



ДЗЮБА АНДРЕЙ ВИКТОРОВИЧ

**НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ЗАМАСЛЕННОЙ ОКАЛИНЫ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ**

Специальность 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких металлов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Магнитогорск – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Научный руководитель:

Харченко Александр Сергеевич,
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Загайнов Сергей Александрович,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»,
профессор кафедры металлургии железа
и сплавов

Витькина Галина Юрьевна,
кандидат технических наук, ФГБУН
«Институт металлургии имени
академика Н.А. Ватолина Уральского
отделения Российской академии наук»,
ведущий научный сотрудник и
заведующая лабораторией
пиromеталлургии восстановительных
процессов

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский
государственный университет»
(национальный исследовательский
университет), г. Челябинск

Защита состоится 15 декабря 2026 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 24.2.324.01, на базе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, малый актовй зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на сайте <https://www.mgtu.ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Мезин Игорь Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Согласно Распоряжениям Правительства Российской Федерации № 84-р от 25 января 2018 г. и № 309 от 7 мая 2024 г. в рамках национального проекта «Экологическое благополучие» и стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года приоритетными направлениями в рамках реализации курса на устойчивое развитие российского государства являются: ресурсосбережение, обеспечение экологической безопасности, рационального использования природных ресурсов и охраны окружающей среды. Одной из нерешенных задач на федеральном и региональном уровнях, в частности в чёрной металлургии, является создание технологии, позволяющей минимизировать количество захораниваемых техногенных отходов. Одним из таких отходов является мелкодисперсная замасленная прокатная окалина крупностью частиц до 0,1 мм с содержанием масла до 30%. В основном данный отход складировается в шламонакопителях, отстойниках и отвалах. На металлургических предприятиях России скопилось более 15 млн. тонн замасленной окалины. Ежегодно это количество увеличивается на 500–600 тыс. тонн. В результате деятельности металлургических заводов каждый год количество этого отхода увеличивается на 5-50 тыс. т на одном предприятии.

Существующие способы утилизации замасленной окалины предполагают предварительное удаление масла до его содержания в количестве менее чем 0,5%, после чего обезмасленную окалину предполагается использовать в составе агломерационной шихты или брикетов. Однако, известные технологии по удалению масла имеют ряд существенных недостатков, связанных с дополнительным оборудованием; временем подготовки; дополнительным хранением и утилизацией извлечённых органических соединений; очищением загрязнённой воды. Использование окалины с содержанием масла более 0,5% в составе агломерационной шихты приводит к налипанию сажи на лопатки роторов эксгаустеров агломерационных машин, что приводит к их поломке.

Одним из направлений утилизации и переработки замасленной окалины является загрузка ее в металлическом контейнере в доменную печь без предварительного обезмасливания. Это позволяет использовать масло в качестве восстановителя в доменной печи для уменьшения удельного расхода кокса. Однако, данное решение не было реализовано в промышленности. Сложность вызывают транспортировка ее до доменной печи, в том числе выгрузка из бункера добавочных материалов, оснащенного вибрационным питателем, на пластинчатый конвейер, режимы загрузки в колошниковое пространство, поведение паров масла в верхней зоне интенсивного теплообмена доменной печи.

В связи с этим, на сегодняшний день, направление, связанное с созданием безотходного производства – замкнутого оборота металла в промышленности путем утилизации и переработки замасленной окалины прямой загрузкой в доменную печь без предварительного обезмасливания является актуальным.

Диссертационная работа выполнена по тематике хоздоговорной НИР ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» и при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FZRU-2026-0003).

Степень разработанности темы исследования

Проведенный литературный обзор современных решений по утилизации и переработке замасленной окалины показал целесообразность разработки научно-обоснованного способа утилизации замасленной окалины прямой загрузкой в доменную печь без предварительного обезмасливания. Для этого необходимо дополнительное изучение её теплофизических и физико-химических свойств с выявлением пределов горизонта по высоте доменной печи для начала испарения масла из окалины, температуры равновесия замасленной окалины и железорудного сырья при совместном движении от колошника до горна, а также оценка возможности эффективной утилизации замасленной окалины в технологии производства чугуна в доменных печах.

Объект исследования – замасленная окалина.

Предмет исследования – теория и технология переработки замасленной окалины в доменной печи.

Цель работы – научно-технологическое обоснование применения замасленной окалины в качестве компонента шихты доменной печи, обеспечивающей уменьшение выбросов в окружающую среду загрязняющих отходов нефтепродуктов.

Задачи:

1. Исследовать физико-механические, теплофизические и физико-химические свойства замасленной окалины, упакованной в металлический контейнер.
2. Установить горизонт по высоте доменной печи, при котором замасленная окалина достигает температуру начала испарения масла и температуру равновесия замасленной окалины и железорудного сырья при совместном движении от колошника до горна.
3. Оценить степень окисления паров масла замасленной окалины внутри металлического контейнера, степень деструкции масла на слое железорудного сырья при нагреве, и распределение остатков масла между различными видами отходов газоочистки доменного производства: пылью, шламом и шламовой водой.
4. Разработать рациональный режим загрузки замасленной окалины в доменные печи и провести промышленный эксперимент по ее загрузке в колошниковое пространство доменной печи.

Научная новизна

1. Установлены пределы горизонта по высоте доменной печи для начала испарения масла из окалины и температуры равновесия замасленной окалины и железорудного сырья при совместном движении от колошника до горна. Замасленная окалина достигает температуру начала испарения масла, равную 230 °С на высоте от 87 % до 94 % от оси фурменного очага в зависимости от содержания воды в окалине. Температура замасленной окалины выравнивается с температурой железорудного сырья на уровне доменной печи, соответствующем 912-932 °С.
2. Определено влияние аммиачной селитры NH_4NO_3 на окисление паров масла окалины при температуре более 230 °С. Введение окислителя NH_4NO_3 в количестве 40% от массы замасленной окалины обеспечило повышение степени деструкции масла с 74,8% до 93%.
3. Дополнены закономерности по формированию шихтовых материалов в колошниковом пространстве печи, при использовании в ее составе замасленной окалины. Загрузка ее в первый или второй рудный скип после железорудного сырья

обеспечивает формирование слоя в зоне рудного гребня и на периферии колошника, включающего от 60 до 77 % контейнеров с замасленной окалиной от их расхода.

