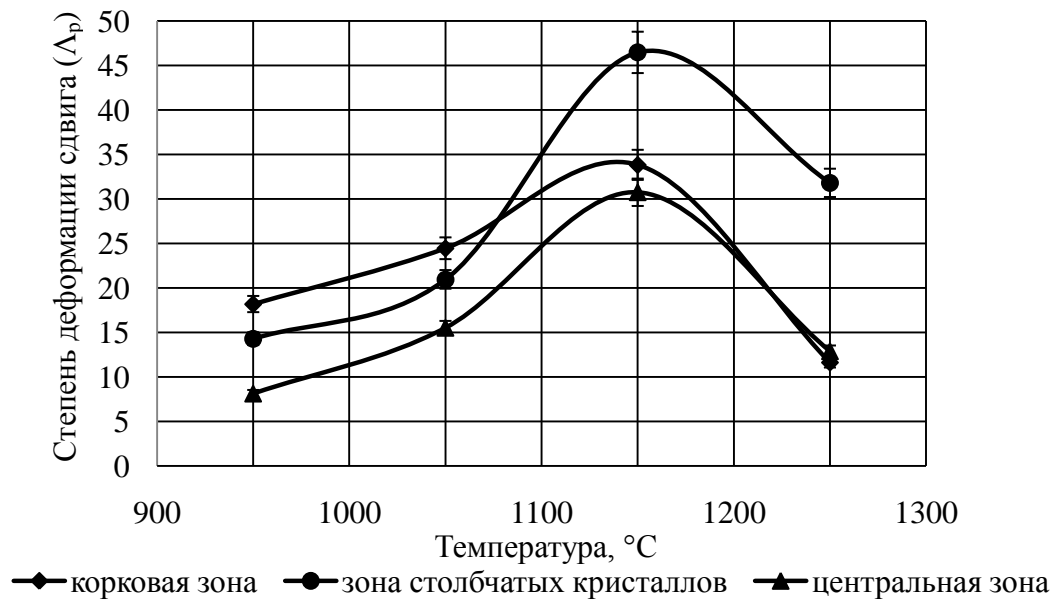


Рисунок 3 – Показатели критерия пластичности зон НЛЗ стали марки Э76Ф при нагреве и выдержке 10 минут

Пятиминутная выдержка показала самые низкие значения, что характеризуется недостаточным прогревом стали под пластическую деформацию. Выдержка образцов в течение 15 минут показывает самые высокие значения пластичности при температурах 950 °С и 1050 °С, но при 1150 °С её значения ниже, чем при выдержке 10 минут.

Тенденция изменения критерия пластичности во всех зонах НЛЗ стали марки Э76Ф одинаковая при всех выдержках, т.е. происходит постепенное увеличение степени деформации сдвига до температуры 1150 °С. Дальнейшее повышение температуры испытаний приводит к резкому снижению пластичности.

Экспериментально установлено, что у образцов, вырезанных из корковой зоны НЛЗ стали марки Э76ХФ, с увеличением температуры от 900 °С до 1025 °С критерий пластичности увеличивается (рисунок 4), после чего происходит его снижение из-за ещё нерастворившегося полностью в аустените легированного цементита ($(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Mn})_3\text{C}$), расположенного по границам зерен, который препятствует росту пластической деформации при температуре 1050 °С, поскольку имеет более высокую температуру растворения. Это подтверждается данными сканирующей электронной микроскопии (рисунок 5). Максимальное значение степени деформации сдвига наблюдается при температуре 1100 °С, дальнейшее увеличение температуры приводит к снижению критерия пластичности.

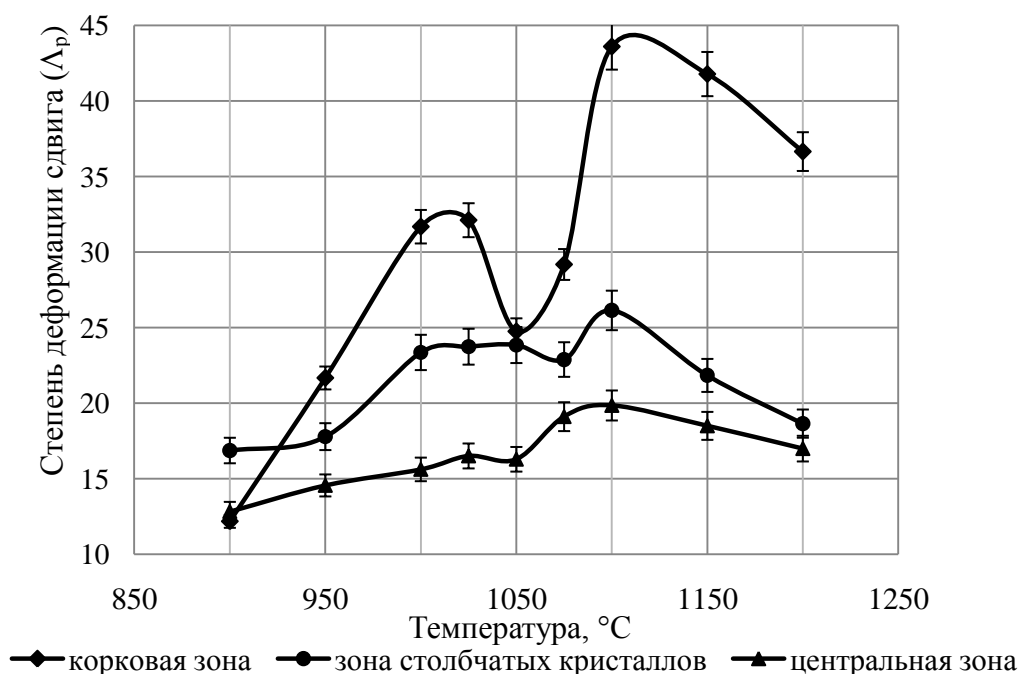


Рисунок 4 – Показатели критерия пластичности зон НЛЗ стали марки Э76ХФ при нагреве и выдержке 10 минут

При изучении высокотемпературной пластичности образцов, вырезанных из зоны столбчатых кристаллов НЛЗ рельсовой стали Э76ХФ, наблюдается (рисунок 4) постепенное увеличение степени деформации сдвига при повышении температуры испытаний от 900 °С до 1000 °С, после чего показания пластичности остаются практически неизменными до температуры 1075 °С, а затем наблюдается повышение критерия пластичности с максимальным значением при 1100 °С.

