

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.745; 669.054.8

**РОВИН**  
Сергей Леонидович

**ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МАЛОТОННАЖНОГО  
РЕЦИКЛИНГА ДИСПЕРСНЫХ МЕТАЛЛОУТХОДОВ  
В РОТАЦИОННЫХ ПЕЧАХ С ПОЛУЧЕНИЕМ  
ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ДЛЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук  
по специальности 05.16.04 – Литейное производство

Минск 2018

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный консультант **КАЛИНИЧЕНКО Александр Сергеевич**,  
доктор технических наук, доцент, заместитель проректора по научной работе Белорусского национального технического университета, г. Минск

Официальные оппоненты: **ВОЛОЧКО Александр Тихонович**,  
доктор технических наук, профессор, начальник отдела материаловедения и литейно-деформационных технологий, заведующий лабораторией микрокристаллических и аморфных материалов ГНУ «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», г. Минск;

**СВИДУНОВИЧ Николай Александрович**,  
доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки Республики Беларусь, профессор кафедры материаловедения и технологии металлов УО «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск;

**ЛОВШЕНКО Григорий Федорович**,  
доктор технических наук, профессор, ректор УО «Белорусская государственная академия авиации», г. Минск

Оппонирующая организация ГНУ «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси», г. Минск

Защита состоится «02» марта 2018 г. в 14:00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.14 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202, тел. ученого секретаря (+375 17) 292-81-85, e-mail: vm.konstantinov@bntu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 31 января 2018 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций  
доктор технических наук, профессор



В. М. Константинов

© Ровин С. Л., 2018

© Белорусский национальный  
технический университет, 2018

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях растущего дефицита и удорожания качественных шихтовых материалов особую актуальность приобретает рециклинг дисперсных металлоотходов (стружки, окалины, аспирационной пыли, шламов и т.п.) и, в первую очередь – отходов, содержащих железо, накопление которых в отвалах соизмеримо с объемами добычи руды. Решение этой проблемы имеет важнейшее значение для Республики Беларусь, металлургическое и литейное производство которой практически полностью зависят от импортируемых шихтовых материалов.

Традиционные плавильные агрегаты в литейных и металлургических цехах не приспособлены к плавке дисперсных материалов. Поэтому практически все известные технологии рециклинга дисперсных металлоотходов предусматривают их предварительное окускование – брикетирование, окатывание, агломерацию и т.п. Однако брикетирование даже самой ценной части таких отходов – стальной и чугуновой стружки, не позволяет получить шихтовой материал, соответствующий качеству плотного кускового лома.

Переработка оксидных и многокомпонентных железосодержащих отходов осуществляется сегодня только на металлургических комбинатах полного цикла, где они используются в основном как добавки к рудному концентрату. Перед переработкой металлоотходы проходят многостадийную предварительную подготовку, затраты на которую достигают 60-80% от себестоимости получаемого металла. Рентабельность таких комбинатов обеспечивается при объемах производства, исчисляемых миллионами тонн в год, что требует соответствующего источника стабильного по характеристикам сырья. Для отечественной индустрии, где источниками металлоотходов являются сотни машиностроительных и металлообрабатывающих предприятий, требуется принципиально иной подход.

В диссертации предложена новая концепция рециклинга, основанная на гибкой малотоннажной технологии и оборудовании, позволяющих рентабельно перерабатывать относительно небольшие объемы разнородных отходов в исходном состоянии без подготовки и окомкования с получением высококачественных шихтовых материалов или сплавов для литейного производства. Для реализации этого процесса созданы специальные ротационные наклоняющиеся печи (РНП) с управляемым вектором газового потока.

Разработанная технология базируется на характерных особенностях явления тепломассопереноса и физико-химических процессов при переходе к обработке отдельно взятых частиц материала с размерами менее 1-3 мм, имеющих развитую реакционную поверхность и пористость, что позволяет в десятки раз повысить скорость процессов нагрева, восстановления и плавки. Изучение свойств металлоотходов, исследования движения газовых потоков и материалов в РНП с применением имитационного и компьютерного моделирования, процессов твердо- и жидкофазного восстановления, влияния восстановителей, режимных и конструктивных характеристик печей, проведение натурных экспери-

ментов на опытно-промышленных печах позволили разработать теоретические и технологические основы рециклинга, апробировать полученные технические решения и внедрить их в производство.

