



ТУРСУНОВ НОДИРЖОН КАЮМЖОНОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАФИНИРОВАНИЯ И МОДИФИЦИРОВАНИЯ  
МЕТАЛЛА С ЦЕЛЮ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ  
20ГЛ В ИНДУКЦИОННОЙ ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ И ПОВЫШЕНИЯ ЕЕ КАЧЕСТВА

Специальность

05.16.02 – «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Металлургия стали, новые производственные технологии и защита металлов» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Национального исследовательского технологического университета «МИСиС».

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор  
НИТУ «МИСиС»

**Семин Александр Евгеньевич**

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук,  
генеральный директор ООО «Институт  
тепловых металлургических агрегатов и  
технологий «Стальпроект»

**Усачев Александр Борисович**

кандидат технических наук,  
научный сотрудник лаборатории  
«Диагностика материалов», ФГБУН  
«Институт металлургии и материаловедения  
им. А.А. Байкова» РАН

**Демин Константин Юрьевич**

**Ведущая организация:**

**АО ГНЦ РФ «НПО «Центральный  
научно-исследовательский институт  
технологии машиностроения»**

Защита состоится **23 ноября 2017 г. в 10:00** на заседании диссертационного совета Д212.132.02 при Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 6, ауд. А-305.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» <http://misis.ru>.

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения) отправлять по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4, Учёный совет. Копии отзывов можно присылать на e-mail: [misistlp@mail.ru](mailto:misistlp@mail.ru).

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.132.02,  
доцент, кандидат технических наук

**А.В. Колтыгин**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Важнейшая задача, формулируемая машиностроителями перед металлургической отраслью, - существенное повышение качества выплавляемой стали. Непрерывное ужесточение требований к надежности работы элементов конструкций заставляет более подробно анализировать конкретные условия их работы.

Большинство деталей в процессе эксплуатации подвержено циклическим нагрузкам. По статистическим данным на железнодорожном транспорте с ростом грузоперевозок резко увеличились проблемы литых деталей подвижного состава (в частности, за последнее 15 лет увеличились изломы тележек в 3...5 раз). Излом приводит к выводу ее из эксплуатации, соответственно к экономическим потерям, а главное, при запоздалом обнаружении дефекта, может привести и к человеческим жертвам. Машиностроители стараются решить эту проблему или хотя бы снизить риски эксплуатации. Несмотря на изменения конструкции и технологии изготовления литых деталей количество проблем, связанных с этим дефектом, не уменьшается, а в ряде случаях и увеличивается.

Увеличение грузоперевозок в мире предъявляет повышенные требования к стали, используемой для изготовления железнодорожных деталей, и ставит новые задачи в области металлургии для повышения их выносливости, надежности и долговечности. Выполнение этих требований определяет конкурентоспособность изделий на соответствующем сегменте рынка железнодорожного транспорта.

Традиционные приемы внепечной обработки металла при выплавке исходного полупродукта, как в дуговых, так и особенно в индукционных печах (ИТП) имеют ряд ограничений по степени рафинирования от таких вредных примесей как фосфор, сера, кислород, неметаллические включения и других, во многом определяющих качество готовой металлопродукции.

Рост требований к свойствам стали, как правило, опережает развитие технологических приемов, направленных на повышение чистоты металла. Вследствие этого необходим дальнейший поиск эффективных способов рафинирования особенно в ИТП, легирования и модифицирования стали. Разработка новых технологических приемов выплавки и внепечной обработки, позволяющих эффективно рафинировать и модифицировать сталь, является актуальной задачей.

**Целью** диссертационной работы является исследование и совершенствование процессов рафинирования и модифицирования стали в ИТП с использованием твердых шлаковых смесей (ТШС) и редкоземельных металлов (РЗМ). Разработка технологических

рекомендаций, позволяющих производить металл для литых деталей железнодорожного транспорта, с минимальной либо исключаящей отбраковку по такому дефекту, как излом. Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Теоретический и экспериментальный анализ процессов рафинирования при выплавке стали в ИТП и модифицирования в сталеразливочном ковше.

2. Лабораторные исследования процесса рафинирования стали от серы с помощью ТШС и РЗМ, включая уточнение термодинамических данных по взаимодействию РЗМ с элементами расплава. Исследование влияния основных технологических параметров на процессы рафинирования, легирования и модифицирования стали при использовании РЗМ.

3. Полупромышленные исследования процессов рафинирования, легирования и модифицирования стали марки 20ГЛ в ИТП.

4. Разработка предложений по улучшению качества и эксплуатационных характеристик стали за счет повышения степени ее рафинирования ТШС и модифицирования РЗМ.

**Теоретической основой** для данной работы послужили труды в области исследования сталеплавильных процессов. В частности, публикации таких авторов, как Григорян В.А., Рошин В.Е., Бигеев В.А., Уточкин Ю.И., Григорович К.В., Дуб В.С., Егоров А.В., Еланский Г.Н., Смирнов Н.А., Семин А.Е., Стомахин А.Я., Павлов А.В., Котельников Г.И., Падерин С.Н., Белов В.Д., Козлов Л.Я., Колокольцев В.М., Василевский П.Ф., Малиночка Я.Н., Ковальчук Г.З., Turkdogan E.T., Fruehan R.J. и др.

#### **Научная новизна:**

1. Предложена новая концепция технологии плавки в ИТП, которая позволяет обеспечить эффективное рафинирование металла от фосфора, серы и других вредных примесей за счет использования шлака, увеличения его количества, дополнительного перемешивания шлака и металла, увеличения времени их взаимного контакта. Показано, что обеспечить повышенную рафинирующую способность шлака при плавке стали в ИТП можно за счет подбора специальных шлаковых смесей с пониженной температурой плавления, определенного времени выдержки металлического расплава под шлаками при конкретной температуре ванны, получения плоского мениска металла (например: за счет повышения уровня металла за пределы индуктора, либо отключением верхних витков индуктора для снижения высоты мениска) с целью сохранения необходимого по времени контакта жидкоподвижного шлака с рафинируемой ванной за счет уменьшения “сползания” шлака к стенке тигля. Это позволило обеспечить степень дефосфорации до 65 % и степень десульфурации до 60 %. При этом показана роль ТШС в сочетании с алюминием и РЗМ.

2. Получены уточненные термодинамические данные по взаимодействию РЗМ с компонентами, находящимися в металлической ванне, футеровке агрегата и шлаке. Показано, что константы равновесия реакций взаимодействия РЗМ с серой и алюминием, полученные методом комбинирования, отличаются от ранее известных на 1...5 порядков. Адекватность установленных термодинамических данных подтверждена расчетами и конкретными экспериментальными данными лабораторных и полупромышленных экспериментов. Уточненные термодинамические данные по взаимодействию РЗМ с компонентами расплава, элементами в составе футеровки и шлака следует рекомендовать для теоретической оценки процессов в многофазных системах.

3. Уточнены конкретные кинетические параметры процесса десульфурации металлического расплава применительно к ИТП. Установлено, что скорость процесса десульфурации лимитируется массопереносом серы в металле и шлаке и может быть описана уравнением первого порядка при эффективном коэффициенте массопереноса серы  $6,37 \cdot 10^{-4}$  м/с. Показано, что в ИТП при одинаковой температуре расплава, перемешивание шлака с металлом и продолжительность выдержки металла под шлаком являются основными факторами, определяющими кинетику процесса десульфурации.

4. Показано, что модифицирование стали РЗМ может быть применено к литейным сплавам с низким (менее 0,015 %) содержанием серы. При этом металл, обработанный РЗМ, отличается более высокой раскисленностью, степенью десульфурации, мелкодисперсной структурой и повышенными механическими свойствами. Конкретизирована зависимость степени усвоения РЗМ от доли алюминия в расплаве. Получены количественные зависимости степени десульфурации расплава от доли РЗМ в металлической ванне.

#### **Практическая значимость результатов работы:**

1. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования по поведению серы и фосфора в сталеплавильной ванне, что позволило в опытно-промышленных условиях провести комплексные исследования по рафинированию стали в ИТП с применением ТШС. Определены термодинамические, кинетические и технологические параметры процесса рафинирования металла с использованием ТШС в ИТП.

2. Сформулированы рекомендации по рафинированию стали 20ГЛ в среднечастотной ИТП вместимостью 6 т с использованием ТШС и при ковшевой обработке с применением РЗМ. Применение предложенной технологии позволило увеличить степень дефосфорации с 10 до 60 % с достижением содержания фосфора менее 0,020...0,017 %, увеличить степень десульфурации с 50 до 90 % с достижением содержания серы менее 0,008...0,004 %, повысить качество готовой продукции и ее

механические свойства, улучшить макро- и микроструктуру металла, заменить дорогой чистый лом (0,015 % P, 0,016 % S) на более дешевый (по сравнению с действующей технологией) и увеличить выход годных деталей железнодорожных тележек на 40 %.