Установлено, что пластичность образцов из центральной зоны НЛЗ увеличивается до температуры 1025 °С, после чего практически не изменяется до 1050 °С, а затем происходит рост степени деформации сдвига с максимумом при 1100 °С (рисунок 4).

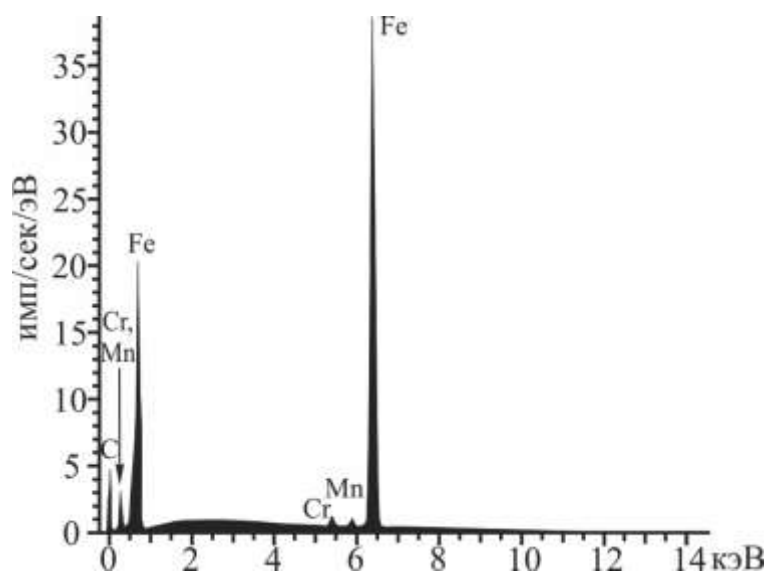


Рисунок 5 – Распределение элементов в карбидной фазе стали марки Э76ХФ

Следует отметить, что максимальные показания пластичности стали марки Э76ХФ наблюдаются в корковой зоне, а минимальные в центральной зоне. Наибольшие значения степени деформации сдвига во всех зонах НЛЗ отмечаются при температуре 1100 °С.

Исследования высокотемпературной пластичности корковой зоны НЛЗ стали марки Э90ХАФ показали, что с увеличением температуры от 900 °С до 950 °С критерий пластичности увеличивается, после чего до температуры 1050 °С показатели практически не изменяются. Максимальное значение степени деформации сдвига наблюдается при температуре 1100 °С, дальнейшее увеличение температуры до 1150 °С приводит к снижению критерия пластичности. В интервале температур 1150 – 1200 °С пластичность практически остается неизменной (рисунок 6).

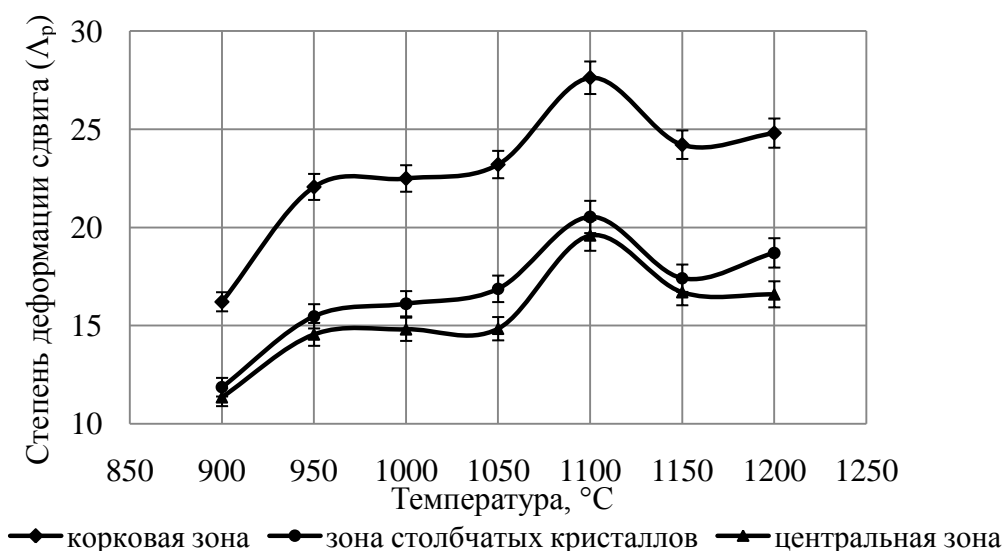


Рисунок 6 – Показатели критерия пластичности зон НЛЗ стали марки Э90ХАФ при нагреве и выдержке 10 минут

Результаты, полученные при изучении высокотемпературной пластичности образцов, вырезанных из зоны столбчатых кристаллов НЛЗ рельсовой стали Э90ХАФ, показывают, что степень деформации сдвига плавно увеличивается до температуры 950 °С, затем показатели практически не изменяются до температуры 1050 °С, начиная с данной температуры происходит увеличение показателей пластичности с максимумом при 1100 °С, дальнейшее увеличение температуры снижает степень деформации сдвига (рисунок 6).

Исследования центральной зоны НЛЗ стали марки Э90ХАФ на высокотемпературное кручение, показали, что кривая степени деформации сдвига аналогична кривой зоны столбчатых кристаллов. Отличительной особенностью являются более низкие показатели пластичности, связанные с повышенной пористостью и большим количеством неметаллических включений (рисунок 6).

Следует отметить, что при изучении высокотемпературной пластичности образцов всех трех зон НЛЗ стали марки Э90ХАФ максимум пластичности наблюдаются в корковой зоне, а минимальные в центральной зоне. Наибольшие значения степени деформации сдвига во всех зонах НЛЗ отмечаются при температуре 1100 °С.

При сопоставлении значений высокотемпературной пластичности всех вышеперечисленных марок сталей установлено, что у стали марки Э90ХАФ показатели пластичности наиболее низкие, связанные с химическим составом данной стали.

По результатам экспериментальных данных была определена количественная взаимосвязь между температурой деформации и степенью деформации сдвига при испытаниях образцов методом горячего кручения с использованием методики регрессионного анализа. При математической обработке экспериментальных данных получены уравнения регрессии.

В третьем разделе «Исследование влияния структуры и неметаллических включений на высокотемпературную пластичность» представлены результаты исследований влияния неметаллических включений и структуры вышеперечисленных сталей на высокотемпературную пластичность. Основными методами исследований структуры сталей в работе использовались оптическая металлография, сканирующая электронная микроскопия, рентгенографические исследования.