Практическая ценность и реализация результатов

Впервые проведены промышленные испытания по загрузке замасленной окалины с содержанием масла до 30%, упакованной в металлический контейнер, в доменную печь № 8 ПАО «ММК». Разработанные принципы могут послужить основой для эффективной утилизации и переработки замасленной окалины в доменных печах в количестве до 50 тыс. т/год на одном предприятии без предварительного обезмасливания. Данный результат способствует поддержанию экологически и технически безопасного режима обращения с техногенными отходами металлургического производства для обеспечения технологически максимально возможного снижения степени экологической опасности, уровня негативного воздействия отходов на здоровье человека и окружающую среду.

Результаты работы внедрены в учебный процесс: в аспирантуре, магистратуре, бакалавриате при выполнении обучающимися выпускных, курсовых и исследовательских работ.

Методология и методы исследования

Для изучения теплофизических и физико-химических свойств замасленной окалины использованы автоматизированный комплекс производства фирмы LECO и муфельная печь (лаборатория каф. МиХТ МГТУ им. Г.И. Носова).

Химический состав замасленной окалины определен на рентгеновском энергодисперсионном спектрометре ARL QUANT'X компании Thermo Scientific (Лаборатория спектральных методов анализа кафедры Металлургии и химических технологий «МГТУ им. Г.И. Носова», Магнитогорск).

Для идентификации фазового состава замасленной окалины были проведены исследования методами рентгеноструктурного анализа на приборе «SHIMADZU XRD-7000» и определения тепловых эффектов на синхронном термоаналитическом приборе STA (Iupiter 449 F3) фирмы NETZSCH (лаборатория каф. ЛП и М МГТУ им. Г.И. Носова).

Испытания замасленной окалины, упакованной в металлический контейнер, на прочность на сжатие проводили с использованием универсальной испытательной машины ИР 5082-100, прикладывая нарастающую нагрузку до 10 т при скорости хода траверсы 15 мм/мин.

Полученные данные обработаны математически с использованием программного пакета Microsoft Excel.

Положения, выносимые на защиту:

На защиту выносятся следующие новые научные результаты:

1. Результаты теоретического расчёта горизонта по высоте доменной печи для начала испарения масла из окалины и температуры равновесия замасленной окалины и железорудного сырья при совместном движении от колошника до горна.
2. Результаты физического моделирования по утилизации замасленной окалины применительно к технологии производства чугуна в доменных печах.
3. Результаты совместной загрузки замасленной окалины с железорудным сырьем в колошниковое пространство доменной печи.

Достоверность полученных результатов

Подтверждается использованием ГОСТ Р 51947-2002 при исследовании проведенному на рентгенофлуоресцентном анализаторе серы в нефтепродуктах Спектроскан-S, ГОСТ 32517.1-2013 (ISO 2597-1:2005) и ГОСТ Р 53657-2009 при химическом анализе проб замасленной окалины, применением автоматизированного комплекса физико-химических исследований фирмы LECO, современных идентификаторов фазового состава, обработкой данных с использованием современных математических программных пакетов.

Личный вклад автора

Все результаты, приведенные в диссертации, получены самим автором и при его непосредственном участии. Вклад автора заключается в формулировании цели и задач исследования, организации и проведении лабораторных и промышленных экспериментов, анализе и интерпретации результатов исследования, разработке режима загрузки и способа повышения степени утилизации масла в доменной печи, формулировке основных положений и выводов.

Апробация работы

Основные положения работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: XIX Международной конференции «Современные проблемы электрометаллургии стали», Аша, 2024 г.; XXII Менделеевского съезда по общей и прикладной химии, 2024; XVIII Международном конгрессе сталеплавыльщиков и производителей металла «От руды до стали», Санкт-Петербург, 2025; Международной конференции «Качество стали – от руды до проката», Москва, 2024; XV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Иркутск, 2025; VI Конгресса с международным участием «Техноген 2023», Екатеринбург, 2023; 81-й, 82-й, 83-й и 84-й международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (Магнитогорск, 2023, 2024, 2025, 2026 гг.); XII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2024) с международным участием «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве», Екатеринбург, 2024; Международной научной конференции «Физико-химические основы металлургических процессов имени академика А.М. Самарина», Екатеринбург, 2025.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 18 научных трудов, из них 4 статьи – в рецензируемых журналах из перечня изданий, рекомендованных ВАК РФ

Соответствие диссертации научной специальности

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.6.2. Металлургия черных, цветных и редких металлов по п.1 «Рудное, нерудное, техногенное и энергетическое сырье», п.2 «Твердое и жидкое состояние металлических, оксидных, сульфидных, хлоридных и смешанных систем», п.7 «Рециклинг материалов, переработка отходов производства и потребления», п.9 «Энергосбережение, утилизация отходов металлургического производства, снижение выбросов, в том числе парниковых газов», п.12 «Газо- и аэродинамика в металлургических агрегатах», п.13 «Тепло- и массоперенос в низко- и высокотемпературных процессах», п.16 «Твердофазные процессы в получении черных, цветных и редких металлов», п.17 «Пирометаллургические процессы и агрегаты».

Структура и объем работы

Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка из 167 наименований и одного приложения. Она изложена на 136 страницах печатного текста, содержит 38 рисунков, 23 формулы и 34 таблицы.

Основное содержание работы

Во введении обозначена актуальность тематики исследований, сформулированы цель работы, задачи, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе проведен обзор научной и технической литературы по вопросам утилизации образующихся на металлургическом предприятии железосодержащих мелкодисперсных отходов в виде замасленной прокатной окалины с содержанием технических масел в количестве до 30% и способам её предварительного обезмасливания.