3. На основании комплексных полупромышленных исследований разработана и освоена рациональная технология производства стали 20ГЛ в ИТП и ковшевая обработка с применением РЗМ, обеспечившие уникальное сочетание служебных свойств деталей железнодорожных тележек. Работа выполнена по согласованию с литейно-механическим заводом (г. Ташкент, Узбекистан). Результаты исследования положены в основу измененной технологии производства стали 20ГЛ в ИТП, что позволило значительно повысить эксплуатационные свойства боковых рам (соответствующие Акты прилагаются к диссертации).

**Апробация результатов работы.** Выступление на XIV Международном Конгрессе сталеплавильщиков и производителей металла на тему: «Исследование процессов дефосфорации и десульфурации при выплавке стали 20ГЛ в индукционной тигельной печи». Электросталь: 2016, 17-21 октября.

Выступление на техническом совещании Ташкентского литейно-механического завода. Тема доклада «Исследование процессов дефосфорации и десульфурации при выплавке стали 20ГЛ в индукционной тигельной печи». Август 2016, г. Ташкент.

Студенческая научная конференция 68-ые Дни науки студентов НИТУ «МИСиС» кафедры Metallургии стали и ферросплавов. Тема доклада – «Анализ эффективности работы индукционной печи при разной толщине футеровки тигля». Апрель 2013, г. Москва.

Студенческая научная конференция 69-ые Дни науки студентов НИТУ «МИСиС» кафедры Metallургии стали и ферросплавов. Тема доклада – «Оптимизация конструкции и работы индукционной печи при выплавке стали 20ГЛ в условиях Ташкентского литейно-механического завода». Апрель 2014, г. Москва.

#### **На защиту выносятся:**

1. Теоретический анализ процессов рафинирования металлического расплава с использованием ТШС и РЗМ с целью повышения служебных свойств изделий при выплавке стали в ИТП.

2. Результаты лабораторных исследований процессов рафинирования стали от серы с помощью ТШС и РЗМ. Результаты исследования влияния основных технологических параметров на процесс рафинирования, легирования и модифицирования стали при использовании РЗМ, включая уточнение термодинамических данных по взаимодействию РЗМ с элементами расплава и футеровки.

3. Результаты исследования и совершенствования в полупромышленных условиях режимов рафинирования металла от фосфора и серы при выплавке стали в ИТП вместимостью 6 т, в том числе технические решения по формированию активного шлака в ИТП. Результаты исследования кинетики процесса десульфурации стали 20ГЛ с использованием ТШС в ИТП.

4. Результаты исследования влияния микролегирования РЗМ стали 20ГЛ на ее эксплуатационные свойства.

5. Рекомендации по совершенствованию технологии выплавки стали 20ГЛ.

**Личный вклад автора:** непосредственное участие автора в получении исходных лабораторных и экспериментальных данных, теоретический анализ процессов рафинирования, раскисления и модифицирования расплава с помощью РЗМ и их взаимодействия с футеровкой тигля. Подготовка основных публикаций по работе.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 5 научных работ: 4 статьи опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных в ВАК.

**Достоверность результатов:** подтверждается убедительным массивом экспериментальных данных, позволяющим сделать обоснованные выводы, и применением современных методов химического анализа. Для определения содержания элементов в шлаке использовали спектральный атомно-эмиссионный метод с индуктивно-связанной плазмой (АЭС-ИСП). Состав металла определяли с использованием эмиссионного спектрометра “Poly Spek” фирмы “Arun Technology Ltd”. Газовый анализ проводили методом плавления в атмосфере инертного газа на эксхалографе фирмы “LECO”. Микроструктуру определяли на микроскопе “BXM 41 LED” (OLYMPUS). Температуру металла измеряли термопарой “Heraeus Electro-Nite International N.V.”, Бельгия. Текст диссертации и автореферат проверен на отсутствие плагиата с помощью программы «Антиплагиат» (<http://antiplagiat.ru>).

**Структура диссертационной работы** состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 96 наименований. Диссертация изложена на 116 страницах машинописного текста, содержит 32 таблиц, 45 рисунков и 4 приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность исследуемых проблем, представлены цель и задачи работы, ее научная новизна и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации результатов работы.

В **первой главе** приведен аналитический обзор литературы по тематике.

Проблема качества литых деталей железнодорожного транспорта в последнее время является крайне актуальной для всех, кто обладает парком подвижного состава. Потенциальную угрозу безопасности движения поездов, в частности, представляют случаи излома боковых рам тележек грузовых вагонов. Результаты исследований причин излома указывают, что изломы могут быть связаны с вредным влиянием кислорода, фосфора, серы и неметаллических включений, которые снижают эксплуатационную стойкость литых деталей.

Поэтому с 2016 года были внесены изменения в ГОСТ 32400-2013 по химическому составу стали 20ГЛ по вредным примесям и механическим свойствам, так как ряд предприятий сталкивается с проблемой, заключающейся в низких значениях ряда параметров, характеризующих механические свойства из-за повышенного содержания фосфора и серы.

Удаление из металла вредных примесей, таких как сера и фосфор, заключается в переводе их в шлак и создании условий, препятствующих их обратному переходу из шлака в металл. Изменяя состав, количество и температуру шлака, можно весьма значительно влиять на процессы рафинирования металла от вышеуказанных примесей. Поэтому получение шлака, имеющего заданные состав и свойства, является одной из главных задач особенно при выплавке стали в ИТП.

Как известно, роль шлака при плавке стали в ИТП трактуется не однозначно. Большинство авторов полагают, что удаление фосфора и серы затруднено, если плавку проводить в ИТП. При этом ряд исследователей отмечают нейтральность шлака к процессам рафинирования, что обусловлено низкой реакционной способностью “холодных” шлаков, нагрев которых происходит только в результате теплопередачи в зоне контакта с поверхностью металла, малой величиной поверхности контакта “металл – шлак”, охлаждением шлаков футеровкой тигля и меньшей их жидкоподвижностью, чем в других агрегатах, где возможны рафинировочные процессы. При этом часто делают заключение о недостаточной рафинирующей способности шлаков при ИТП и соответственно предъявляют повышенные требования к металлошихте по содержанию таких элементов, как фосфор и сера. Рафинирование металла в ИТП по традиционным технологическим схемам практически отсутствует.



Другие исследователи считают, что шлак может участвовать в процессе рафинирования металла, но при определенных условиях, например, при уменьшении высоты мениска зеркала металла или подключении дополнительных средств в своде печи (применение дуги постоянного тока, плазматрона и др.), позволяющих повысить активность шлака. Но второй способ весьма затратный. Показано, что при создании условий, компенсирующих эти недостатки, возможно эффективное использование шлаков для удаления вредных примесей и рафинирования металла от неметаллических включений.

В настоящее время при производстве стали широко применяют РЗМ, обладающие высоким сродством к кислороду, сере, азоту, цветным металлам и другим примесям. Наиболее эффективно использование РЗМ совместно с ТШС. При этом в каждом конкретном случае необходимо уделить внимание как подбору ТШС, так и уровню окисленности металла перед введением РЗМ. Влияние РЗМ проявляется как в снижении содержания вышеотмеченных примесей в стали, так и в переводе их из активных форм в пассивные, что способствует очищению границ зерен и обеспечивает формирование мелкодисперсной дендритной структуры. Очищая сталь от вредных примесей, РЗМ улучшают ее литейные свойства, жидкотекучесть, условия заливки форм и трещиностойчивость отливок, а также снижают анизотропию механических характеристик стали. Высокая эффективность влияния РЗМ на свойства стали обусловлена их благоприятным воздействием на состав, тип, форму, количество и равномерность распределения образующихся неметаллических включений, существенным улучшением макро – и микроструктуры заготовки, снижением ее физической и химической неоднородности, обеспечением повышенной плотности и дисперсности кристаллической структуры во всех зонах литой заготовки, в том числе малого сечения.

Другие исследователи считают, что роль РЗМ состоит в достижении в жидкой стали такого суммарного содержания серы, которое значительно ниже значений, получаемых с помощью обычных десульфураторов, как марганец, магний и другие.

Исходя из вышеизложенного, настоящая диссертационная работа посвящена разработке новых технологических приемов выплавки и внепечной обработки, в частности, совершенствованию процессов рафинирования в ИТП и модифицирования стали в сталеразливочном ковше.

**Вторая глава** работы посвящена изучению в лабораторных условиях процесса рафинирования стали от серы с помощью ТШС совместно с РЗМ и исследованию влияния основных технологических параметров на процессы рафинирования, легирования и модифицирования стали при использовании РЗМ, включая уточнение термодинамических

данных по взаимодействию РЗМ с элементами расплава и футеровки.

В лабораторных условиях в качестве модели разливочного ковша служила печь сопротивления с графитовым нагревателем (мощностью 24 кВт·А). С целью уменьшения влияния атмосферного кислорода опыты проводили в проточной атмосфере очищенного аргона. Температуру металла измеряли вольфрам-рениевой термопарой ВР5/20 с точностью  $\pm 15$  °С, установленной в корундовом чехле снизу тигля. Химический состав стали 20ГЛ, принятый для исследования, приведен в таблице 1.

Таблица 1 - Химический состав стали марки 20ГЛ, % (масс.)