Определение видов неметаллических включений по зонам до пластической деформации во всех трех марках сталей производилось по ГОСТ 1778-70. В корковой зоне выявлены оксиды точечные (балл 1 а) и нитриды алюминия (балл 1 а). В зоне столбчатых кристаллов обнаружены оксиды точечные (балл 1 а, 2 а, 3 а), силикаты недеформирующиеся (балл 1 б), а в стали марки Э76ХФ дополнительно присутствуют сульфиды (балл 1 а). В образцах, вырезанных из центральной зоны НЛЗ, отмечается наличие оксидов точечных (балл 1 а, 2 а), силикатов недеформирующихся (балл 1 б, 3б, 4 б), сульфиды (балл 1 б, 1 а 3 а), в стали марки Э76Ф дополнительно выявлены силикаты хрупкие (балл № 3, 4), а в стали марки Э76ХФ – нитриды строчечные (балл 1 а).

Исследование неметаллических включений после высокотемпературного кручения производилось рентгенографически и с помощью растровой электронной микроскопии.

В стали марки Э76Ф в корковой зоне обнаружены оксиды состава $\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, незначительное количество силикатов железа ($\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$) и марганца ($\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$), которые имеют шаровидную форму. В зоне столбчатых кристаллов наблюдаются точечные оксиды Al_2O_3 , шпинель типа $\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ и оксисиликатные включения типа $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$. Исследование образцов центральной зоны выявило наличие сульфидов марганца (MnS), силикатов ($\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$, $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$) шпинели типа $\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (рисунок 7).

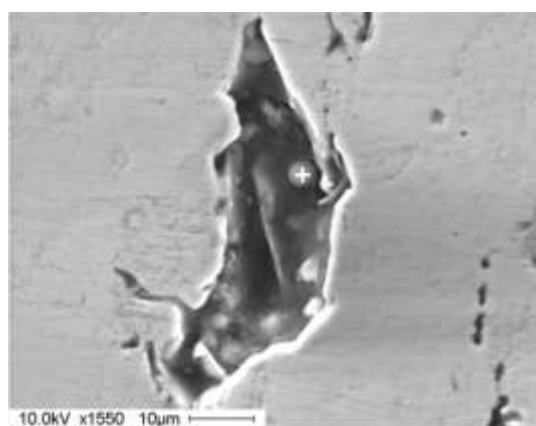
В электростали марки Э76ХФ в корковой зоне НЛЗ были выявлены алюмосиликаты ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) и оксиды алюминия (Al_2O_3), в зоне столбчатых кристаллов – алюмосиликаты ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$), шпинели типа $\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ и силикаты железа сферической формы ($\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$), что подтверждается рентгенографическим анализом (рисунок 8). В центральной зоне рентгенографически идентифицированы включения MnS и включения силикатного типа ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$; $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$).

При исследовании корковой зоны НЛЗ стали марки Э90ХАФ после высокотемпературной пластической деформации выявлено наличие силикатов железа ($\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$), оксидов алюминия (Al_2O_3), а также включения алюмосиликатов и нитридов алюминия. В зоне столбчатых кристаллов алюмосиликаты и силикаты железа. В центральной зоне выявлены сульфиды марганца (MnS), а также силикаты марганца, алюминия и железа (рисунок 9).

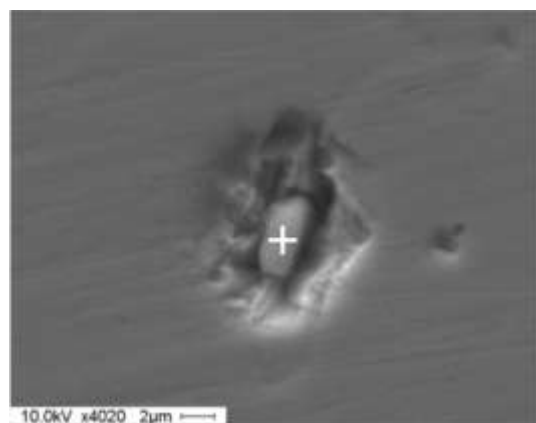
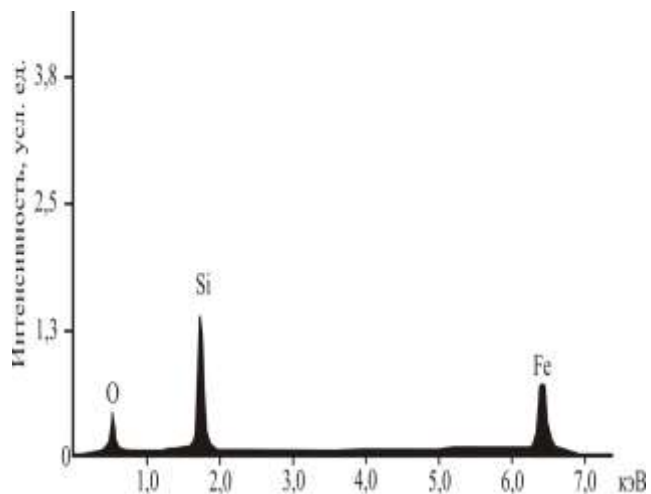
Присутствие неметаллических включений (особенно силикатного типа, а также шпинели типа $\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) может препятствовать пластической деформации и способствовать разрыву металла в местах залегания неметаллических включений, а также являться очагами контактно-усталостных разрушений при эксплуатации.

Металлографические исследования образцов стали марки Э76Ф после испытаний на высокотемпературное кручение в интервале температур 1050 – 1250 °С и охлаждения на воздухе выявили общую тенденцию в формировании структур в трёх зонах НЛЗ, заключающуюся в образовании двух слоёв: 1) полного и частичного поверхностного обезуглероживания ~ 0,2 – 1 мм; 2) слоя со структурой игольчатого феррита (видманшtedт) или ферритной сетки ~ 0,27 – 0,7 мм (рисунок 10, а), далее расположена структура основного металла. Размер зерна по ГОСТ 5639-82 при температуре 1050 °С – № 6...№ 7, при 1150 °С – № 5...№ 4, при 1250 °С – № 2...№ 1.