Проведённый анализ проблемы переработки замасленной окалины в агломерационном процессе или брикетировании после предварительного удаления масла показал необходимость всестороннего исследования способа утилизации замасленной окалины прямой загрузкой в доменную печь без предварительного обезмасливания. Выявлено, что необходимо разработать режимы загрузки замасленной окалины в доменные печи, используя пределы горизонта по высоте доменной печи для начала испарения масла из окалины и физическое моделирование влияния масла на состав колошниковой пыли, шлама и воды. Исходя из результатов проведённого анализа, сформулированы основные цели и задачи настоящего исследования.

Во второй главе описаны методики и результаты исследований физико-механических и теплофизических свойств, установлены пределы по высоте доменной печи, в которых масло начинает испаряться из окалины и рассчитаны температуры равновесия замасленной окалины и железорудного сырья при совместном движении от колошника до горна.

Определен химический состав минеральной части замасленной окалины (таблица 1) с применением рентгеновского энергодисперсионного спектрометра ARL QUANT_X.

Таблица 1 – Химический состав минеральной части замасленной окалины

Элемент/оксид	Fe _{общ}	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	S
Массовая доля, %	69,5	1,18	0,95	0,10	0,20	1,14	0,116

Установлен минералогический состав окалины с использованием метода рентгенофазового анализа, выполненного на дифрактометре SHIMADZU XRD-7000 на $\text{CuK}\alpha$ -излучении со стандартным фильтром K_β . Непрерывная съемка дифрактограмм (рисунок 1) осуществлялась в диапазоне углов $30 \dots 130^\circ$, со скоростью $1^\circ/\text{мин}$ при силе тока - 30 мА, напряжении - 40 кВ.

По результатам расшифровки дифрактограммы, в окалине надежно идентифицируются две фазы: магнетит (Fe_3O_4) и вюстит (FeO). Магнетит является преобладающим минералом окалины (ориентировочно его содержание составляет около 90 %), вюстита 3-5 %.

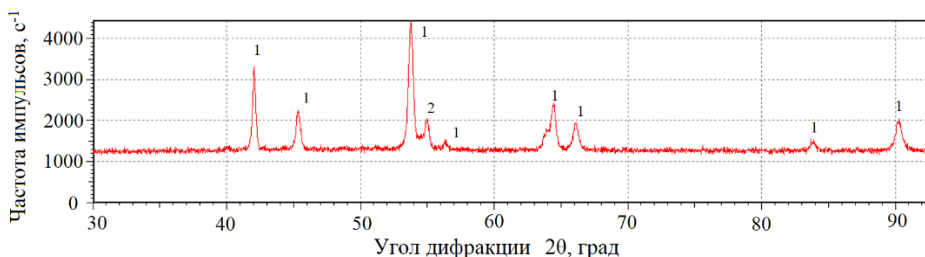


Рисунок 1 – Рентгеновская дифрактограмма замасленной окалины, где 1 - Fe_3O_4 , 2 – FeO .

Исследовано сопротивление деформации металлического контейнера размером 85х83,4 мм с замасленной окалиной, агломерата фабрики ПАО «ММК» и окатышей Михайловского ГОК в холодном состоянии и после восстановления их при температуре 700 °С. Испытания проводили на универсальной испытательной машине ИР 5082-100. Установлено, что предельная нагрузка металлической упаковки с замасленной окалиной в холодном состоянии, равная 986 кПа, превышает в 70 раз нагрузку, которую испытывает в доменной печи порция шихты при размещении на ней материалов массой, соответствующей одной подачи.

Предельная нагрузка металлической упаковки с замасленной окалиной после восстановления в среде водорода, равная 17632 кПа, приближена к предельной нагрузке для агломерата, превышает предельную нагрузку окатышей более чем в 2 раза и ограничена возможностями используемой испытательной машины, составляющей 10 тонн на один металлический контейнер.

Установлены пределы по высоте доменной печи, в которых масло начинает испаряться из окалины. Для этого в расчетах использованы характеристики замасленной окалины, определенные в лаборатории кафедры МиХТ ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

Базовая теплоёмкость замасленной окалины составляла от 781 до 1100 Дж/(кг · °С) в зависимости от содержания в ней воды и масла. Кажущаяся теплоемкость замасленной окалины, учитывающая фазовые переходы, находилась в интервале от 545 до 3763 Дж/(кг · °С) – таблица 2.

Таблица 2 - Тепловые эффекты фазовых переходов и кажущаяся теплоёмкость

T, °С	Тепловой эффект фазового перехода (q), кДж/кг	Кажущаяся теплоёмкость ($C_{\text{каж}}$), Дж/(кг · °С)
65-148	-230,3	3763
221-329	+25,4	545
401-487	-16,3	1029
570-616	-12,8	1108
745-847	-75,6	1691
1101-1184	-10,5	1226

Рассчитали ее с использованием тепловых эффектов и потерь массы, полученных путем дифференциально-сканирующей калориметрии и термогравиметрии замасленной окалины на синхронном термоаналитическом приборе STA (Jupiter 449 F3) фирмы NETZSCH (рисунки 2 и 3). Результирующий тепловой эффект в интервале температур от 230 °C до 480 °C являлся слабо экзотермическим и составлял 25,4 кДж/кг.