С	Mn	Si	S	P	Cr	Cu	Ni	Al
0,250	1,163	0,509	0,025	0,025	0,157	0,172	0,151	0,025

Металл массой 300 г расплавляли в алундовом тигле диаметром 45 мм, с высотой 60 мм и обрабатывали ТШС различного состава (таблица 2) совместно РЗМ и алюминием.

Таблица 2 – Химический состав ТШС, % (масс.)

Условный номер шлака	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	MnO	CaF <sub>2</sub>
1	50	50	-	-	-	-
2	60	23	9	8	-	-
3	62	25	-	8	-	5

РЗМ добавляли в виде лигатуры (50% Се, 25% La, 15% Nd, 5% Pr, 3% Fe, 2% прочие РЗМ) в количестве 0,1 % от массы металла.

При достижении температуры металла 1600 °С сталь обрабатывали по шести различным вариантам, представленным на таблице 3. После этого выдерживали металл в течение 8 мин и печь выключали. Результаты эксперимента представлены на рисунке 1 и в таблице 3.

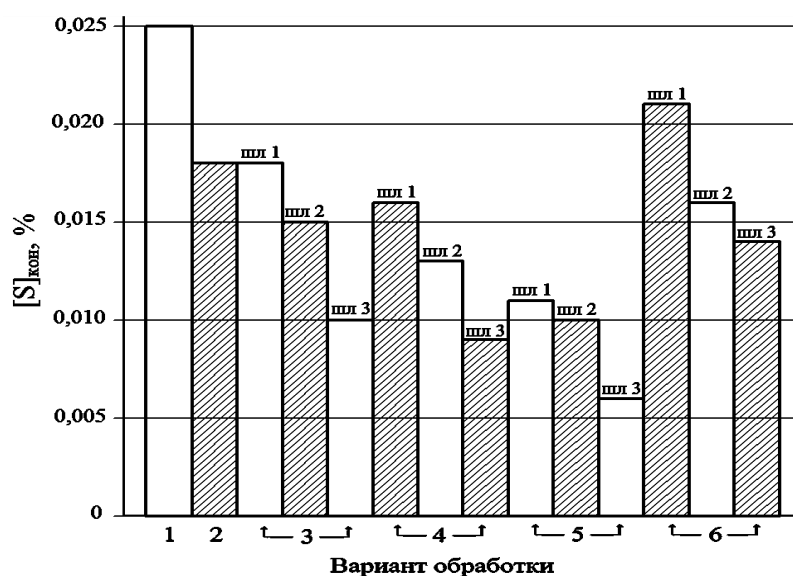


Рисунок 1 - Содержание серы в металле при различных вариантах рафинирования стали

Таблица 3 - Основные параметры и результаты экспериментов по рафинированию стали 20ГЛ при 1600 °С

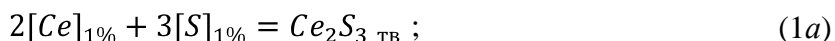
Вариант обработки	Количество раскислителя, масс. %	Количество ТШС, масс. %	$\tau_{\text{выд}}$ , мин	$[S]_{\text{кон}}$ , %	$[Al]_{\text{кон}}$ , %	$[Ce]_{\text{кон}}$ , %
1	Al - 0,1	-	8	0,025	0,043	-
2	1-присадка: Al – 0,1 2-присадка: РЗМ – 0,1	-	8	0,019 0,018 0,018	0,047 0,046 0,044	0,020 0,024 0,023
3 Шлак 1	Al - 0,1	5	2 4 8	0,022 0,020 0,018	0,058	-
3 Шлак 2	Al - 0,1	5	2 4 8	0,020 0,017 0,015	0,033	-
3 Шлак 3	Al - 0,1	5	2 4 8	0,018 0,014 0,010	0,073	-
4 Шлак 1	РЗМ – 0,1	5	8	0,016	0,033	0,018
4 Шлак 2	РЗМ – 0,1	5	8	0,013	0,027	0,014
4 Шлак 3	РЗМ – 0,1	5	8	0,009	0,029	0,015
5 Шлак 1	1-присадка: Al – 0,1 2-присадка: РЗМ – 0,1	5	8	0,011	0,059	0,023
5 Шлак 2	1-присадка: Al – 0,1 2-присадка: РЗМ – 0,1	5	8	0,010	0,037	0,018
5 Шлак 3	1-присадка: Al – 0,1 2-присадка: РЗМ – 0,1	5	8	0,006	0,079	0,021
6 Шлак 1	-	5	8	0,021	0,011	-
6 Шлак 2	-	5	8	0,016	0,014	-
6 Шлак 3	-	5	8	0,014	0,023	-

Как видно из данных, приведенных в таблице 3 и на рисунке 1, в зависимости от режима обработки расплава с целью десульфурации содержание серы в металле снижалось от исходных значений  $[S]_{\text{нач}}=0,025\%$  до  $[S]_{\text{кон}}=0,006\%$ . По каждому варианту проведено от 5 до 10 плавов. Наилучшие результаты по десульфурации наблюдали на экспериментах, проведенных по варианту 5, т.к. использование этого варианта обеспечивало наибольшее содержание остаточного содержания алюминия и церия, что позволило снизить окисленность расплава, а это, в свою очередь, является важнейшим условием проведения процесса десульфурации. На этих экспериментах при достижении температуры расплава 1600 °С металл раскисляли 0,1% Al, обрабатывали ТШС, добавляли РЗМ и выдерживали при указанной температуре 8 мин.

Для термодинамического анализа необходимы надежные термодинамические

параметры: энергия Гиббса, константа равновесия основной реакции, описывающей процесс десульфурации. Проведен термодинамический анализ процесса десульфурации металла в зависимости от содержания серы и остаточного содержания церия в металле.

По мере уменьшения содержания серы в стали состав сульфидной фазы может изменяться от  $Ce_2S_3$  до  $CeS$ . Для термодинамического анализа процесса десульфурации с церием использованы значения энергии Гиббса реакций (1a) и (2a), полученных методом комбинирования частных реакций. Предварительно был проведен анализ значений свободной энергии Гиббса, полученных рядом исследователей.



$$\Delta G^o = -1014618 + 390,9 \cdot T, \text{ Дж/моль}, \quad (1б)$$



$$\Delta G^o = -363263 + 110,8 \cdot T, \text{ Дж/моль}. \quad (2б)$$

Коэффициенты активности серы и церия находили, используя параметры взаимодействия первого порядка в расплавах на основе железа (таблица 4).

Таблица 4 – Параметры взаимодействия первого порядка в расплавах на основе железа

$e_i^j$	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Ce	Al
Ce	-1,249	0,004	-0,101	-0,889	0,192	0,010	-0,103	-0,103	0,029	-0,059
O	-0,448	-0,019	-0,151	-0,133	0,070	-0,04	-0,013	-0,013	-0,999	-3,901
S	0,115	-0,026	0,062	-0,028	0,028	-0,011	0	-0,008	-0,200	0,034
Al	0,166	-0,002	0,051	0,030	0,041	0,003	-0,013	0,017	-0,008	0,045

Полученные методом комбинирования термодинамические данные, характеризующие процесса взаимодействия церия с серой (свободная энергия Гиббса), сравнены с ранее известными данными (таблица 5). Данные, характеризующие произведения концентраций церия и серы в расплаве, отличаются на 1...2 порядка.

Таблица 5 – Экспериментальные и расчетные значения произведения растворимости при десульфурации РЗМ при 1873 К

№	Авторы	$[Ce] \cdot [S]$	Условия (тигель)
1	Сакурая и др.	$1,0 \cdot 10^{-4}$	Крупные промышленные слитки (23 т)
2	Фишер и др.	$1,9 \cdot 10^{-4}$	ВИП (СаО)
3	Исигуро и др.	$7,0 \cdot 10^{-5}$	Крупные промышленные слитки (30 т)
4	Настоящая работа	$1,06 \cdot 10^{-4}$	Термодинамический расчет
5	Вильсон и др.	$7,12 \cdot 10^{-6}$	Термодинамический расчет
		$[Ce]^2 \cdot [S]^3$	
1	Настоящая работа	$5,62 \cdot 10^{-11}$	Термодинамический расчет
2	Вильсон и др.	$1,74 \cdot 10^{-12}$	Термодинамический расчет