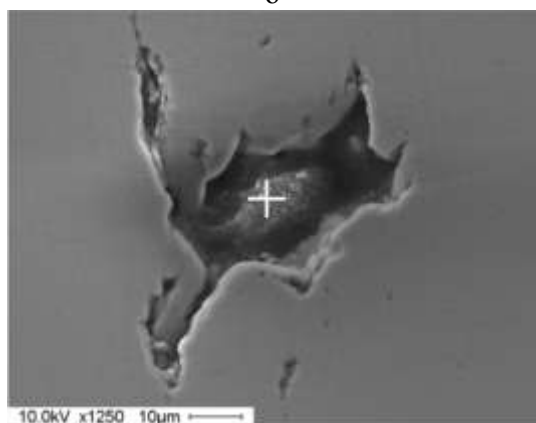
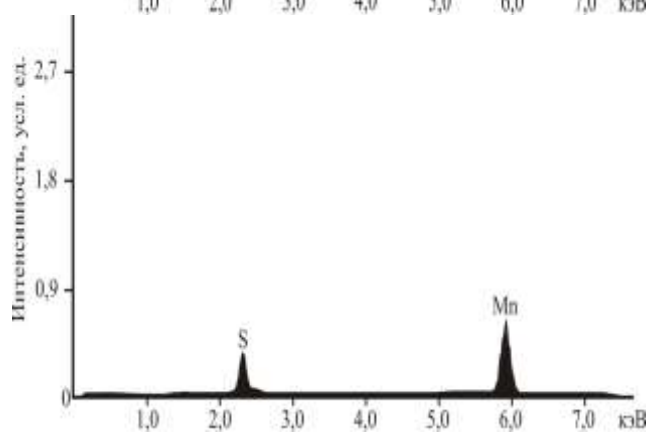
После изучения высокотемпературной пластичности при температурах 1050, 1100 и 1200 °С был проведен анализ микроструктур образцов из всех зон НЛЗ стали марки Э76ХФ (рисунок 10, б).



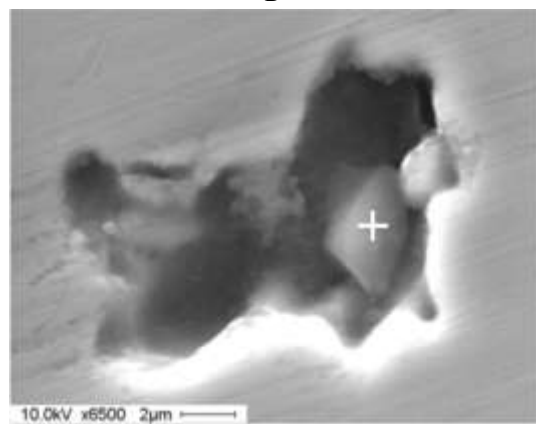
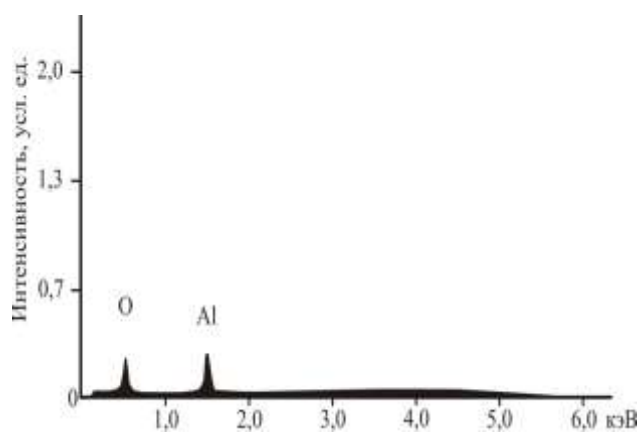
а



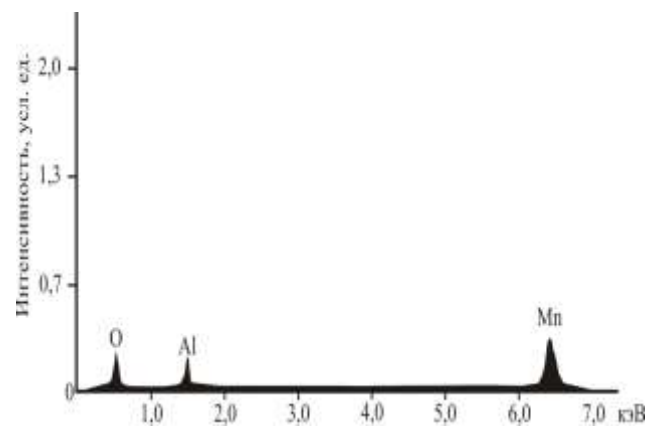
б



в



г



а – $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$, б – MnS ; в – Al_2O_3 ; г – $\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$

Рисунок 7 – Неметаллические включения НЛЗ стали марки Э76Ф

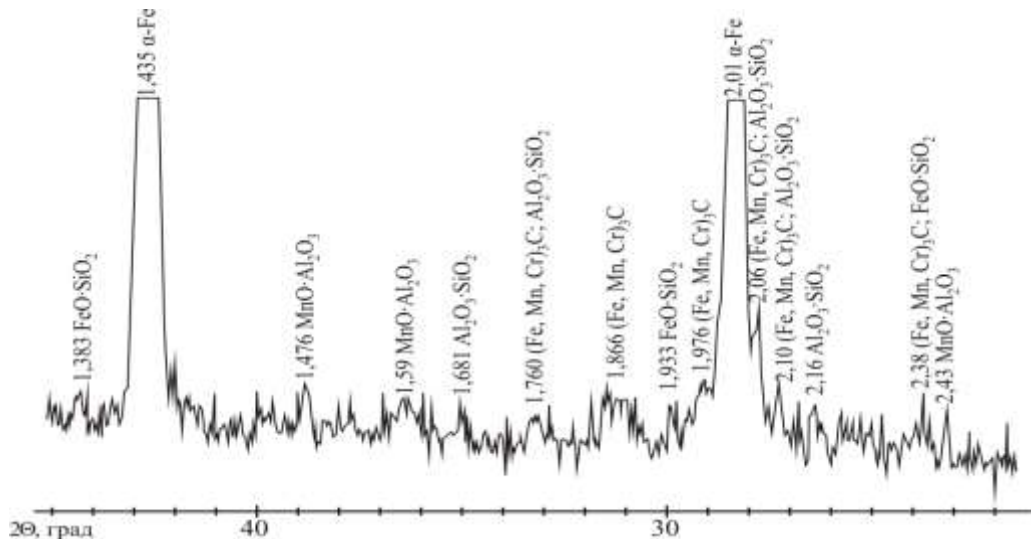


Рисунок 8 – Фрагмент дифрактограммы зоны столбчатых кристаллов НЛЗ стали марки Э76ХФ (съемка от центра образца)