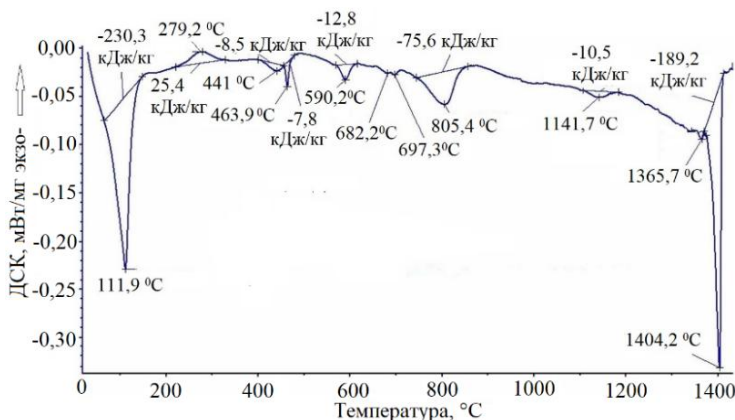


Рисунок 2 – Дифференциально-сканирующая калориметрия (ДСК) замасленной окалины

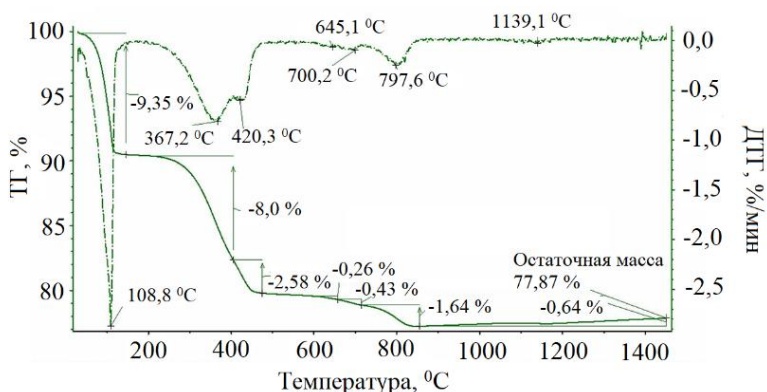


Рисунок 3 – Термогравиметрия (ТГ) образца замасленной прокатной окалины, где: сплошная линия – интегральная термогравиметрическая кривая (ТГ), прерывистая линия – дифференциальная термогравиметрическая кривая (ДТГ)

Согласно рисунку 2, наибольшее поглощение тепла происходило в температурных интервалах 65-148 °C (испарение воды) и 1367-1412 °C (плавление вюститита при продолжающемся восстановлении FeO до Fe). В указанных

температурных промежутках энтальпия окалины снижалась на 230,3 кДж/кг и 189,2 кДж/кг соответственно. Поглощение тепла за счет испарения масла, протекающего постепенно в интервале температур от 230 °С до 480 °С, полностью скомпенсировано экзотермическим эффектом процессов кристаллизации аморфной фазы, протекающих в том же температурном интервале.

В точке Кюри магнетита (590,2 °С) уменьшение энтальпии составило 12,8 кДж/кг. В интервале температур от 745 °С до 847 °С энтальпия существенно снижалась на 75,6 кДж/кг из-за восстановления магнетита до вюстита остаточным углеродом. При локальном восстановлении FeO до металлического железа при температуре 1141,7 °С уменьшение энтальпии составило 10,5 кДж/кг.

Теплопроводность замасленной окалины, определенная путем сопоставления результатов теоретического расчета по известным методикам с экспериментальными данными в муфельной печи в температурном интервале 0-200 °С, составляла 8-10 Вт/(м · °С). Для температуры выше 600 °С ее величину приняли 0,5 - 0,7 Вт/(м · °С). Коэффициент теплоотдачи (α_v) и коэффициент теплопередачи (K_v) рассчитали по известным формулам 1, 2. Полученные результаты сравнили с расчётом для железорудного сырья (таблица 3).

$$\alpha_v = 186(W_z^{0,9} \cdot \frac{T^{0,3}}{d^{0,75}}) \cdot M \quad (1)$$

α_v - Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м³ · К)

W_z – Скорость газа, м/с

T – средняя температура газов, К

M – коэффициент, зависящий от газопроницаемости шихты

d – диаметр материала, м

$$K_v = \left(\frac{1}{\alpha_v} + \frac{R^2}{9\lambda} \right)^{-1} \quad (2)$$

K_v - Коэффициент теплопередачи, Вт/(м³ · К)

α_v - Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м³ · К)

λ - Теплопроводность, Вт/(м·К)

R – Радиус материала, м

Таблица 3 - Теплофизические показатели замасленной окалины и железорудного сырья

Параметры	Замасленная окалина		ЖРС	
	до 200 °С	выше 600 °С	до 200 °С	выше 600 °С
Коэффициент, Вт/(м ³ · К):				
теплоотдачи (α_v)	1272-1499	1802-2108	4252-5014	6026-7050
теплопередачи (K_v)	936-1236	1046-1142	4211-4957	5944-6937
Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	8-10	0,5-0,7	5-6	2-3,5

В температурном интервале до 200 °С средняя теплопроводность замасленной окалины превышает среднюю теплопроводность железорудного сырья в 1,5 раза, так как в окалине присутствуют вода и масло, которые увеличивают теплопроводность мелкодисперсного сыпучего материала. После 600 °С средняя теплопроводность замасленной окалины в 7 раз меньше средней теплопроводности железорудного

сырья, на что влияют несколько факторов. Крупность металлического контейнера значительно превышает крупность железорудного сырья, а также после испарения воды и масла образуется пустое пространство в контейнере, которое занимает 30% от объёма контейнера и повышает пористость окалины. В результате, коэффициент теплоотдачи и коэффициент теплопередачи замасленной окалины получили меньше, чем у железорудного сырья в 3,7 и 6,1 раза соответственно.

Таким образом, применив кажущуюся теплоёмкость, теплопроводность, коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи замасленной окалины в известной методике Китаева Б.И. по расчету температуры в доменной печи, установлено:

- замасленная окалина достигает температуру начала испарения масла, равную 230 °С, на высоте доменной печи в пределах от 87 % до 94 % от оси фурменного очага в зависимости от содержания воды в окалине от 20 до 0 % соответственно;
- температуры равновесия замасленной окалины и железорудного сырья при совместном движении от колошника до горна составляет 912-932 °С.

В третьей главе представлены результаты физического моделирования по утилизации замасленной окалины применительно к технологии производства чугуна в доменных печах.

Оценили распределение масла замасленной окалины между различными видами отходов газоочистки доменного производства: пылью, шламом и шламовой водой, посредством физического моделирования на установке (рисунок 4) с использованием вертикальной трубчатой электропечи с соблюдением критерия Рейнольдса соответствующего зоне рудного гребня в доменной печи № 8 ПАО «ММК».