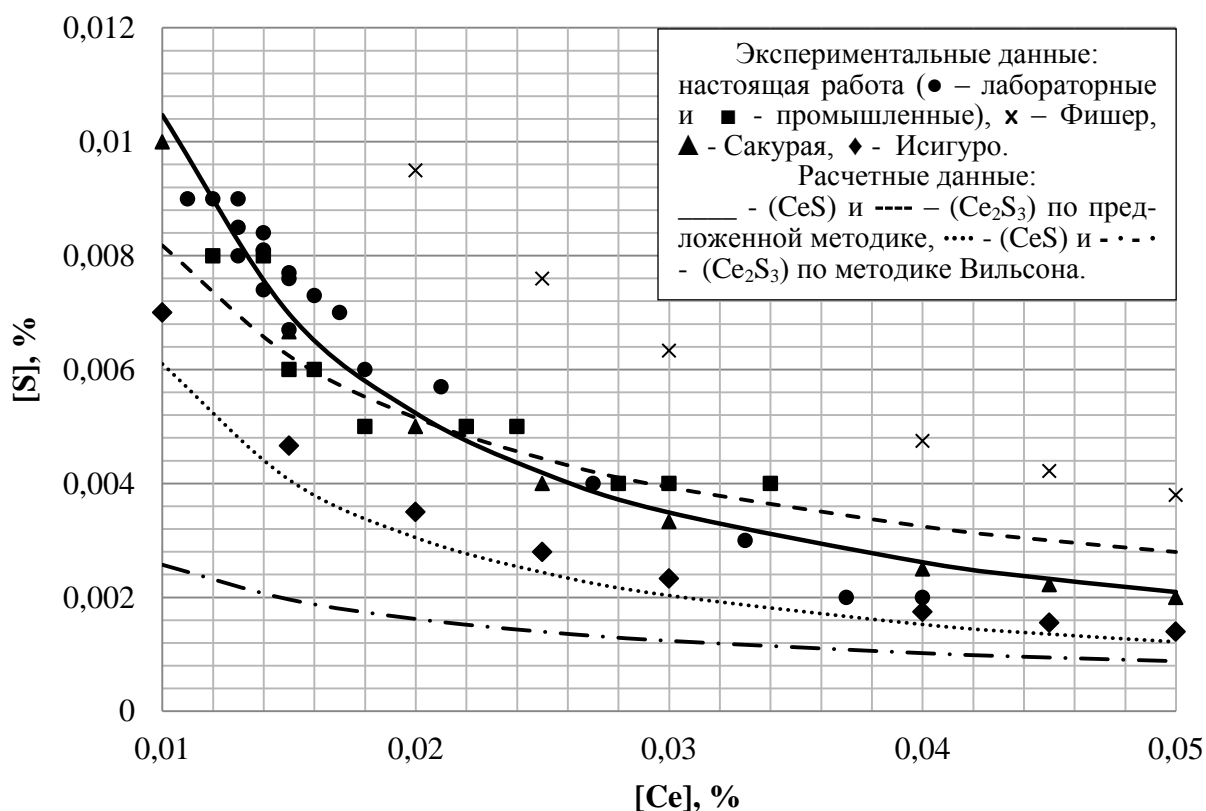
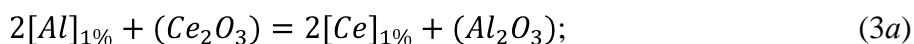


Рисунок 2 - Результаты экспериментальных и термодинамических анализов процесса десульфурации стали с использованием РЗМ

Как видно из приведенных на рисунке 2 результатов, экспериментальные значения, характеризующие процесс десульфурации расплава церием, весьма удовлетворительно описываются реакцией (1а), если в качестве значений энергии Гиббса принять данные, полученные комбинированием. Экспериментальные данные настоящей работы согласуются с результатами таких исследователей, как Сакурая, Исигуро, что может свидетельствовать о надежности проведенных лабораторных и промышленных исследований.

Как известно, на содержание церия, способного участвовать в процессе десульфурации, оказывает определяющее влияние окисленность системы. Окисленность системы в данных экспериментах контролируется содержанием алюминия в расплаве. Для получения расчетных значений, отражающих зависимость содержания церия в металле от доли в нем алюминия, использована реакция 3а и значение энергии Гиббса (3б), полученное методом комбинирования:



$$\Delta G^o = -122900 + 36,4 \cdot T, \text{ Дж/моль}, \quad (3б)$$

Проведено сравнение равновесных концентраций церия и алюминия в металле с их экспериментальными значениями и ранее известными данными (рисунок 3).

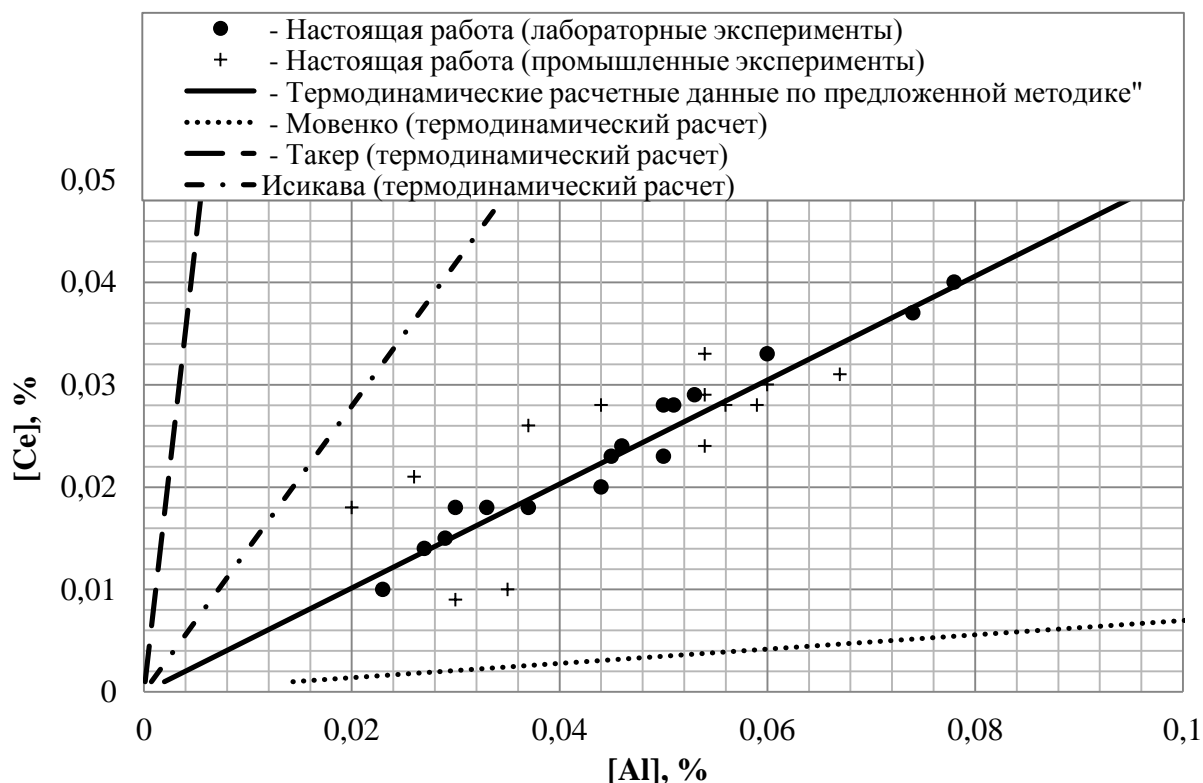


Рисунок 3 – Сравнение экспериментальных и равновесных концентраций церия и алюминия в металле

Как видно из рисунка, экспериментальные данные близки теоретическим, рассчитанным по реакции (3а) с использованием энергии Гиббса, полученной методом комбинирования. Для стали 20ГЛ содержание алюминия 0,02...0,06 % обеспечивает концентрацию церия в металле от 0,01 до 0,04 %.

Результаты по десульфурации металла, полученные в лабораторных исследованиях, позволили сформулировать задачи для промышленных плавов. При этом была поставлена и дополнительная задача, а именно снизить фосфор в стали на стадии индукционной плавки.

**В третьей** главе проведено исследование технологических особенностей производства стали 20ГЛ, оказывающих влияние на содержание фосфора и серы при плавке стали современных ИТП.

**В подразделе 3.1** рассмотрено исследование процесса дефосфорации стали в промышленной ИТП вместимостью 6 т.

Эксперименты по дефосфорации металла проводили с использованием ТШС (известь, плавиновый шпат, железорудный концентрат). Средний химический состав

металлошихты представлен в таблице 6.

Таблица 6 – Средний химический состав металлошихты, % (масс.)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Fe
0,306	0,359	0,470	0,036	0,033	0,128	0,103	0,140	0,065	98,360

Железорудный концентрат вводили с третьей и четвертой загрузкой металлического лома, что позволяло избежать резкого “вскипания” ванны. Для поддержания шлакового покрова присаживали известь и плавиковый шпат – 100 и 10 кг соответственно.

Для улучшения взаимодействия между металлом и шлаком был увеличен уровень жидкого металла в тигле выше верхнего витка индуктора, что позволило уменьшить высоту мениска зеркала ванны и тем самым удерживать шлак над расплавом без его “сползания” к стенке тигля. В период окисления металла для предотвращения сильного “захолаживания” шлака ванну перемешивали стальным прутком, увеличивая реакционную способность шлака.

В работе исследовано влияние температуры на процесс дефосфорации стали в производственных условиях при выплавке вышеуказанной стали в ИТП. При этом температуру расплава изменяли от 1525 до 1650 °С. Пробы металла и шлака на полный химический анализ (таблицы 7...9) отбирали после выдержки в течение 5 мин.