Решение проблемы рециклинга дисперсных отходов черных и цветных металлов открывает возможность создания собственной сырьевой базы для литейного производства, позволяет значительно сократить импорт дорогостоящих шихтовых материалов и металлов, организовать безотходную систему металлооборота, улучшить экологическую обстановку, снизить себестоимость продукции и повысить конкурентоспособность отечественных машиностроительных и металлообрабатывающих предприятий.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Связь работы с научными программами и темами.** Настоящая работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете в соответствии с основными направлениями научно-технического развития Республики Беларусь.

Тема диссертации соответствует перечню приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2011–2015 годы, утвержденному Указом Президента Республики Беларусь от 22.07.2010г. № 378:

– энергетика и энергосбережение ... в том числе, технологические процессы и оборудование для получения, обработки, утилизации веществ с различными физико-химическими свойствами;

– рациональное природопользование, ресурсосбережение ... в том числе, утилизация отходов путем их глубокой переработки, вовлечения в хозяйственный оборот вторичных материальных ресурсов;

и на 2016–2020 годы, утвержденному Указом Президента Республики Беларусь от 22.04.2015 г. № 166:

1. Энергетика и энергоэффективность, атомная энергетика, в том числе – энергоэффективные технологии и техника...

8. Рациональное природопользование и глубокая переработка природных ресурсов.

Полученные результаты были использованы при выполнении заданий Государственной программы научных исследований «Механика, техническая диагностика, металлургия» (подпрограмма «Металлургия» задание 2.2.11 № г.р. 20115185, 2011-2013 гг.), Государственной научно-технической программы «Ресурсосбережение-2010» (задание 3.13 № г.р. 20064573 2006-2008 гг.), Государственной программы «Импортозамещение» (задание АН 06.55 № г.р. 20065311, 2006-2007 гг.), а также при выполнении прямых хозяйственных договоров в период с 2003 по 2015год с белорусскими (9 договоров) и российскими предприятиями (3 договора).

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является разработка теоретических основ, технологии и оборудования малотоннажного рециклинга дисперс-

ных металлоотходов, в первую очередь оксидных и многокомпонентных железосодержащих, без предварительной подготовки и окомкования в одном технологическом агрегате – ротационных наклоняющихся печах, на основе непрерывного процесса твердо-жидкофазного восстановления с получением высококачественных шихтовых материалов и литейных сплавов.

Для достижения этой цели необходимо было решить следующие научные и прикладные задачи:

- Исследовать физико-химические и технологические характеристики дисперсных металлоотходов, образующихся при различных видах обработки и производства, провести системный анализ мирового опыта их переработки. Обосновать выбор типа оборудования для малотоннажной переработки дисперсных отходов в исходном состоянии, включая их нагрев, восстановление и расплавление.
- Изучить и исследовать процессы твердофазного восстановления (ТФВ) дисперсных оксидных и многокомпонентных железосодержащих отходов, разработать физическую модель и математическое описание процесса.
- Определить оптимальные режимы и технологические параметры твердофазного восстановления железа в ротационных печах с использованием твердых (С) и газообразных ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ) восстановителей. Исследовать и определить эффективность восстановителей различного типа, включая отходы углеродсодержащих материалов.
- Изучить процессы перехода от твердой фазы к расплаву, включая процессы кричного восстановления, разработать методы, ограничивающие развитие крицеобразования.
- Исследовать процессы жидкофазного восстановления (ЖФВ) частиц с исходной степенью металлизации 60-80% в условиях интенсивного перемешивания расплава при температурах в рабочем пространстве 1600-1800°C. Разработать технологию получения железоуглеродистого сплава из оксидных и многокомпонентных железосодержащих отходов, основанную на комплексном непрерывном процессе твердо-жидкофазного восстановления в РНП до уровня металлизации 95-99%.
- Исследовать с помощью компьютерного моделирования движение неизотермических газовых потоков в ротационных печах. Установить влияние позиционирования горелок, вектора и режима потока газов-теплоносителей на процессы теплообмена в РНП и разработать методы их интенсификации. Используя компьютерное и физическое имитационное моделирование, исследовать характер движения, смешивания и нагрева дисперсных материалов в РНП.
- Установить влияние конструктивных параметров РНП на эффективность процессов нагрева, восстановления и расплавления. Разработать и апробировать в производственных условиях методы расчета и оптимальные конструкции РНП различного объема и производительности, предназначенных для рециклинга как черных, так и цветных металлоотходов.