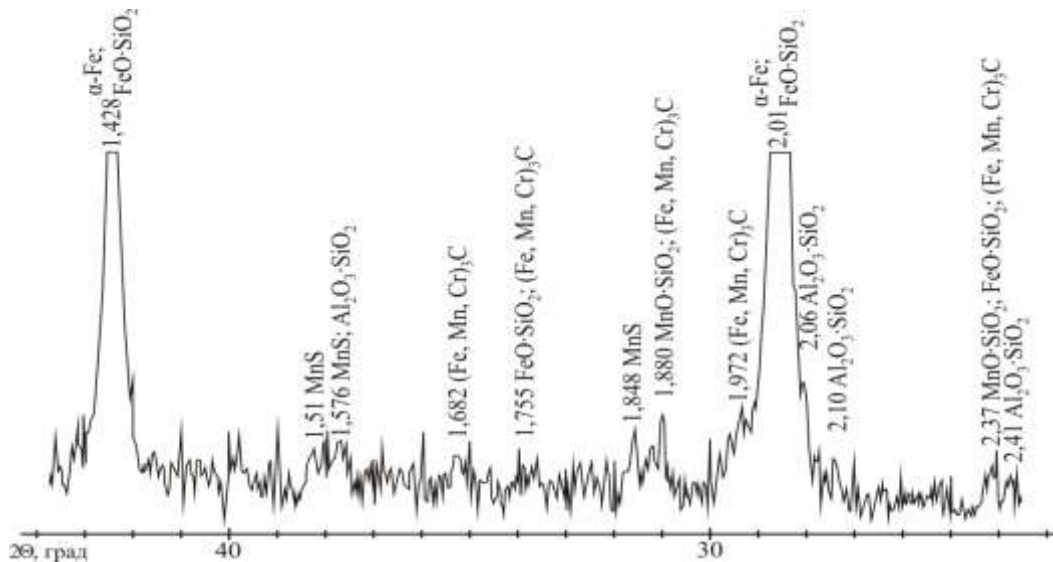
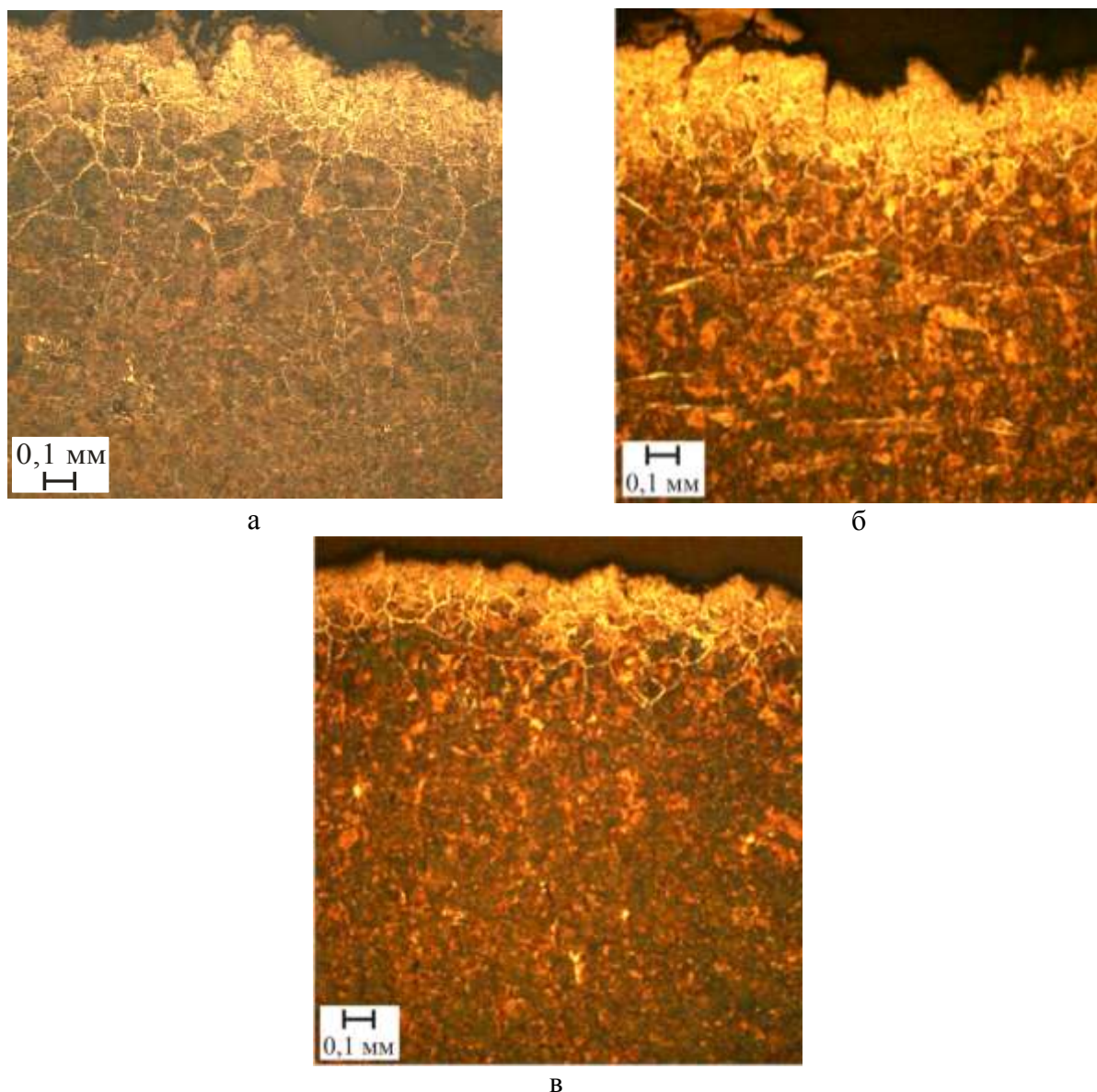


Рисунок 9 – Фрагмент дифрактограммы центральной зоны НЛЗ стали марки Э90ХАФ после высокотемпературного кручения (съемка от центра образца)

В процессе нагрева под обработку металлов давлением во всех образцах всех зон НЛЗ на поверхности образуется окалина, ниже которой располагается слой частичного обезуглероживания, под которым выявлена структура видманшtedт, плавно переходящая в структуру основного металла. В целом наблюдается постепенный рост зерна аустенита с увеличением температуры нагрева, тоже самое происходит и с величиной обезуглероженного слоя.

При сопоставлении результатов экспериментальных исследований сталей марок Э76Ф и Э76ХФ наблюдается положительное влияние микролегирования стали Э76Ф хромом. Известно, что легирование сталей ванадием и хромом даже в небольшом количестве приводит к измельчению зерна. В результате исследования выявлена тенденция к уменьшению среднего диаметра зерна стали марки Э76ХФ на 27 – 31 % по сравнению со сталью Э76Ф при высоких температурах (1050 – 1200 °С).