Таблица 7 – Средний химический состав металла на конец периода расплавления

Элемент	C	Si	Mn	P	S	Al	Fe
%	0,189	0,028	0,348	0,011	0,033	0,003	97,03

Таблица 8 – Средний химический состав шлака на конец периода расплавления по 15 плавкам

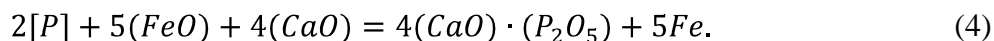
Оксид	CaO	SiO <sub>2</sub>	FeO	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
%	46,0	23,5	13,0	4,9	8,9	2,3	1,4

Таблица 9 - Влияние температуры металла на содержание фосфора в шлаке и в металле

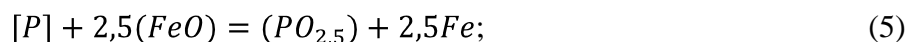
T <sub>м</sub> , °С	1525	1550	1575	1600	1625	1650
(P) <sub>к</sub> , %	0,62	0,55	0,50	0,40	0,36	0,30
[P] <sub>к</sub> , %	0,011	0,012	0,014	0,016	0,019	0,022

Экспериментальные результаты по дефосфорации металла были сравнены с расчетными. Теоретический анализ процесса дефосфорации был проведен с

использованием реакции (4):



Равновесное значение коэффициента распределения фосфора  $L_P$  (7) рассчитано по упрощенной реакции окисления фосфора (5) и соответствующей константе равновесия (6):



$$\lg K = \lg \frac{x_{PO_{2,5}} \cdot \gamma_{PO_{2,5}}}{x_{FeO}^{2,5} \cdot \gamma_{FeO}^{2,5} \cdot [P] \cdot f_P} = \frac{1120}{T} - 1,385; \quad (6)$$

$$L_P = \frac{(\%P)}{[\%P]} = \frac{31 \cdot K \cdot f_P \cdot x_{FeO}^{2,5} \cdot \gamma_{FeO}^{2,5} \cdot n}{\gamma_{PO_{2,5}}}. \quad (7)$$

Как известно, определяющими параметрами процесса дефосфорации являются окисленность системы “металл-шлак” и температура. Однако обеспечить эффективность этого процесса в ИТП за счет окисленности весьма сложно. Поэтому в качестве определяющего параметра выбрана температура металла.

На рисунке 4 представлены экспериментальные данные концентрации фосфора в металле и шлаке в зависимости от температуры.

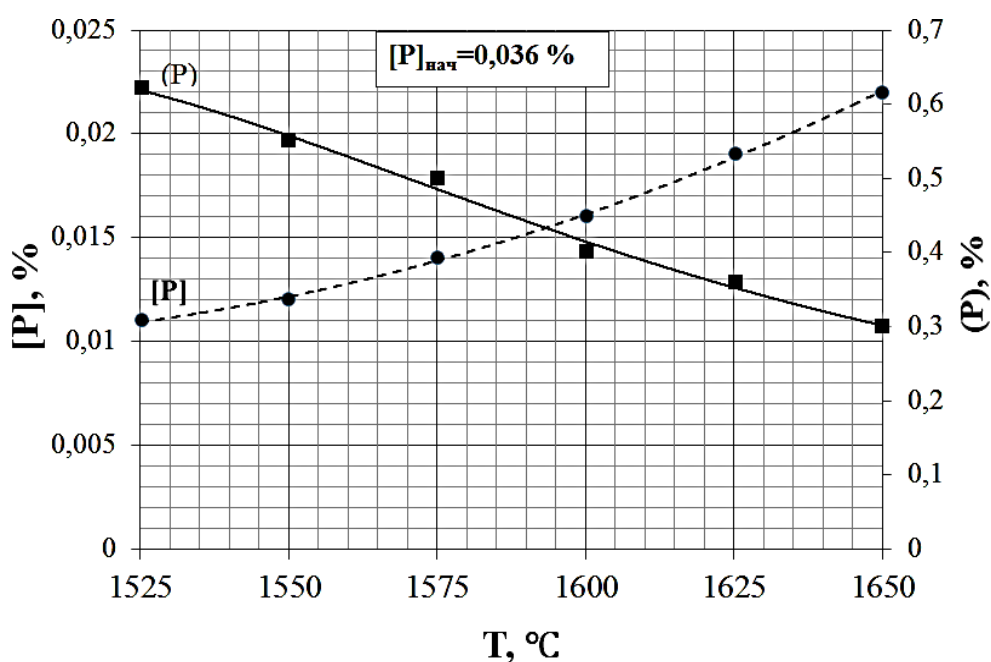


Рисунок 4 – Влияние температуры металла на содержание фосфора в металле и шлаке



Как видно из данных рисунка 4, на плавках с пониженной температурой степень дефосфорации была значительно выше, чем на экспериментах с повышенной температурой. Если при температуре 1525 °С было удалено 70 % фосфора, то на плавках с температурой 1650 °С это значение составило примерно 40 %. Соответственно и доля фосфора, перешедшего в шлак на экспериментах при низкой температуре, была существенно выше, чем при высокой. Содержание фосфора в шлаках при низкой температуре процесса достигало 0,62 %, при высокой - около 0,30 %. При этом баланс по фосфору соблюдался. Полученные данные особенно важны при выплавке стали в ИТП, так как изменять химический состав и физические свойства шлака, как правило, не удается в широких пределах из-за специфических условий индукционной плавки.

На рисунке 5 представлены расчетные (штриховая линия) и экспериментальные (сплошная линия) значения коэффициента распределения фосфора между шлаком и металлом в зависимости от температуры.

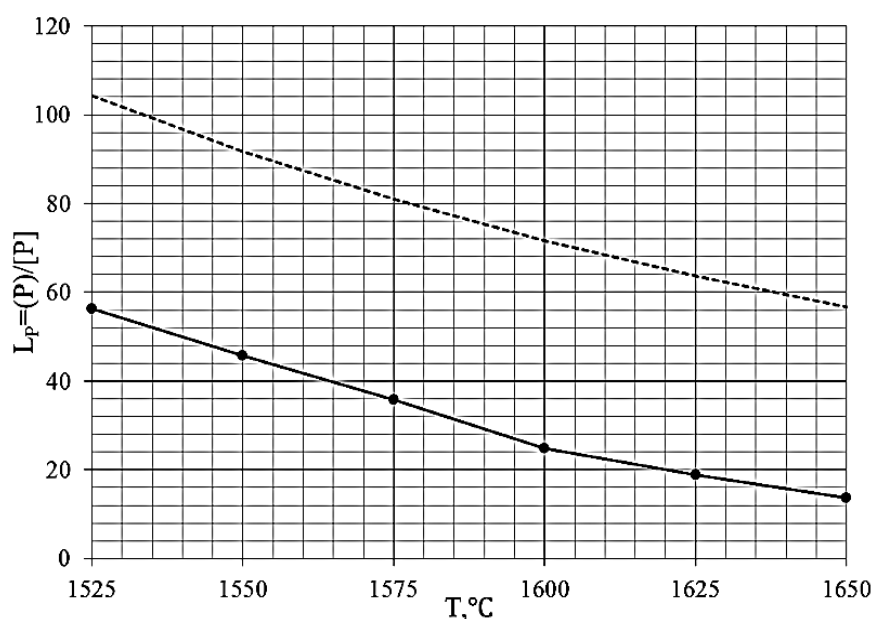
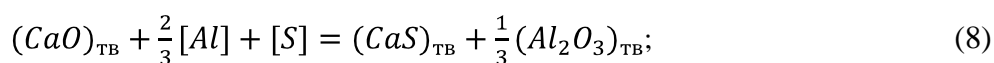


Рисунок 5 – Влияние температуры металла на коэффициент распределения фосфора

Как видно из рисунка 5, на экспериментах с повышением температуры расплава коэффициент распределения фосфора стремительно уменьшался. Такое влияние температуры на процесс дефосфорации, как известно, вызвано термодинамическими параметрами перехода фосфора из металла в шлак. Лучшие результаты наблюдали при 1525 °С. Однако снижение температуры ванны в период скачивания шлака приводило к частичному “намораживанию” металла на стенке тигля. Поэтому технологические операции, связанные с обновлением шлака, целесообразно проводить при температуре около 1550 °С.

Как показали эксперименты при соблюдении условий, связанных с подбором специальных шлаков, контроле температуры ванны и уменьшении высоты мениска, можно добиться существенной дефосфорации стали в ИТП.

В подразделе 3.2 приведены результаты исследования процесса десульфурации стали в ИТП. Как известно, значительное влияние на десульфурацию оказывает окисленность системы. В экспериментах для корректировки окисленности системы использовали алюминий. В этом случае процесс десульфурации с использованием ТШС и алюминия можно описать уравнением реакции (8) и соответствующий константой равновесия (9):



$$K = \frac{a_{(CaS)} \cdot a_{(Al_2O_3)}^{1/3}}{a_{(CaO)} \cdot a_{[Al]}^{2/3} \cdot a_{[S]}}. \quad (9)$$

При проведении процесса десульфурации в ИТП предварительно полностью снимали окислительный шлак. Затем включали печь на мощность 2000 кВт, раскисляли металл кремнием в количестве 49 кг и марганцем 65 кг.

Шлак для десульфурации стали наводили присадками ТШС (на основе извести, плавикового шпата и алюминия), которые подавали на металлический расплав тремя порциями. Для уменьшения мениска зеркала металла и увеличения поверхности контакта металла и шлака, уровень жидкого металла в тигле поднимали выше верхнего витка индуктора. Для предотвращения “захолаживания” шлака жидкую ванну перемешивали металлическим прутом в течение 15 минут, увеличивая реакционную способность шлака.