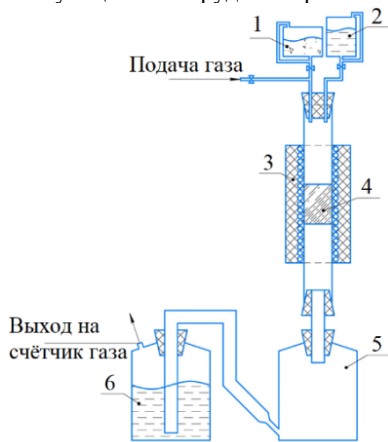


Рисунок 4

Схема экспериментальной установки для физического моделирования влияния масла на состав колошниковой пыли, шлама и воды, где:

- 1 – резервуар со смесью колошниковой пыли и шламом ВФУ;
- 2 – резервуар с маслом;
- 3 – лабораторная электрическая трубчатая печь;
- 4 – слой железорудного сырья;
- 5 – бутылка для «сухого» улавливания пыли;
- 6 – бутылка с водой для «мокрого» улавливания шлама

Для этого в ток аргона с расходом 70 л/мин порционно подавали масло, предварительно экстрагированное из окалины, массой 15 г/опыт, смесь, имитированную по компонентному и фракционному составам колошниковой пыли и шламом вакуумнофильтрационной установки общей массой 75 г/опыт в соотношении 36:64. Полученную пылегазовую смесь пропускали через слой агломерата и окатышей крупностью 10-12 мм массой 0,6 кг, нагретых до 500 °С в течение 150 минут. Отношение массы железорудного сырья к количеству масла подаваемого в одну

порцию имитировало слой железорудного сырья, располагающегося над окалиной в момент начала возгонки масла в доменной печи.

Распределение масла было следующим, % от исходного количества:

- 74,8% разложилось на слое железорудного сырья, соответствующего трем подачам;

- 9,1% перешло в колошниковую пыль;

- 15,9% перешло в шлам вакуумнофильтрационной установки;

- масло отсутствовало в воде мокрой газоочистки;

- 0,2% (30 мг) масла проходило мокрую газоочистку в форме аэрозоля.

От 50 до 75 % масла разложилось на слое железорудного сырья массой 9,9 кг при проведении укрупненных опытов в стальном реакторе, нагреваемом до температуры 500 °С при скорости 10 °С/мин, в токе аргона 70 л/мин в электрической печи LECO объемом 15 дм³, где над металлическим контейнером с замасленной окалиной массой 100 г размещали агломерат и окатыши крупностью 10-12 мм.

Химический состав парогазовой смеси после деструкции масла на слое железорудного сырья при их нагреве в реакторе печи LECO, определенный с использованием газохроматографического комплекса «Хроматэк Кристалл 5000», приведен в таблице 4.

Таблица 4 – Состав газовой фазы после деструкции масла на слое железорудного сырья

Наименование параметра		Температура отбора пробы, °С		
		400	450	500
Содержание, % (об.):	H ₂	90,51	65,61	52,53
	CO	2,32	5,23	13,2
	CO ₂	0,22	0,33	0,76
	CH ₄	6,81	28,38	33,2

Дополнительно в этих экспериментах оценили содержание бензо(а)пирена входящего газе. Замер осуществили при помощи эксперта испытательной лаборатории ООО «Уральский центр Техносферной безопасности» с использованием метеометра МЭС-200А.

Количество бензо(а)пирена до и после водной газоочистки в пересчёте на объём колошникового газа составило 0,000097 мг/м³ и 0,000032 мг/м³ соответственно. Данный результат в несколько раз меньше предельно допустимой концентрации (ПДК) бензо(а)пирена в воздухе рабочей зоны в соответствии с ГН 2.2.5.3532-18 (гигиенические нормативы «Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны») – не более 0,00015 мг/м³.

Для исключения возможного попадания масла в колошниковую пыль и шлам вакуумнофильтрационной установки разработали мероприятия, повышающую эффективность использования паров масла внутри доменной печи. Исследовали процессы деструкции и окисления паров масла внутри металлического контейнера. Для этого в муфельной печи нагревали замасленную окалину до температуры 600 °С со скоростью 10 °С/мин в смеси с одним из следующих материалов, % от массы окалины:

- железорудное сырьё (агломерат, окатыши и их смесь) – до 100 %;
- пероксид водорода (с концентрацией H₂O₂ 33%) – до 100 %;

- перманганат калия (KMnO_4) – 15 %;
- селитра: аммиачная (NH_4NO_3) – до 40%;
натриевая (NaNO_3) – до 50%;
кальциевая ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) – 15%.

Наиболее эффективным являлась аммиачная селитра с температурой разложения равной 210°C в количестве 40% реагента от массы замасленной окалины. Ее использование обеспечило сгорание 75 % масла в металлическом контейнере. Если учесть, что 50 % - 74,8 % паров масла разлагается в процессе фильтрации его через слой шихтовых материалов, располагающихся над горизонтом начала его испарения, то общая степень сгорания и разложения масла достигает 93 %.

Рассчитали соотношения между выделившимися веществами и колошниковым газом. Расчет проводили для условий работы доменной печи №8 ПАО «ММК». Оценочный расчет вели на одни сутки работы печи при двух условиях:

- без применения окислителей при условии частичного разложения масла на слое железорудного сырья;
- с применением окислителя при условии частичного разложения масла на вышележащем слое агломерата.

Доля остаточных паров масла от объема колошникового газа без использования реагентов и при использовании 40% аммиачной селитры от массы загружаемой замасленной окалины при степени разложения масла 74,8% в результате фильтрации через вышележащий слой железорудного сырья составила 0,00015% и 0,00006% соответственно.

Определили в лаборатории кафедры МиХТ ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» физико-химическое состояние контейнера с замасленной окалиной при температуре 1200°C в присутствии избытка кокса. Химический состав чугуна, выплавленного из замасленной окалины, упакованной в металлический контейнер, в индукционной печи представлен в таблице 5.