- Разработать технологические процессы малотоннажного рециклинга дисперсных отходов черных и цветных металлов в РНП с получением качественных-шихтовых материалов (слитков) и литейных сплавов, провести промышленную апробацию разработанных технологий и оборудования на машиностроительных и металлургических предприятиях.

**Научная новизна.** Разработаны теоретические и технологические основы нового интенсивного твердо-жидкофазного непрерывного процесса восстановления дисперсных железосодержащих оксидных и многокомпонентных отходов с характерным размером (толщиной или диаметром) частиц  $\leq (1-3) \cdot 10^{-3}$  м с получением железоуглеродистого сплава без предварительной подготовки и окомкования этих отходов с реализацией процесса в одном агрегате – ротационной наклоняющейся печи. Разработанные научно-технические основы могут быть эффективно использованы и для рециклинга дисперсных отходов цветных металлов, в том числе свинецсодержащих.

Разработана квазигомогенная модель процесса твердофазного восстановления дисперсных пористых оксидов железа в динамическом слое. Выявлено влияние газообразных ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ) и твердых углеродсодержащих дисперсных восстановителей на скорость и степень восстановления в пористых тонких структурах оксидных материалов в температурном диапазоне 700-1300°C.

Установлена экспоненциальная зависимость степени металлизации от продолжительности процесса и температуры вида:  $\eta = 1 - \exp(-\alpha T_{mp}^{\beta})$ , описывающая процесс восстановления в интервале температур 700-1300 °С, что согласуется с разработанной квазигомогенной моделью твердофазного восстановления оксидов железа. В диапазоне 800-1100°C скорость твердофазного восстановления частиц оксидов с удельной площадью реакционной поверхности 0,5-2,5 м<sup>2</sup>/г и восстановителей с размерами частиц менее 1 мм увеличивается в 2-3 раза.

Выявлено ускоряющее влияние водорода на процессы твердофазного восстановления, заключающееся в том, что в присутствии  $\text{H}_2$  при температурах 900 °С и выше скорость и степень металлизации увеличивается на 10-20%. Водород участвует в восстановлении и выполняет роль транспорта углерода в пористых структурах оксидных материалов, усиливает автокаталитический характер процесса, повышает роль прямого восстановления.

Установлены характер и закономерности циркуляционного петлеобразного движения газов в РНП и определено влияние конструктивных параметров печи, в том числе позиционирования горелок, и режимных характеристик потока теплоносителя на процессы теплопереноса. Определено, что активное перемешивание материала и его взаимодействие с высокоскоростным газовым потоком увеличивает объемный коэффициент теплопередачи с 3-5 Вт/(м<sup>3</sup>·К) в неподвижном слое до 2000-3000 Вт/(м<sup>3</sup>·К). Установлено, что зависимость коэффициента теплообмена от относительной скорости газового потока носит параболический характер со степенным показателем 0,5-0,8.

Выявлены характер и закономерности движения дисперсных материалов в РНП, определены структура динамического слоя, траектории движения частиц

и интенсивность смешивания. Впервые установлено, что дисперсный материал движется в РНП с окружной скоростью, в  $\sim 2-5$  раз превышающей скорость вращения печи, совершая при этом непрерывное винтовое возвратно-поступательное движение, что обеспечивает перераспределение и выравнивание состава и температуры материала за 5-10 оборотов печи.

Разработаны теоретические основы и рекомендации по созданию новых конструкций РНП с управляемым вектором потока газов-теплоносителей, обеспечивающих максимальную эффективность процессов нагрева, восстановления и расплавления дисперсных материалов при 2-3 кратном снижении пылеуноса и КПД установок на уровне 50%, что в 1,5-2,5 раза превышает показатели традиционных печей.