а – Э76Ф (1150 °С, корковая зона); б – Э76ХФ (1100 °С, корковая зона);
в – Э90ХАФ (1100 °С, корковая зона)

Рисунок 10 – Микроструктуры образцов корковой зоны НЛЗ рельсовых сталей после высокотемпературного кручения при различных температурах

Исследование величины обезуглероженного слоя, состоящего из полного и частичного обезуглероживания, сталей марок Э76Ф и Э76ХФ показало, что дополнительное микролегирование рельсовой стали хромом приводит к снижению глубины данного слоя во всех зонах НЛЗ при температурах кручения 1100 – 1200 °С на 4 – 10 %.

Вместе с тем, микролегирование хромом стали марки Э76Ф в количестве 0,4 %, выявило небольшое снижение высокотемпературной пластичности во всех трех зонах НЛЗ в интервале температур 1025 – 1075 °С, связанного, с не растворившимся полностью в аустените легированного цементита ($(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Cr})_3\text{C}$), что подтверждается сканирующей электронной микроскопией и рентгенографическими исследованиями (рисунок 5).

После изучения высокотемпературной пластичности при температурах испытаний 1050, 1100 и 1200 °С был проведен анализ микроструктур образцов из

всех зон НЛЗ стали марки Э90ХАФ (рисунок 10, в). Следует отметить ту же тенденцию в увеличении величины зерна и глубины обезуглероженного слоя, что и у стали марки Э76ХФ, однако, у стали марки Э90ХАФ рост зерна и процесс обезуглероживания наблюдается в большей степени.

В четвертом разделе «Рекомендации использования и промышленное внедрение результатов исследований высокотемпературной пластичности рельсовых сталей» представлены результаты промышленного опробования предлагаемой корректировки температур нагрева под прокатку и использование температуры максимальной пластичности с целью наилучшей прорабатываемости заготовительных частей для головки, шейки и подошвы рельса.

Известно, что нагрев непрерывно-литых заготовок перед прокаткой в печи с шагающими балками производится до температуры 1200 – 1240 °С, при прохождении через устройство для гидросбива первичной и вторичной окалины и дальнейшем движении по рольгангу к первой обжимной клетки (*BD1*) (начало прокатки), температура падает в среднем до 1180 – 1170 °С. Необходимо отметить, что максимальной деформации непрерывно-литая заготовка подвергается в двухвалковой реверсивной обжимной клетки (*BD2*) при первом и втором пропуске в первом закрытом рельсовом калибре «балочного типа» с разрезкой со стороны будущей подошвы.

Отталкиваясь от температур начала прокатки, целесообразно осуществить все технологические процессы прокатки (прокатка в ящичных калибрах, прокатка в калибре «лежащая трапеция», прокатка в трапециевидном калибре без разрезки со стороны будущей подошвы) в первой обжимной клетки (*BD1*) до температур 1120 – 1125 °С, чтобы прокатка во второй обжимной клетки (*BD2*) началась при температуре максимальной пластичности 1100 °С.

Выполнение данного условия, во время максимальной деформации при максимальной пластичности стали, позволит не только снизить нагрузку на рабочую группу стана (*BD2*), но и приведет к наилучшей прорабатываемости заготовительных частей для головки, шейки и подошвы рельса и, как следствие, измельчение зерна во время данного процесса.

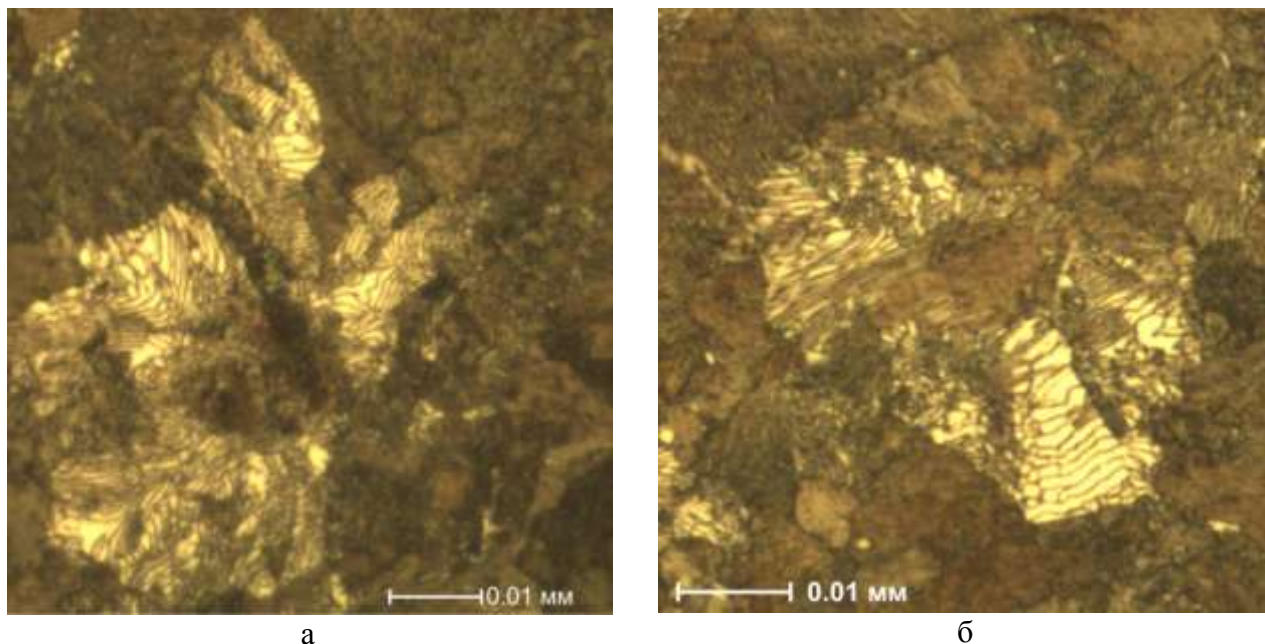
Для стали марки Э76ХФ, в которой наблюдается снижение пластичности в диапазоне температур 1025 – 1050 °С, во время прокатки необходимо снижать степень деформации в данном интервале температур, что несложно осуществлять в производственных условиях непрерывного универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК» путем повышения или понижения скорости рабочей группы стана.