Таблица 5 – Химический состав чугуна, полученного в результате восстановления и расплавления металлического контейнера с замасленной окалиной при температуре 1200°C в избытке кокса

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Cu	Ti	V
94,15	3,97	0,86	0,11	0,039	0,4075	0,0575	0,1625	0,008	0,19	0,008	0,0025

В четвертой главе сформулированы принципы формирования смеси компонентов шихты для загрузки в колошниковое пространство при использовании в ее составе замасленной окалины, упакованной в металлический контейнер, обеспечивающие эффективное проведение промышленного эксперимента по ее загрузке в колошниковое пространство доменной печи № 8 ПАО «ММК». Они включают:

- рациональный режим загрузки замасленной окалины, упакованной в металлический контейнер, в доменную печь с конусным загрузочным устройством в смеси с железорудными материалами;
- крупность контейнерного сыпучего материала, удовлетворяющую требованию системы загрузки в условиях обеспечения минимизации затрат на упаковку тонны материала;

- логистику замасленной окалины от места ее упаковки до доменной печи с формированием штабеля материалов в цехе подготовки агломерационной шихты (ЦПАШ), включающую размещение окалины на подовше, состоящей из окатышей;
- соотношение объемов окатышей и металлических контейнеров, обеспечивающие требуемую подвижность смеси при выгрузке их из бункера добавок, оснащенного вибрационным питателем, на пластинчатый конвейер.

Физическим моделированием оценили распределение замасленной окалины по зонам загрузки доменной печи. Эксперимент проводили на модели двухконусного загрузочного устройства, изготовленной в масштабе 1:35 по отношению к линейным размерам КЗУ доменной печи № 8 ПАО «ММК» объемом 1370 м³. Рациональное распределение замасленной окалины по радиусу обеспечивали ее загрузкой в первый или второй рудный скип после железорудного сырья режима загрузки РРКК, что позволило сформировать слой в зоне рудного гребня и на периферии колошника, включающего от 60 до 77 % окалины от её общего объема в подаче.

Крупность контейнерного сыпучего материала должна быть максимально возможной для минимизации затрат на упаковку путём уменьшения доли пустот возле боковых и торцевых стенок от общего объема загружаемого в контейнер материала. Верхний предел крупности ограничен условиями логистики ее от вагона-хоппера (рисунок 5 а, б) до колошника доменной печи, в связи, с чем приближен к максимальной фракции кокса. Таким образом, в соответствии со сформулированным принципом для упаковки замасленной окалины выбрали металлический контейнер размером 85х83,4 мм.



Рисунок 5 – Логистика замасленной окалины (а – выгрузка из вагона-хоппера в бункер; б – выгрузка из бункера с вибрационным питателем на пластинчатый конвейер; в – выгрузка в ЦПАШ; г – схематичное размещение материалов в скипе: 1 – железорудное сырье; 2 – металлический контейнер с замасленной окалиной)

Проведением промышленных испытаний по загрузке замасленной окалины, упакованной в металлические контейнеры, в колошниковое пространство доменной печи № 8 ПАО «ММК» определили принципы формирования смеси. Требуемую подвижность металлических контейнеров при выгрузке из бункера добавочных материалов, оснащенного вибрационным питателем на пластинчатый конвейер (рисунок 5 б) обеспечивали соотношением объемов окатышей и металлических контейнеров, равных 3 к 1. Заданную смесь получили формированием штабеля материалов в ЦПАШ: расположением металлических контейнеров с замасленной окалиной массой одна тонна на подовше из окатышей (рисунок 5 в), что

предотвращает появление негативных последствий в случае разгерметизации металлического контейнера.

Изучением показателей работы доменной печи №8 объемом 1370 м³, оснащённой конусным загрузочным устройством, исследовали изменение показателей хода доменного процесса при введении в состав железорудной части шихты одной тонны замасленной окалины, упакованной в металлический контейнер. Замасленную окалину загружали во второй рудный скип системы загрузки РРКК↓ после агломерата и окатышей. Размещение материалов во втором рудном скипе соответствовало рисунку 5 (г) и сопровождалось размещением окалины в середине объема железорудного сырья в межконусном пространстве. Согласно физическому моделированию, такое размещение обеспечивало поступление 37 % окалины в зону рудного гребня и 23 % на периферию колошника от её общего объема в подаче.

В исследуемый период основные технологические показатели работы доменной печи № 8 ПАО «ММК» были следующими:

Удельный расход кокса (сухого, скипового) – 399,5-401,3 кг/т чугуна;

Производительность – 2962-2968 т/сутки;

Доля окатышей от ЖРС – 29,2-29,3 %;

Интенсивность хода по дутью – 1,657-1,819 м³/м³ минуту;

Интенсивность хода по суммарному углероду – 0,655-0,758 т/м³ сутки;

Рудная нагрузка – 4,07-4,11 т/т;

Содержание Fe в шихте – 58,310-59,085 %;

Расход природного газа – 19,2-19,5 тыс. м³/час;

Содержание кислорода – 30,85-31,80 %;

Холодная прочность кокса по показателю M10 – 7,87-8,19 %;

Холодная прочность кокса по показателю M25 – 88,3-89,0 %;

Содержание фракции 0-5 мм в агломерате – 7,44-9,49 %;

Количество железа, вводимого в чугун из замасленной окалины – 0,4 т/т замасленной окалины.

По результатам исследований по введению замасленной окалины в состав шихты доменной печи не наблюдали уменьшение производительности печи и рост удельного расхода кокса.