При достижении температуры металла 1650 °С отбирали пробу шлака на химический анализ. Содержание элементов в шлаке (таблица 10) определяли спектральным атомно-эмиссионным методом с индуктивно-связанной плазмой (АЭС-ИСП).

Таблица 10 – Средний химический состав рафинировочного шлака по 15 плавкам, %

CaO	SiO <sub>2</sub>	FeO	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaF <sub>2</sub>
57,3	9,7	0,2	0,5	22,7	2,9	ост.

Температуру металла, при которой исследовали процесс десульфурации, поддерживали на уровне 1650 °С. Для этого печь переводили в режим термостатирования на 30 мин. Пробы металла отбирали через каждые три минуты. Результаты эксперимента представлены в таблице 11 и на рисунке 6.

Таблица 11 - Изменение содержание серы в стали в зависимости от времени выдержки металла

Параметры	Продолжительность, с										
	0	180	360	540	720	900	1080	1260	1440	1620	1800
$[S]_{\tau}, \%$	0,033	0,030	0,028	0,026	0,024	0,023	0,021	0,019	0,016	0,015	0,015

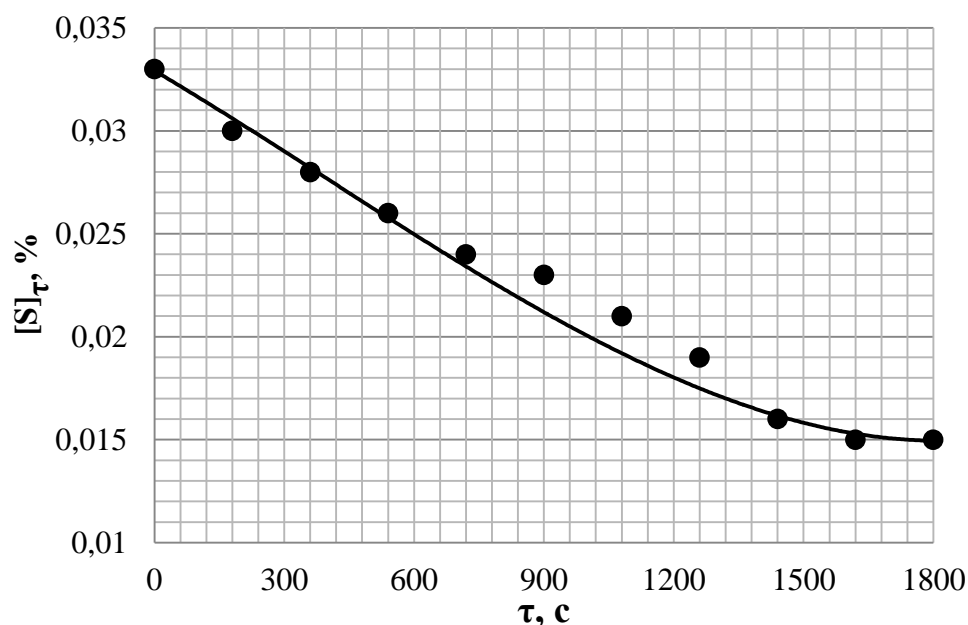


Рисунок 6 - Влияние времени выдержки металла под шлаком в ИТП на содержание серы в стали

Как видно из рисунка 6, с увеличением времени обработки расплава содержание серы в металле уменьшалось. Лучшие результаты наблюдали при обработке расплава в течение 24...30 мин. Дальнейшее время выдержки после 24 мин уже не приводило к столь интенсивной десульфурации стали. Химический состав металла в процессе десульфурации приведен в таблице 12 (результаты типичной плавки). По данной схеме проведено более 100 плавов.

Таблица 12 - Химический состав металла в процессе десульфурации

Элемент	C	Si	Mn	P	S	Al
%	0,207	0,320	1,296	0,019	0,015	0,005

Таким образом, при соблюдении определенных условий: подбор специальных шлаков, придание шлакам большей активности при взаимодействии с металлической ванной (например за счет уменьшения высоты мениска) можно добиться существенной десульфурации металла в ИТП. Эти технологические приемы рекомендованы для использования в промышленных условиях.

**Подраздел 3.3** посвящен исследованию кинетики процесса десульфурации стали 20ГЛ с помощью ТШС в ИТП. При рассмотрении процесса десульфурации стали возникает вопрос о лимитирующей стадии процесса. Мнения исследователей о лимитирующей стадии процесса десульфурации стали неоднозначны, тем более применительно к ИТП.

Исследования, подтвержденные практикой, показывают, что процесс десульфурации в ряде случаев лимитируется диффузией компонентов в шлаке, т.к., скорость диффузионных процессов в шлаке возрастает с повышением температуры и снижением вязкости шлака. Из этого следует важнейшее условие для успешного протекания процесса десульфурации – достаточно высокая температура шлака. При этом часто не учитывается различие термодинамических и технологических условий процесса.

Следует отметить, что ряд исследователей считают, что лимитирующей стадией во всем процессе десульфурации является именно переход серы через границу “металл-шлак”.

В большинстве работ исследовали влияние на кинетику процесса десульфурации начальной концентрации серы в металле, состава металла, величины удельной поверхности контакта металла и шлака, состава шлака и температуры.

При металлургических процессах термодинамические и кинетические условия удаления серы определяются, главным образом, составом металла, вязкостью шлака и температурой. Поэтому ответ на вопрос о лимитирующей стадии этого процесса представляет не только теоретический, но и практический интерес.

Принято считать, что скорость процесса десульфурации описывается уравнением:

$$-d[S]/d\tau = (F/V)k_{\Sigma}([S] - [S]_{\text{рав}})^n, \quad (10)$$

где  $F = \pi \cdot D_m^2/4$  – площадь реакционной зоны на уровне поверхности раздела “металл-шлак” диаметром  $D_m=0,920$  м;  $V = m_m/d_m$  – объем металла в печи массой  $m_m= 6325$  кг и плотностью  $d_m=6800$  кг/м<sup>3</sup>;  $k_{\Sigma}$  – эффективный коэффициент массопереноса, в частности, характеризующий условия перемешивания м/с;  $[S]$  и  $[S]_{\text{рав}}$  – объемное и равновесное со шлаком содержание серы в металле, %;  $n$  – порядок реакции.

Значения эффективного коэффициента массопереноса  $k_{\Sigma}$  при температуре 1923 К находили из кинетической кривой. Порядок реакции  $n$  определен по минимальному значению относительной погрешности коэффициента массопереноса. Установлено, что скорость десульфурации в ИТП лимитируется массопереносом серы в системе “металл-шлак” и описывается уравнением первого порядка:

$$-d[S]/dt = (F/V)k_{\Sigma}([S] - [S]_{\text{рав}}). \quad (11)$$

Принимая  $S \gg [S]_{\text{рав}}$  и интегрируя уравнение (11) в пределах  $S = [S]_{\text{н}} \dots [S]_{\text{т}}$  и  $\tau = 0 \dots \tau$ , получим уравнение (12), описывающее кинетику процесса десульфурации:

$$\ln [S]_{\text{т}}/[S]_{\text{н}} = -F/V \cdot k_{\Sigma} \cdot \tau = -(\pi \cdot D_{\text{м}}^2 \cdot d_{\text{м}} \cdot k_{\Sigma} \cdot \tau)/(4 \cdot m_{\text{м}}). \quad (12)$$

Поскольку для рассматриваемых условий выражение  $\pi \cdot D_{\text{м}}^2 \cdot d_{\text{м}}/(4 \cdot m_{\text{м}}) = \text{const}$  обозначим его через А. После преобразования получим уравнение (13):

$$[S]_{\text{т}}/[S]_{\text{н}} = e^{-k_{\Sigma} \cdot A \cdot \tau}. \quad (13)$$

Используя это уравнение, можно оценить коэффициент массопереноса серы из металла в шлак. Для этого использованы экспериментальные данные, характеризующие снижение содержания серы в металле. Для достижения требуемой десульфурации расплава находили обратным расчетом конечное содержание серы в металле, подбирая значение коэффициента массопереноса, которое обеспечивало бы получение необходимого содержания серы в металле (0,006 %) в течение 1800 с под конкретным шлаком в ИТП. Результаты обработки экспериментальных (таблица 11) и расчетных данных по уравнению (13) для ИТП приведены в таблице 13 и на рисунке 7.