Совокупность результатов теоретических и экспериментальных работ позволяет решить важную научно-техническую проблему создания эффективной гибкой технологии и оборудования для малотоннажного рециклинга дисперсных отходов как черных, так и цветных металлов, в том числе оксидных и многокомпонентных, без предварительной подготовки непосредственно на предприятиях-источниках их образования. Применение разработанной технологии обеспечивает получение из отходов высококачественных конкурентоспособных шихтовых материалов и литейных сплавов черных и цветных металлов.

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

1. Теоретические и технологические основы нового непрерывного твердожидкофазного процесса восстановления дисперсных оксидов железа в динамических продуваемых слоях со скоростями, в 5-10 раз превышающими скорости восстановления окомкованных материалов, позволившего *впервые* реализовать рентабельный малотоннажный рециклинг дисперсных железосодержащих отходов в одном агрегате – РНП, без их предварительной подготовки и с использованием в качестве восстановителя отходов твердых углеродсодержащих материалов.

2. Квазигомогенная модель процесса твердофазного восстановления дисперсных пористых оксидных материалов, *отличающаяся* от классической модели восстановления тела с «непрореагировавшим» ядром тем, что согласно разработанной модели восстановление происходит одновременно во всем объеме высокопористой дисперсной частицы, позволившая установить закономерности протекания гетерогенных процессов в продуваемом слое дисперсных пористых материалов и осуществить обоснованный выбор технологических режимов ТФВ железосодержащих отходов в ротационных наклоняющихся печах. Разработанная модель применима и для описания восстановления пористых оксидов цветных сплавов.

3. Модель и закономерности процесса жидкофазного восстановления (доставки) оксидов до уровня 95-99% в условиях РНП, где шлаковый расплав представляет однородную динамическую газо-жидкостную массу (пену) с равномерно распределенными частицами твердого восстановителя, что приводит к осуществлению окислительно-восстановительных реакций во всем объеме шлака и обеспечивает более высокую интенсивность восстановительных процессов, чем при струйной продувке в стационарных печах.

4. Математическое описание и результаты компьютерного моделирования неизотермических газовых потоков в короткобарабанных печах и РНП, позволившие получить *новые* представления о циркуляционном петлеобразном движении газов, зависящем от позиционирования горелок и режимных параметров, и определяющем интенсивность теплообмена, что характеризует РНП как агрегат с управляемым вектором потока теплоносителя.

5. Методика и результаты комплексного исследования, включающего имитационное и численное моделирование процессов движения и смешивания дисперсных материалов в ротационных печах, которые позволили *впервые* выявить и описать сложный винтовой возвратно-поступательный характер движения материала в РНП, получить представление о структуре динамического слоя, определить траектории и скорости движения отдельных частиц, оценить интенсивность их контактов с поверхностью футеровки, дать количественную оценку процессов перемешивания в слое дисперсных материалов.

6. Конструкции *новых* РНП для рециклинга дисперсных металлоотходов, обеспечивающих гибкий управляемый режим термообработки, безокислительный интенсивный нагрев материалов и высокие скорости восстановления оксидов, устойчивую работу при знакопеременных динамических нагрузках, сокращение пылеуноса в 2-3 раза и повышение термического КПД до 50% и более, отличающиеся от известных установок геометрическими, кинематическими и механическими параметрами.

**Личный вклад соискателя ученой степени.** Основные теоретические и экспериментальные исследования, обобщенные в представленной работе, выполнены соискателем лично и под его научным руководством. При этом автору принадлежит постановка цели и задач исследования, выбор методологии их решения и все научные результаты, вошедшие в диссертацию, в том числе: разработка гипотезы об ускоряющем влиянии на процессы восстановления неоднородной пористой структуры дисперсных железосодержащих отходов; разработка механизмов процессов тепломассопереноса в динамических продуваемых слоях дисперсных неоднородных материалов; разработка и обоснование квазигомогенной модели восстановления тонкодисперсных пористых оксидов железа; разработка комплексного непрерывного процесса твердо-жидкофазного восстановления дисперсных оксидных материалов; разработка научно обоснованных рекомендаций по конструированию РНП различной емкости для широкой номенклатуры отходов как черных, так и цветных металлов.