В производственных условиях АО «ЕВРАЗ ЗСМК» в качестве эксперимента была проведена прокатка стометровых рельсов Р65 категории ДТ 350 из стали марки Э76ХФ по предложенной в диссертационной работе технологии, заключающаяся в снижении температуры заготовки, выходящей из печи с шагающими балками, с температурой 1170 – 1180 °С.

После прохождения заготовки через устройство для гидросбива первичной и вторичной окалины и дальнейшем движении по рольгангу к первой обжимной клетки (*BD1*) температура падает в среднем до 1140 – 1150 °С. После прокатки в первой обжимной клетки (*BD1*) заготовка подается во вторую обжимную клетку

(BD2) с температурой, приближенной к максимуму пластичности стали – 1100 °С, где происходит максимальная деформация заготовки в первом закрытом рельсовом калибре «балочного типа» с разрезкой со стороны будущей подошвы. Дальнейшие технологические процессы производства рельсов происходят без изменений.

По используемой и предлагаемой технологиям выявлены идентичные структуры и представлены сорбитом закали (рисунок 11).



а – используемая на АО «ЕВРАЗ ЗСМК»; б – предлагаемая

Рисунок 11 – Микроструктуры стали марки Э76ХФ после дифференцированной закали по разным технологиям

Основным показателем при сдаче рельсов предприятием заказчику является ударная вязкость. Показатели ударной вязкости образцов, вырезанных из рельсов, прокатанных по предлагаемой технологии, оказались выше по сравнению с показателями ударной вязкости на образцах по используемой технологии (таблица 1). Это можно объяснить с позиции наилучшей прорабатываемости заготовительных частей для головки, шейки и подошвы рельса в области максимальной пластичности данной стали и, как следствие, измельчение зерна. При определении размера зерна по предлагаемой диссертационной работой технологии по ГОСТ 5639-82 выявлены № 8 (преобладающий) и № 7, по сравнению с используемой технологией, где № 7 (преобладающий) и № 8.

На основании полученных результатов диссертационной работы проведена корректировка режимов работы печи с шагающими балками рельсобалочного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК» с уменьшением температуры нагрева непрерывнолитых заготовок перед прокаткой, а также прокатка во второй обжимной клетке (BD2) с температурой, приближенной к максимуму пластичности, что позволило снизить расход природного газа, повысить показатели ударной вязкости выше средних значений.

Совокупный годовой экономический эффект по результатам исследований составит $\approx 6,3$ млн. рублей

Таблица 1 – Механические свойства рельсов из стали марки Э76ХФ после производства по используемой заводом технологии и предложенной в диссертационной работе

Механические свойства	ГОСТ Р 51685-2013 для рельсов категории ДТ350	Технологии			
		Используемая		Предлагаемая	
Твердость поверхности, НВ	352-405	390		380	
Твердость на глубине 10 мм, выкружка левая, НВ	341	375		366	
Твердость на глубине 10 мм, выкружка правая, НВ	341	378		370	
Твердость на глубине 22 мм от поверхности, НВ	321	356		350	
Твердость шейки, НВ	не более 341	326		319	
Твердость подошвы, НВ	не более 363	345		341	
КСУ, Дж/см ²	не менее 15	27	19	34	35

Основные выводы по работе

1. На основе экспериментальных исследований методом горячего кручения установлены особенности изменения пластичности металла в интервале температур 900 – 1200 °С в различных зонах (корковая зона, зона столбчатых кристаллов, центральная зона) по сечению непрерывно-литых заготовок рельсовых сталей. Установлено, что максимальный ресурс пластичности наблюдается у стали марки Э76Ф при температуре $1150 \pm 10^\circ\text{C}$, Э76ХФ и Э90ХАФ – $1100 \pm 10^\circ\text{C}$. Дальнейшее повышение температуры приводит к снижению пластичности исследуемых марок сталей. По мере продвижения от края к центру непрерывно-литых заготовок для всех исследуемых марок стали наблюдается снижение технологической пластичности металла, связанное с увеличением размера зерна стали и количества неметаллических включений.

2. Получены новые уравнения регрессии и эмпирические зависимости влияния температуры на степень деформации сдвига рельсовых сталей марок Э76Ф, Э76ХФ, Э90ХАФ.

3. Установлены виды, определены морфология, химический и фазовый составы неметаллических включений в различных зонах по сечению непрерывно-литых заготовок рельсовых сталей марок Э76Ф, Э76ХФ, Э90ХАФ. Выявлено, что основными неметаллическими включениями в корковой зоне всех исследуемых сталей являются оксиды точечные (Al_2O_3) и нитриды алюминия (AlN), в зоне столбчатых кристаллов – оксиды точечные (Al_2O_3) и силикаты ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$; $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$; $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$), а в центральной зоне непрерывно-литых заготовок – силикаты ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$; $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$; $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$), оксиды точечные (Al_2O_3), сульфиды (MnS). Наибольшее количество включений наблюдается в центральной зоне НЛЗ, минимальное – в корковой зоне. Выявленные во всех исследованных рельсовых сталях недеформирующиеся силикаты алюминия ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$), железа

(FeO·SiO₂) и марганца (MnO·SiO₂) способствуют локализации деформации, и совместно с ростом зерна аустенита могут приводить к снижению показателей степени деформации сдвига, а соответственно и технологической пластичности.

4. В результате экспериментальных исследований установлено, что для рельсовой стали марки Э76ХФ с повышенным, по сравнению со сталью марки Э76Ф, содержанием хрома в диапазоне температур 1050 – 1250 °С характерны меньшие на 27 – 31 % средний размер зерна стали, и в диапазоне температур 1100 – 1200 °С меньшая на 4 – 10 % глубина обезуглероженного слоя.

5. Разработан ресурсосберегающий температурный режим нагрева и прокатки рельсов на непрерывном универсальном рельсобалочном стане, основанный на эффективном использовании пластичности металла при высоких температурах, обеспечивающий увеличение значения ударной вязкости рельсовой стали на 20 %. Конечные температуры нагрева непрерывно-литых заготовок в методической печи с шагающими балками снижены с 1200 – 1240 °С до 1180 – 1170 °С. Прокатка в первой обжимной клетке (BD1) осуществляется при температурах 1120 – 1125 °С, во второй обжимной клетке (BD2) в первом закрытом рельсовом калибре «балочного типа» с разрезкой со стороны будущей подошвы реализуется с максимальной деформацией при температурах максимальной пластичности стали (для марок Э90ХАФ, Э76ХФ 1100 ± 10 °С).