При загрузке 10 кг/т чугуна замасленной окалины в доменные печи с КЗУ получим годовое дополнительное количество железа, входящего в продукцию металлургического предприятия, более 14,5 тыс. т. Уменьшение выброса в окружающую среду загрязняющих отходов нефтепродуктов составит около 5,4 тыс. т/год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследован химический, минералогический состав, теплофизические свойства исходной замасленной окалины. В образцах определили 69,5% железа, 90% которого находилось в фазе Fe₃O₄ и 5% в фазе FeO. Кажущаяся теплоемкость составляла от 545 до 3763 Дж/(кг · °C) в зависимости от содержания в окалине воды и масла. Теплопроводность замасленной окалины, определенная путем сопоставления результатов теоретического расчета по известным методикам с экспериментальными данными в муфельной печи в температурном интервале 0-200 °C, составляла 8-10 Вт/(м · °C). Для температуры выше 600 °C ее величину приняли 0,5 - 0,7 Вт/(м · °C).

2. Установлены пределы горизонта по высоте доменной печи для начала испарения масла из окалины и температуры ее равновесия с железорудным сырьем при совместном их движении от колошника до горна. Замасленная окалина достигает температуру начала испарения масла, равную 230 °С на высоте от 87 % до 94 % от оси фурменного очага и температуры равновесия с железорудным сырьем в интервале 912-932 °С в зависимости от содержания воды в окалине.

3. Исследовано сопротивление деформации металлического контейнера размером 85х83,4 мм с замасленной окалиной в холодном состоянии и после восстановления в среде водорода при температуре 700 °С. Минимальная предельная нагрузка металлической упаковки с замасленной окалиной в холодном состоянии, равная 986 кПа, превышает в 70 раз нагрузку, которую испытывает в доменной печи порция шихты при размещении на ней материалов соответствующей массы одной подачи. Предельная нагрузка металлической упаковки с замасленной окалиной после восстановления в среде водорода, равная 17632 кПа, приближена к предельной нагрузке для агломерата и превышает предельную нагрузку окатышей более чем в 2 раза.

4. Физическим моделированием установлено влияние продуктов разложения замасленной окалины на состав колошниковой пыли, доменных шламов и шламовой воды. В лабораторных экспериментах распределение масла было следующим, % от исходного количества:

- 74,8% разложилось на слое железорудного сырья, соответствующего трем подачам;

- 9,1% перешло в колошниковая пыль;

- 15,9% перешло шлам вакуумнофильтрационной установки;

- масло отсутствует в воде мокрой газоочистки;

- 0,2% (30 мг) масла проходит мокрую газоочистку в форме аэрозоля.

5. Установлен химический состав парогазовой смеси после деструкции масла на слое железорудного сырья при их нагреве. Основными компонентами газовой смеси являются водород H_2 (52,53-90,51%), метан CH_4 (6,81-33,20%), монооксид углерода CO (2,32-13,20%) и диоксид углерода CO_2 (0,22-0,76%). Суммарное содержание остальных компонентов газовой фазы во всех пробах не превышает 0,44%. Определено количество бензо(а)пирена до и после водной газоочистки в пересчёте на объём колошникового газа, которое составило 0,000097 мг/м³ и 0,000032 мг/м³ соответственно. Данный результат в несколько раз меньше предельно допустимой концентрации (ПДК) бензо(а)пирена в воздухе рабочей зоны в соответствии с ГН 2.2.5.3532-18 (гигиенические нормативы «Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны») – не более 0,00015 мг/м³.

6. Выявлены пути повышения степени утилизации масла из замасленной окалины в доменной печи. Лабораторными исследованиями установлено, что, нагрев замасленной окалины совместно с аммиачной селитрой с расходом 40 г селитры на 100 г окалины обеспечивает сгорание 75 % масла в металлическом контейнере. Таким образом, если учесть, что 50 % - 74,8 % паров масла разлагается в процессе фильтрации его через слой шихтовых материалов, располагающихся над горизонтом начала его испарения, то общая степень сгорания и разложения масла достигает 93 %, что обеспечит минимальное остаточное содержание паров масла в колошниковом газе, равное 0,00006%.

7. Лабораторными экспериментами на модели двухконусного загрузочного устройства, изготовленной в масштабе 1:35 по отношению к линейным размерам КЗУ доменной печи № 8 ПАО «ММК» объемом 1370 м³, определено, что загрузка окалины в первый или второй рудный скип после железорудного сырья обеспечивает формирование слоя в зоне рудного гребня и на периферии колошника, включающего от 60 до 77 % контейнеров от их расхода.

8. Промышленными испытаниями по загрузке замасленной окалины, упакованной в металлический контейнер, в доменную печь № 8 ПАО «ММК» установлено:

- размещение металлических контейнеров с замасленной окалиной на подошве из окатышей в ЦПАШ предотвратило появление негативных последствий в случае герметизации металлического контейнера;

- соотношение объемов окатышей и металлических контейнеров, равных 3 к 1, обеспечивало требуемую подвижность смеси при выгрузке их из бункера добавочных материалов, оснащенного вибрационным питателем, на пластинчатый конвейер;

- загрузка 1 тонны контейнеров с замасленной окалиной в зону рудного гребня и на периферию не ухудшила ход процессов в доменной печи.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В НАУЧНЫХ ЖУРНАЛАХ И ИЗДАНИЯХ

Публикации в журналах из Перечня ВАК РФ:

1. Прогнозирование температуры замасленной окалины, упакованной в металлический контейнер, при движении в доменной печи от колошника к горну / А.В. Дзюба, А.С. Савинов, А.С. Харченко, С.К. Сibaгатуллин, В.И. Сысоев, Е.О. Харченко, А.В. Павлов // Теория и технология металлургического производства. – 2024. – №4(51). – С. 24-29.

2. Моделирование распределения компонентов, выделившихся из замасленной окалины, между водо-газо-пылевыми средами системы газоочистки доменной печи / А.С. Харченко, В.И. Сысоев, С.К. Сibaгатуллин, А.В. Дзюба, А.С. Савинов, Е.О. Харченко // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. – 2025. – 68(4). – 332-338.

3. Фазовые переходы компонентов замасленной окалины в условиях доменной печи / А.С. Харченко, В.И. Сысоев, С.К. Сibaгатуллин, А.В. Дзюба // Черные металлы. – 2025. – № 1127(11). – С. 10-14.