Большинство статей, опубликованных по теме диссертационной работы, написаны соискателем после анализа и обсуждения полученных данных с соавторами, основными из которых являются кандидат технических наук Ровин Л.Е., доктор технических наук Кукуй Д.М., доктор технических наук Калининко А.С., инженеры Заяц Т.М., Жаранов В.А., Валицкая О.М. На все совместно опубликованные с соавторами работы в тексте диссертации и автореферате при ведены ссылки. Разработка технологических процессов рециклинга дисперсных железосодержащих отходов и отходов цветных сплавов проводилась совместно



с доктором технических наук **Кукуем Д.М.** и кандидатом технических наук Ровиным Л.Е. В подготовке и проведении экспериментальных исследований принимали участие инженеры Заяц Т.М., Кислицина Н.Г., Фасевич Ю.Н., Герасимова О.В. Компьютерное моделирование движения газов и материалов в ротационных печах выполнялось при участии инженера Жаранова В.А. Конструкции ротационных печей разработаны совместно с кандидатом технических наук Селютиным А.М., инженерами Торбочкиным И.Н. и Валицкой О.М. Консультационную помощь при выполнении диссертационной работы оказывал доктор технических наук Калиниченко А.С.

**Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов.** Результаты работы были представлены в докладах и экспозициях на 35 международных научно-технических конференциях, семинарах, выставках, конгрессах, важнейшими из которых являются: Международный форум «Дни малого и среднего бизнеса России» (Москва, 2006 г.), 10-й Международный симпозиум «Белорусский промышленный форум 2007» (Минск, 2007 г.), 11-я МНТК «Mechanical Engineering-2007» (Братислава, Словакия, 2007 г.), Международная выставка-конгресс «Высокие технологии, инновации, инвестиции» (Санкт-Петербург, 2007г.), Московский Международный салон инноваций и инвестиций (2007, 2009 гг.), Международные Технические ярмарки в Санкт-Петербурге (2008, 2010 гг.), Национальные выставки Республики Беларусь в Казахстане (Астана, 2009 г., Алматы, 2011г., Астана, 2013 г.), Латвии (Рига, 2012г.), Грузии (Тбилиси, 2015г.), Международные промышленные выставки-ярмарки Hannover Messe (Ганновер, Германия, 2010, 2011 гг.), Международная литейная выставка-ярмарка GIFA-2011 (Дюссельдорф, Германия, 2011 г.), 1-я Международная специализированная выставка литейного производства и металлургических технологий «Литметэкспо-2012» (Минск, 2012 г.), 71-й Всемирный конгресс литейщиков (Бильбао, Испания, 2014 г.), ежегодные МНТК «Литейное производство и металлургия. Беларусь» (2003-2016 гг.). На конкурсе инновационных проектов, проходившем в рамках форума-выставки «Дни малого и среднего бизнеса России 2006», разработка «Технология и оборудование для рециклинга металлоотходов» была признана победителем и отмечена Благодарственным письмом и «Золотой медалью» Российской торгово-промышленной палаты (Москва, 2006). В феврале 2007 года на VII Московском Международном салоне инноваций и инвестиций эта разработка была награждена специальным Дипломом правительства Республики Татарстан, а в октябре того же года на Международной выставке-конгрессе «Высокие технологии, инновации, инвестиции» в Санкт-Петербурге признана одним из лучших инновационных проектов в области производственных технологий и удостоена Диплома с вручением «Серебряной медали» выставки. В 2009 году на IX Московском Международном салоне инноваций и инвестиций «Технология и оборудование для прямого получения сплавов железа из окалины» были удостоены «Серебряной медали» и Диплома от Министра образования и науки Российской Федерации. В 2009 году «Разработка и внедрение установки (ротационной печи)

для переработки чугуновой стружки на РУП ГЛЗ «Центролит» с целью экономии электроэнергии при плавке чугуна» была отмечена Премией Министерства промышленности РБ в области науки и техники за 2008 год в номинации «Энергосберегающее оборудование, техника и технологии» (Решение Коллегии Министерства промышленности Республики Беларусь от 23.01.2009г. № 2/2). В 2017 году работы по исследованию, разработке и внедрению технологий и оборудования для рециклинга дисперсных металлоотходов были отмечены Премией Ассоциации литейщиков и металлургов Республики Беларусь.