6. Разработанный температурный режим апробирован и принят к внедрению в условиях рельсобалочного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК» (внесены соответствующие изменения в технологическую инструкцию по производству рельсов 899–РБЦ–02–2017). Совокупный экономический эффект от внедрения результатов работы, основанный на снижении доли несоответствующей продукции и экономии природного газа составляет 6,3 млн. руб. в год.

Перспективы дальнейшей разработки темы. При выполнении данной работы изучена высокотемпературная пластичность и влияние на нее структуры стали, формирующейся под действием высокотемпературного нагрева, а также неметаллических включений в зонах непрерывно-литого слитка. Представленные в работе полученные сведения целесообразно использовать при производстве рельсов. Перспективы дальнейшей разработки темы связаны с поиском новых и совершенствования существующей технологий производства рельсовой продукции.

Список публикаций по теме диссертационной работы

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. **Симачев А.С.** Исследование высокотемпературной пластичности различных зон кристаллизации рельсовой электростали марки Э90ХАФ / А.С. Симачев, М.В. Темлянец, Т.Н. Осколкова, Е.В. Полевой, А.В. Головатенко // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. – № 5. – С. 45 – 48.

2. **Симачев А.С.** Влияние неметаллических включений на высокотемпературную пластичность непрерывно-литой заготовки рельсовой электростали / А.С. Симачев // Международный научно-исследовательский журнал. – 2014. – № 3-2 (22). – С. 63 – 64.

3. **Симачев А.С.** Высокотемпературная пластичность рельсовой стали / А.С. Симачев, Т.Н. Осколкова // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 4. – С. 149 – 150.

4. **Симачев А.С.** Влияние условий нагрева рельсовой электростали на структуру и пластическую деформацию / А.С. Симачев, Т.Н. Осколкова // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 3. – С. 161 – 162.

Статьи индексируемые в базе данных Scopus

1. **Simachev A.S.** Influence of Nonmetallic Inclusions in Rail Steel on the High Temperature Plasticity / A.S. Simachev, M.V. Temlyantsev, T.N. Oskolkova // Steel in Translation. – 2016. – Vol. 46. – № 2. – P. 112 – 114.

2. **Simachev A.S.** High-temperature Plasticity Of The Solidification Zones Of Continuous-cast Э76Ф Rail-steel Billet / A.S. Simachev, M.V. Temlyantsev, T.N. Oskolkova, V.N. Peretyat'ko, V.I. Bazaikin // Steel in Translation. – 2015. – Vol. 44. – № 10. – P. 719 – 722.

Статьи в других периодических изданиях

1. **Симачев А.С.** Исследование высокотемпературной пластичности рельсовой стали марки Э76ХФ / А.С. Симачев, М.В. Темлянцева, К.В. Волков, Е.В. Полевой, А.В. Головатенко // Сб. науч. трудов «Вестник горно-металлургической секции РАЕН». Отделение металлургия. – 2014. – № 33. – С. 78 – 82.

2. **Симачев А.С.** Исследование неметаллических включений непрерывно-литой заготовки стали марки Э76Ф после высокотемпературного кручения / А.С. Симачев, Т.Н. Осколкова // Сб. науч. статей Междунар. молодежной науч.-практич. конф. «Прогрессивные технологии и процессы». – Курск. – 2014. – Т. 2. – С. 187 – 189.

3. **Симачев А.С.** Влияние неметаллических включений непрерывно-литой заготовки рельсовой стали Э76Ф на высокотемпературную пластичность / А.С. Симачев, Т.Н. Осколкова // Сб. XVIII Всероссийской науч.-практич. конф. под ред. Е.В. Протопопова «Металлургия: технологии, управление, инновации, качество». – Новокузнецк. – 2014. – С. 156 – 159.

4. **Симачев А.С.** Изучение влияния неметаллических включений на высокотемпературную пластичность непрерывно-литой заготовки рельсовой стали Э76Ф / А.С. Симачев // Сб. науч. тр. IV Междунар. науч.-практич. конф. «Современные инновации в науке и технике». – Курск. – 2014. – Т. 4. – С. 101 – 103.

5. **Симачев А.С.** Неметаллические включения в различных зонах кристаллизации непрерывно-литой заготовки рельсовой стали / А.С. Симачев, Т.Н. Осколкова // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 5 (часть 1). – С. 147 – 148.

6. **Симачев А.С.** Изучение структуры рельсовой электростали после высокотемпературного кручения / А.С. Симачев // Сб. науч. тр. XI Междунар. науч.-практич. конф. «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации». – Курск. – 2014. – Т. 4. – С. 93 – 96.

7. **Симачев А.С.** Влияние температуры и времени выдержки на высокотемпературное кручение рельсовой стали / А.С. Симачев // Сб. статей XII Меж-

дунар. науч.-практич. конф. «Материалы и технологии XXI века». – Пенза: Приволжский дом знаний. – 2014. – С. 46 – 48.

8. **Симачев А.С.** Изучение пластичности рельсовой стали Э76Ф при высоких температурах / А.С. Симачев, Т.Н. Осколкова // Сб. науч. тр. Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых под ред. М.В. Темлянцева «Наука и молодежь: проблемы поиска решения». – Новокузнецк. – 2014. – Т. 2. – С. 93 – 96.

9. **Симачев А.С.** Определение рациональных температур нагрева рельсовой электростали Э76Ф под прокатку на основе исследования высокотемпературной пластичности / А.С. Симачев, М.В. Темлянец, Т.Н. Осколкова // Сб. докладов III Всероссийской науч.-практич. конф. «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве». – Екатеринбург. – 2014. – С. 86 – 89.

10. **Симачев А.С.** Высокотемпературная пластичность рельсовой электростали Э76Ф / А.С. Симачев, М.В. Темлянец, Т.Н. Осколкова // Сб. науч. тр. «Вестник РАЕН. Западно-Сибирское отделение». – Новокузнецк. – 2014. – № 16. – С. 79 – 82.

11. **Симачев А.С.** Исследование высокотемпературной пластичности рельсовой стали марки Э76Ф / А.С. Симачев, М.В. Темлянец, Т.Н. Осколкова // Сб. науч. трудов «Вестник горно-металлургической секции РАЕН». Отделение металлургия. – 2014. – № 32. – С. 23 – 27.

12. Темлянец М.В. Исследование микроструктуры и изломов перегретой рельсовой стали / М.В. Темлянец, Т.Н. Осколкова, **А.С. Симачев**, М.В. Чубейко // Сб. науч. трудов «Вестник горно-металлургической секции РАЕН». Отделение металлургия. – 2010. – № 26. – С. 76 – 80.