Таблица 13 - Результаты исследования кинетики процесса десульфурации стали в ИТП

Параметры	Продолжительность, с										
	0	180	360	540	720	900	1080	1260	1440	1620	1800
$[S]_{\text{т}}^{\text{факт}}, \%$	0,033	0,030	0,028	0,026	0,024	0,023	0,021	0,019	0,016	0,015	0,015
$[S]_{\text{т}}/[S]_{\text{н}}$	1,000	0,909	0,848	0,788	0,727	0,697	0,636	0,576	0,485	0,455	0,455
$e^{-k \cdot \tau \cdot A}$ при $k_{\Sigma}=6,37 \cdot 10^{-4}$	1,000	0,921	0,849	0,782	0,721	0,664	0,612	0,564	0,519	0,478	0,441
$e^{-k \cdot \tau \cdot A}$ при $k_{\Sigma}=13,2 \cdot 10^{-4}$	1,000	0,844	0,712	0,601	0,507	0,428	0,361	0,305	0,257	0,217	0,183
$[S]_{\text{т}}^{\text{расч}}, \%$ при $k_{\Sigma}=13,2 \cdot 10^{-4}$	0,033	0,028	0,024	0,020	0,017	0,014	0,012	0,010	0,008	0,007	0,006

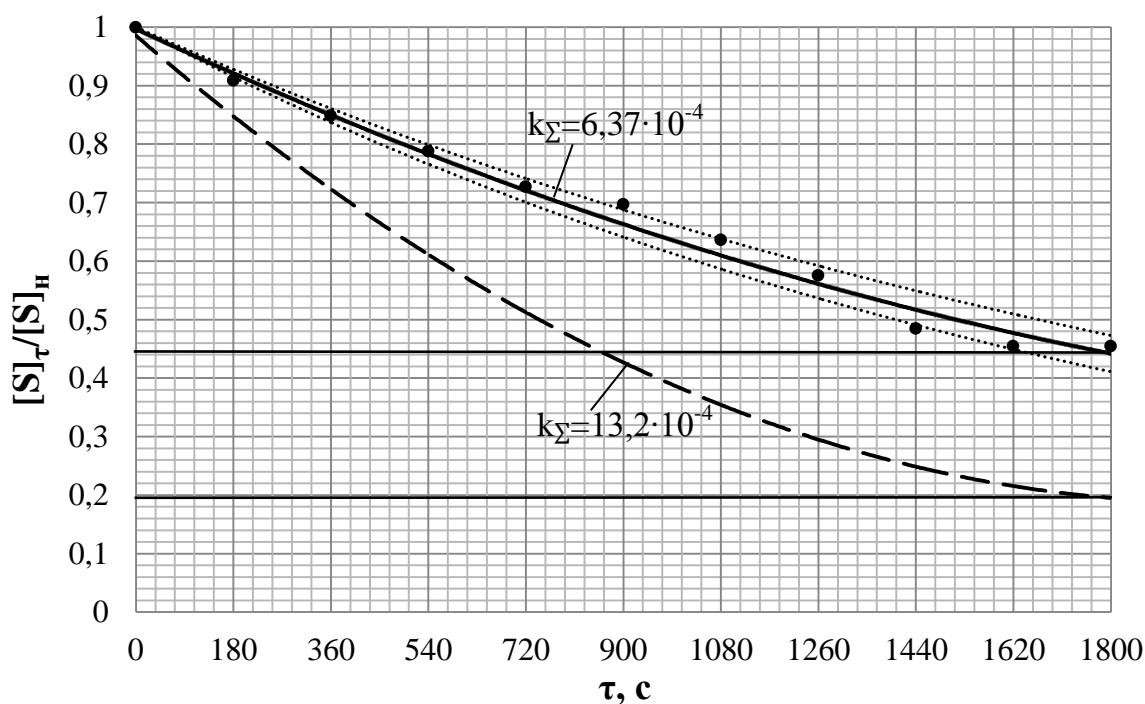


Рисунок 7 – Изменение относительного содержания серы в стали,  $[S]_{\tau}/[S]_n$  в зависимости от времени выдержки металла под шлаком в ИТП ( $k_{\Sigma}=6,37 \cdot 10^{-4}$  м/с и  $k_{\Sigma}=13,2 \cdot 10^{-4}$  м/с – значения эффективных коэффициентов массопереноса. Точки – экспериментальные данные. Линии-расчетные значения)

Для оценки кинетики десульфурации расплава и выбора времени, необходимого для получения заданной конечной концентрации серы в металле, оценивали влияние коэффициента массопереноса на скорость удаления серы. Как видно из данных, приведенных на рисунке 7, скорость десульфурации в реальных условиях процесса может быть описана уравнением первого порядка при эффективном коэффициенте массопереноса серы равно  $6,37 \cdot 10^{-4}$  м/с. Однако это позволяет за 30 мин снизить содержание серы в металле только до 0,015 %. Для снижения содержание серы в металле до 0,006 % за это же время необходимо увеличить скорость десульфурации. Это можно обеспечить за счет увеличения значение коэффициента массопереноса серы, применяя дополнительное перемешивание ванны (например металлическим или графитовым стержнем), продувкой расплава инертным газом и др. Это вывод согласуется с полученными значениями Fruehan R.J. Используя трактовку Fruehan R.J. и полученные им значения эффективного коэффициента массопереноса серы  $2,0 \cdot 10^{-4}$  м/с для слабого перемешивания и  $10,0 \cdot 10^{-4}$  м/с для сильного перемешивания, результаты, полученные в наших условиях,  $6,37 \cdot 10^{-4}$  м/с, можно отнести к интенсивности среднего перемешивания.

В четвертой главе проведено исследование влияния микролегирования стали 20ГЛ РЗМ на ее эксплуатационные свойства.

После проведения процесса десульфурации в ИТП частично снимали восстановительный шлак и металл сливали в ковш. С целью повышения эксплуатационной надежности и улучшения механических свойств металла, сталь в ковше обрабатывали Al, силикокальцием (СК) и РЗМ по четырем различным вариантам, с продувкой аргоном без оголения металла в течение 5 минут. Результаты плавов с использованием РЗМ представлены в таблице 14 и на рисунке 8, которые были сравнены с обычной плавкой без РЗМ.

Таблица 14 - Основные результаты плавов при использовании РЗМ для десульфурации стали 20ГЛ

Вариант обработки	Q <sub>Р</sub> , масс. %	$\tau_{\text{выд}}$ , мин	[S] <sub>кон</sub> , %	[O] <sub>Σ</sub> , %	[Al] <sub>кон</sub> , %	[Ce] <sub>кон</sub> , %
1	Al - 0,1	5	0,015	0,0095	0,026	-
2	1-присадка: Al – 0,1 2-присадка: СК 30 – 0,1	5	0,010	0,0089	0,030	-
3	1-присадка: Al – 0,1 2-присадка: РЗМ – 0,1	5	0,008	0,0082	0,044	0,012
4	1-присадка: Al – 0,1 2-присадка: СК 30 – 0,1 3-присадка: РЗМ – 0,1	5	0,004	0,0021	0,056	0,028

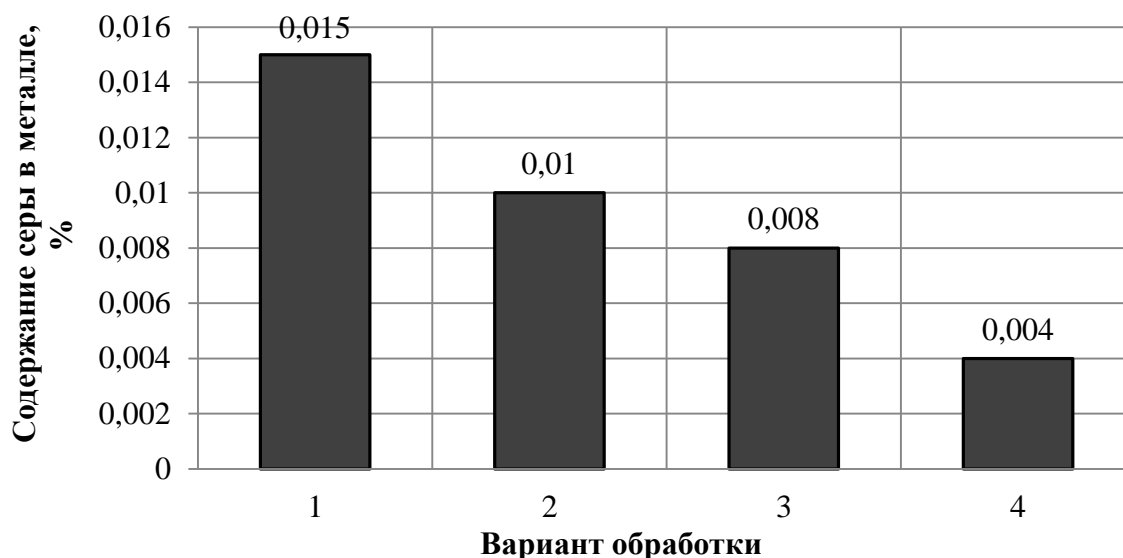


Рисунок 8 - Содержание серы при различных вариантах рафинирования стали марки 20ГЛ

Как видно из данных, приведенных в таблице 12 и на рисунке 8, в зависимости от режима обработки расплава содержание серы в металле снижалось от исходных значений ( $[S]_{\text{нач}}$ ) 0,015% до 0,008...0,004%. За время обработки металла в ковше содержание серы снижалось на 0,011...0,007%, что отвечает степени десульфурации  $(\Delta[S]/[S]_{\text{нач}}) \cdot 100 = 46,7 \dots 73,3 \%$ . Содержание общего кислорода в металле, полученное по варианту 4, в 4,5 раза меньше, чем при использовании технологии по варианту 1.