Разработанные в ходе выполнения диссертации новые технологические процессы рециклинга дисперсных отходов черных и цветных металлов, оборудование для их реализации – ротационные установки, и проектные решения были внедрены или прошли апробацию на 12 предприятиях Республики Беларусь и Российской Федерации. Расчетный экономический эффект, полученный благодаря использованию результатов работы, составил около 1,46 млн. долларов США.

**Опубликование результатов диссертации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 63 научных работах, в том числе: в 1 монографии, 42 статьях в журналах и сборниках научных работ, из них 7 – в зарубежных изданиях, и 33 – в научных изданиях, включенных в перечень, рекомендованный ВАК Республики Беларусь, 12 докладах и тезисах, из них 3 – за рубежом. Новизна технических решений подтверждена 7 патентами Республики Беларусь, подана заявка на получение Евразийского патента на изобретение. Общий объем публикаций, соответствующих требованиям Положения о присуждении ученых степеней, составляет 44 авторских листа.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 6 глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, списка использованных источников, списка публикаций автора и приложений. Полный объем диссертации составляет 485 страницы. Основное содержание изложено на 195 страницах машинописного текста. Работа включает 149 иллюстраций на 60 страницах, 47 таблиц на 29 страницах, список использованных источников из 271 наименования на 19 страницах, список публикаций автора из 63 наименований на 6 страницах и 14 приложений, выделенных в отдельную книгу, состоящую из 176 страниц.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

**Во введении** дана оценка состояния решаемой проблемы, обоснована актуальность темы, определены основные направления научных исследований, показана научно-практическая и социальная значимость работы.

**В первой главе** представлен аналитический обзор современной ситуации в области переработки дисперсных металлоотходов в Республике Беларусь и мировой практике. По ориентировочным оценкам в Беларуси ежегодно образуется около 500 тыс. тонн отходов черных и цветных металлов. Из них более 60% составляют дисперсные отходы металлообработки: стружка, окалина, шламы,

абразивные и аспирационные пыли и т.д. В отвалах страны накоплено около 8-10 млн. тонн отходов такого рода. Более 90% из них составляют отходы черных металлов. Источником отходов являются сотни предприятий, соответственно их состав и свойства различны и нестабильны.

Наиболее ценным материалом среди дисперсных металлоотходов является стружка. Анализ мирового опыта показывает, что переработка стружки россыпью без предварительной обработки является наименее эффективным способом из-за больших (до 50%) потерь при плавке в традиционных печах и снижения качества сплава. Холодное брикетирование является широко применяемым способом подготовки стружки, но качество брикетов не удовлетворяет требованиям плавки. Повысить их характеристики, в том числе плотность – до  $(6,0-6,5) \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ , можно с помощью горячего брикетирования, однако это приводит к удорожанию продукции до стоимости первичных шихтовых материалов (таких как доменный чугун), при этом качество брикетов не достигает качества плотного металла.

Оксидные и многокомпонентные металлоотходы при рециклинге должны восстанавливаться, подобно тому, как восстанавливаются рудные материалы. Учитывая эту аналогию, был изучен опыт переработки руды при традиционной доменной плавке и в процессах прямого получения железа. Все существующие методы предполагают предварительную подготовку и, как правило, окомкование исходного железосодержащего сырья.

Анализ существующих плавильных агрегатов показал, что наиболее перспективными для порционного нагрева, восстановления и плавки полидисперсных материалов являются ротационные наклоняющиеся печи с петлеобразным движением газов. Однако для плавки черных сплавов эти печи практически не применялись.

Для исследования процессов восстановления широко используется аппарат классической термодинамики. Однако в работах, как правило, рассматриваются идеализированные системы без привязки к конкретным технологическим процессам, что ограничивает использование полученных кинетических уравнений.