4. Результаты физического моделирования реагентного окисления масла замасленной окалины в условиях доменной плавки / А.С. Харченко, А.С. Савинов, В.И. Сысоев, А.В. Дзюба, С.К. Сibaгатуллин, Е.О. Харченко // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. – 2026. – №69(2). – С. 155-162.

Изобретения, программы, защищенные охранными документами РФ:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2026616970. «Программа для прогнозирования температуры окусованной замасленной окалины при движении от колошника в направлении горна доменной печи» : №2026616970 : заявл. 06.03.2026 : опубл. 12.03.2026 / А.В. Дзюба, А.С. Савинов, С.К. Сibaгатуллин, В.И. Сысоев, А.С. Харченко ; правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего

образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

В других изданиях:

1. Выявление теплоёмкости замасленной окалины в интервале температур 80–900 °С. / А.В. Дзюба, А.С. Савинов, А.С. Харченко, С.К. Сибгатуллин, В.И. Сысоев, Н.И. Муравьев, А.В. Павлов // Современные проблемы электрометаллургии стали : Материалы XIX Международной конференции. – 2024. – С. 60-65.

2. Определение теплопроводности замасленной прокатной окалины / А.В. Дзюба, В.И. Сысоев, А.С. Савинов, А.С. Харченко, И.В. Решетова, Н.С. Щелоков // Материалы XXII Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. – 2024. – Том 6. – С. 246.

3. Прочностные характеристики контейнеров с замасленной окалиной, изготовленных приближённо к крупности кокса / А.В. Дзюба, А.С. Савинов, А.С. Харченко, С.К. Сибгатуллин, В.И. Сысоев, М.В. Харченко // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве : сборник докладов XII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2024). – 2024. – С. 37-41.

4. Изучение распределения компонентов шихты в колошниковом пространстве плоской прозрачной модели доменной печи с конусным загрузочным устройством / А.В. Дзюба, А.С. Харченко, С.К. Сибгатуллин, В.А. Бегинюк // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова. – 2023. – Т.14. – №1. – С. 26-28.

5. Исследование теплоёмкости замасленной окалины из вторичных горизонтальных отстойников ПАО «ММК» / А.В. Дзюба, В.И. Сысоев, А.С. Савинов, А.С. Харченко, С.К. Сибгатуллин, М.А. Посохин // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 82-й международной научно-технической конференции. Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова. – 2024. – Т.1. – С. 118.

6. Изучение на плоской прозрачной модели распределения шихтовых материалов в колошниковом пространстве доменной печи с конусным загрузочным устройством / А.В. Дзюба, А.С. Харченко, С.К. Сибгатуллин, А.С. Савинов, М.А. Посохин, В.А. Бегинюк // Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований : труды VI Конгресса с международным участием «Техноген 2023». – 2023. – С. 334-337.

7. Математическое моделирование изменения температуры окускованной замасленной окалины по ходу ее движения в доменной печи / А.В. Дзюба, А.С. Савинов, А.С. Харченко, С.К. Сибгатуллин, В.И. Сысоев, А.В. Павлов // XVIII Международный конгресс сталеплавильщиков и производителей металла «От руды до стали». – 2025. – С. 18-21.

8. Теплоёмкость замасленной окалины ПАО «ММК» / А.В. Дзюба, А.С. Савинов, А.С. Харченко, С.К. Сибгатуллин, В.И. Сысоев // 2-я Международная конференция «Качество стали – от руды до проката». – 2024. – С. 54-58.

9. Разработка уравнений, характеризующих изменение температуры замасленной окалины для условий нагрева в зонах интенсивного и замедленного теплообмена в доменной печи / А.В. Дзюба, А.С. Савинов, А.С. Харченко, С.К. Сибгатуллин, В.И.

Сысоев, А.В. Павлов // Перспективы развития, совершенствования и автоматизации высокотехнологичных производств, Иркутск. – 2025. – С. 32-36.

10. Испарение масла из окускованной замасленной окалины при движении в доменной печи от колошника к горну / А.В. Дзюба, В.И. Сысоев, А.С. Савинов, Е.О. Харченко, П.С. Логунова, Н.С. Щелоков // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : Тезисы докладов 83-й международной научно-технической конференции, МГТУ им. Г.И. Носова. – 2025. – С. 71.

11. Физико-химические основы выплавки чугуна из замасленной окалины по результатам лабораторных экспериментов / А.В. Дзюба, А.С. Харченко, В.И. Сысоев, С.К. Сибгатуллин, А.С. Савинов // «Физико-химические основы металлургических процессов» имени академика А.М. Самарина: Сборник статей Международной научной конференции. – Москва : ООО «Интерконтакт Наука». – 2025. – С. 687-692.

12. Газохроматографическое исследование продуктов термokatалитических превращений углеводородов масла замасленной прокатной окалины в восстановительной атмосфере / А.С. Савинов, В.И. Сысоев, А.В. Дзюба, К.И. Мансурова, В.Е. Мухутдинова, М.А. Свиридова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : Тезисы докладов 83-й международной научно-технической конференции, МГТУ им. Г.И. Носова. – 2025. – С. 86.

13. Сравнение прочностных характеристик железорудных материалов и металлического контейнера с замасленной окалиной после восстановления при температуре 700°C / А.В. Дзюба, М.В. Харченко, В.И. Сысоев, А.С. Савинов, А.С. Харченко, С.К. Сибгатуллин, М.А. Свиридова // Технологии металлургии, машиностроения и материалообработки. – 2024. – № 23. – С. 35-42.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность:

– директору института металлургии, машиностроения и материалообработки, заведующему кафедрой механики, доктору технических наук Савинову Александру Сергеевичу и профессору кафедры металлургии и химических технологий, доктору технических наук Салавату Камиловичу Сибгатуллину за поддержку и ценные советы по теме диссертации;

– зав. лабораторией кафедры металлургии и химических технологий, кандидату технических наук Сысоеву Виктору Ивановичу за консультацию по проведению экспериментов.