Плавки, обработанные РЗМ, отличаются более высокой раскисленностью и

степенью десульфурации. Это приводит, прежде всего, к уменьшению количества оксидных, сульфидных и сложного состава неметаллических включений в стали, а также к равномерному распределению их в объеме металла. Устраняется образование включений, располагающихся (как в стали без присадок РЗМ) по границам зерен в виде длинных строчек (рисунок 9, а). В стали с присадкой РЗМ включения получаются мелкодисперсными, при этом связывание серы затрудняет ее ликвацию, о чем свидетельствуют данные (рисунок 9, б), полученные на микроскопе ВХМ 41 LED (OLYMPUS) с увеличением 500 раз.

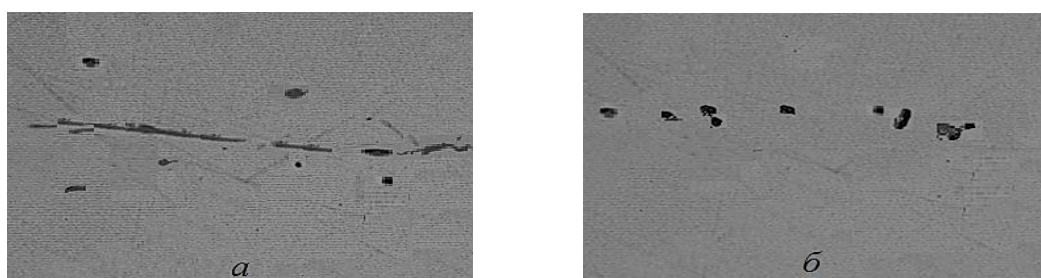


Рисунок 9 – Неметаллические включения в стали 20ГЛ при увеличении 500 раз  
а – без присадок РЗМ (сульфиды марганца); б – с присадкой РЗМ (оксисульфиды РЗМ)

Нормализация (штатная финальная термическая обработка боковых рам тележек грузовых железнодорожных вагонов) задает необходимую пластичность и вязкость литой стали 20ГЛ и препятствует развитию литейных дефектов в раме при эксплуатации подвижного состава. Результаты исследования механических свойств стали 20ГЛ после нормализации приведены в таблице 15.

Таблица 15 - Механические свойства стали марки 20ГЛ

Вариант обработки	Категория свойств				
	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	Временное сопротивление $\sigma_B$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Относительное сужение $\psi$ , %	Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup> (при -60 °С)
	не менее				
ГОСТ	343	510	18,0	30,0	200
БВ	354	506	19,7	32,4	164
БВ	367	517	20,2	34,6	177
1	410	595	25,2	42,7	210
1	387	534	21,0	37,3	221
2	355	527	24,2	35,2	234
3	402	537	24,0	37,9	245
3	370	560	25,0	34,7	250
4	401	548	24,0	38,0	270
4	404	534	24,2	38,1	294
4	360	569	27,0	44,9	317



Как видно из этих данных, наиболее высокие значения по механическим свойствам получили при обработке металла по варианту 4, особенно значение ударной вязкости в 1,5...1.9 раза больше, чем при технологии по базовому варианту (БВ).

Таким образом, результаты исследования качества стали 20ГЛ, обработанной по различным вариантам в ковше, позволяют сделать следующие выводы:

Добавка РЗМ в глубоко раскисленный металл приводит к улучшению его механических характеристик вследствие замены частиц глинозема и сульфидов марганца включениями РЗМ, имеющими очень высокую температуру плавления.

Обработка стали, предварительно раскисленной алюминием, силикокальцием и РЗМ заметно повышает ее механические свойства. При этом происходит снижение (по сравнению с базовой технологией - вариант 1) содержания кислорода и серы в металле вследствие уменьшения количества оксидных и сульфидных включений.

## **ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Аналитический обзор литературы и дополнительные анализы, посвященные причинам излома литых деталей подвижного состава железнодорожного транспорта, свидетельствует, о том, что в месте излома увеличено содержание таких примесей, как сера и фосфор. Значительный объем металла для их изделий выплавляют в ИТП, которые недостаточно приспособлены для осуществления процессов рафинирования за счет использования шлаков. Это определяет актуальность работы, целью которой является повышение качества стали.

2. Проведены исследования по рафинированию стали 20ГЛ в лабораторных условиях. Показано, что эффективным способом рафинирования стали от кислорода и серы является совмещение шлаковой обработки с раскислением алюминием и введением РЗМ. Эти плавки отличаются более высокой степенью десульфурации (до 60...70 %). Получены количественные зависимости, отражающие конечное содержание серы в металле от вариантов обработки, уровня окисленности металла, контролируемой содержанием алюминия в расплаве перед введением РЗМ.

3. На основе результатов лабораторных исследований и теоретического обобщения ранее полученных результатов уточнены термодинамические данные по взаимодействию РЗМ с компонентами расплава. Показано, что константы равновесия реакций взаимодействия РЗМ с серой и кислородом, полученные методом комбинирования, отличаются от ранее известных на 1...5 порядков. Адекватность установленных термодинамических данных подтверждена расчетами и конкретными

экспериментальными данными (лабораторных и полупромышленных экспериментов).

4. Проведены исследования процесса рафинирования стали от фосфора и серы с использованием ТШС в промышленной ИТП вместимостью 6 т. Получены количественные зависимости технологических параметров рафинирования металла, положенные в основу новой технологической инструкции производства стали 20ГЛ. Это позволило обеспечить степень дефосфорации до 65 %. Показано, что для улучшения взаимодействия между металлом и шлаком в ИТП необходимо уменьшить высоту мениска зеркала ванны (например за счет повышения уровня жидкого металла в тигле выше верхнего витка индуктора), чтобы уменьшить возможность “сползания” шлака к стенке тигля и тем самым более эффективно использовать ТШС в ИТП для рафинирования от вредных примесей. Получен металл с существенно меньшим (до 0,015 %) содержанием серы и (до 0,0095 %) общего кислорода по сравнению с действующей технологией.

5. Проведено исследование кинетики процесса десульфурации стали 20ГЛ при использовании ТШС в ИТП. Установлено, что скорость десульфурации стали 20ГЛ в ИТП может быть описана уравнением первого порядка при эффективном коэффициенте массопереноса серы  $6,37 \cdot 10^{-4}$  м/с. Показано, что, уменьшив окисленность металла и увеличив поверхность контакта между металлической и шлаковой фазами, можно существенно снизить содержание серы в металле при плавке стали в ИТП. Установлено, что продолжительность выдержки металла под шлаком при 1650 °С для снижения содержания серы с 0,033 до 0,015%, для данной конкретной установки должна быть не менее 27...30 мин.

6. Проведен термодинамический анализ взаимодействия РЗМ с оксидами алюминия, находящимися в составе футеровки ковша и шлака. Установлено, что при присадке РЗМ в расплав, находящийся в ковше с футеровкой из глинозема ( $Al_2O_3$ ), при недостаточном содержании алюминия в металле происходит восстановления материала тигля. Разрушение футеровки из глинозема может привести к увеличению концентрации алюминия в металле. Поэтому при выборе в качестве модификатора церия целесообразно использовать периклазовую футеровку или перед введением церия сталь раскислять алюминием по верхнему пределу.

7. Проведены исследования по влиянию микролегирования стали 20ГЛ с пониженной долей (до 0,030 %) РЗМ на ее механические свойства. Введение РЗМ позволило получить металл с существенно меньшим содержанием серы (до 0,004 %), общего кислорода (до 0,0021 %), неметаллических включений и значительно (в 1,9 раза) поднять уровень механических свойств, что положено в основу технологии производства стали 20ГЛ в ИТП вместимостью 6 т Ташкентского литейно-механического завода.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Турсунов Н. К., Санокулов Э. А., Семин А.Е. Исследование процесса десульфурации конструкционной стали с использованием твердых шлаковых смесей и РЗМ // Черные металлы. - 2016. №4.- С.- 32-37.
2. Турсунов Н. К., Семин А.Е., Санокулов Э. А. Исследование процессов дефосфорации и десульфурации при выплавке стали 20ГЛ в индукционной тигельной печи с дальнейшим обработкой в ковше с использованием РЗМ // Черные металлы. - 2017. №1.- С.- 33-40.
3. Турсунов Н. К., Семин А.Е., Санокулов Э. А. Исследование в лабораторных условиях и индукционной тигельной печи вместимостью 6 тонн режимов рафинирования стали 20ГЛ с целью повышения ее качества// Тяжелое машиностроение. - 2017. № 1-2. - С.- 47-54.
4. Турсунов Н. К., Семин А.Е., Котельников Г. И. Кинетические особенности процесса десульфурации при выплавке стали в индукционной тигельной печи // Черные металлы. - 2017. №5. – С. 23-28.
5. Турсунов Н. К., Семин А.Е., Санокулов Э. А. Исследование процессов дефосфорации и десульфурации при выплавке стали 20ГЛ в индукционной тигельной печи // Сборник трудов XIV международного конгресса сталеплавателей. Москва - Электросталь, 2016. - С. -272-276.