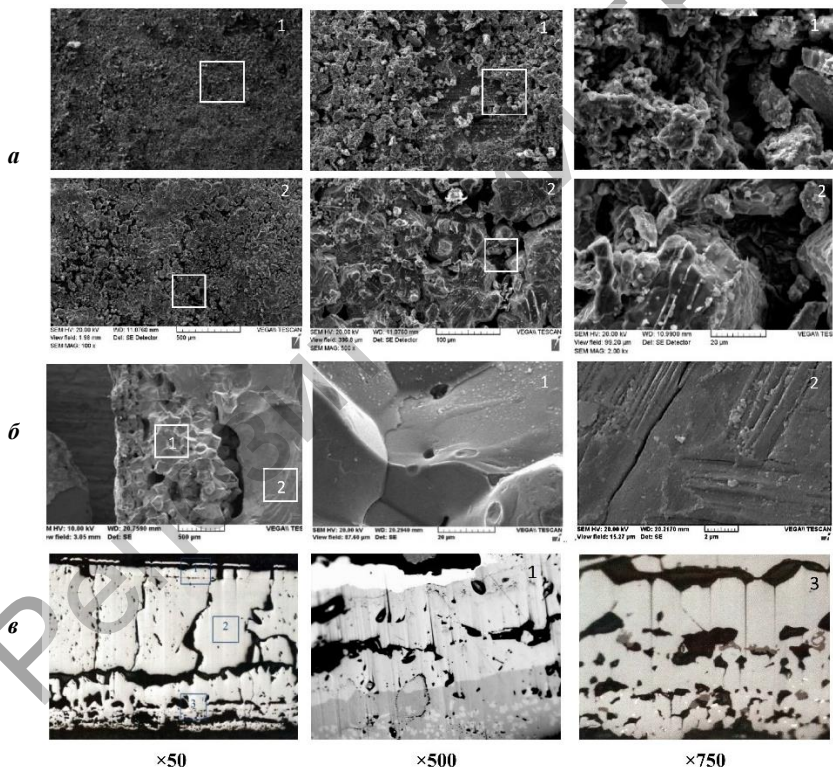
Практически все авторы отмечают существенное ускорение процессов рециклинга при переходе к дисперсным пористым материалам за счет значительного увеличения реакционной поверхности, переноса газообразных восстановителей CO и H<sub>2</sub> вглубь оксидных частиц и усиления роли прямого восстановления. Однако механизм этих явлений исследован недостаточно, что, в первую очередь, объясняется существующей практикой: как домы, так и агрегаты прямого внедоменного получения железа работают на кусковой шихте, и использование полидисперсных разнородных материалов для них неприемлемо.

Цель и задачи работы сформулированы, исходя из требования альтернативного подхода к решению актуальной научно-технической проблемы, имеющей важное государственное значение, – создания гибкого универсального малотоннажного рециклинга дисперсных металлоотходов на базе принципиально новой технологии и плавильных агрегатов, адаптированных к переработке подобных материалов без предварительной подготовки и окомкования, позволя-

ющих вернуть их в производство непосредственно на предприятиях-источниках этих отходов.

**Во второй главе** представлены результаты исследования характеристик дисперсных металлоотходов, имеющих определяющее значение для рециклинга, в том числе: дисперсности, химического и минералогического состава, макро- и микроструктуры, пористости, плотности, адгезионных свойств и др. Выполнена классификация железосодержащих отходов.

Для оксидных и многокомпонентных отходов как черных, так и цветных металлов характерными являются многочисленные дефекты поверхности, несплошность структуры, высокая пористость на макро- и микроуровне, что многократно увеличивает их реакционную поверхность (рисунок 1). Так, например, реакционная поверхность частиц прокатной и кузнечной окалины достигает 1,5–2,5 м<sup>2</sup>/г.



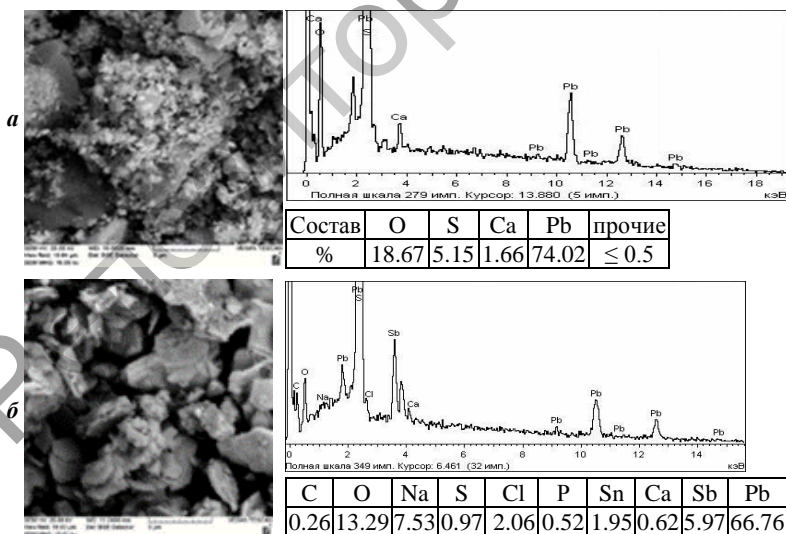
*a* – поверхность окалины: 1 – с внешней стороны, 2 – со стороны заготовки;  
*b* – поперечный излом частицы; *б* – структура поперечного сечения:  
 1 – внешний слой Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2 – средний слой Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> + FeO, 3 – внутренний слой  
 (со стороны заготовки) – FeO с включениями Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

Рисунок 1. – Структура частиц окалины

Получены новые данные об изменении свойств железосодержащих отходов в процессе хранения и высокотемпературного нагрева. Установлено что, при нагреве в динамическом слое повышаются дисперсность и кажущаяся плотность, снижаются адгезионные свойства. Так, при 700-800 °С угол естественного откоса чугунной стружки снижается с 34-36° до 5-7° и при разгрузке из печи стружка «течет», как расплав, ее насыпная плотность возрастает с  $(1,5-1,8) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  до  $(2,3-2,8) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . Через 30-40 минут высокотемпературного нагрева в ротационной печи средний размер частиц уменьшается в 2-3 раза, а ширина спектра гранулометрического состава сужается за счет исключения крупных фракций.

Существенное значение для обработки материалов в динамическом продуваемом слое имеет скорость витания и, соответственно, унос дисперсных частиц. Исследования выявили, что значительное влияние на этот процесс оказывает кажущаяся плотность (пористость) частиц. Образцы оксидов одинакового химсостава, но различной пористости имели значения скорости витания, отличающиеся в 20 и 50 раз.

Были также проведены исследования дисперсных отходов цветных металлов: алюминия, меди, свинца. Наименее изученными и наиболее токсичными из них являются свинецсодержащие отходы, в первую очередь отработанные аккумуляторные батареи, на долю которых приходится более половины образующихся в Беларуси цветных металлоотходов. На рисунке 2 представлены результаты исследования некоторых наиболее характерных свинецсодержащих отходов: аккумуляторной пасты и шлаков, полученных в процессе рафинирования.



**а** – аккумуляторная паста, **б** – сѐмы (шлаки) рафинирования свинца.

**Рисунок 2.** – Структура и элементный состав свинецсодержащих отходов ( $\times 5000$ )

Несмотря на очевидные различия в свойствах и источниках образования, дисперсные отходы цветных металлов имеют ряд характеристик, аналогичных железосодержащим: неоднородный состав и структуру, высокую пористость и развитую реакционную поверхность. Так удельная поверхность свинцовых шламов и шлаков составляет 2,5-5,5 м<sup>2</sup>/г.

Эти характерные особенности дисперсных отходов являются важнейшими предпосылками создания процессов скоростного рециклинга и единых подходов к их реализации как для черных, так и для цветных металлов.

**В третьей главе** рассматриваются вопросы нагрева и твердофазного восстановления дисперсных пористых материалов.

Физико-химический процесс восстановления оксидов железа, осуществляемый на границе «газ – твердое тело (оксид)», включает последовательно следующие стадии: транспорт (диффузию) газов-восстановителей из потока к поверхности тела; адсорбцию молекул газа-восстановителя на реакционной поверхности (на поверхности и в открытых порах твердого тела); химическую реакцию (отнятие кислорода); образование и рост зародышей продуктов восстановления (последовательно: магнетита, вюстита, железа); десорбцию молекул продуктов окисления восстановителей с поверхности твердого материала; редиффузию продуктов реакции.

При температурах выше 900 °С скорости химических реакций восстановления оксидов железа значительно превосходят скорости диффузии. Отсюда лимитирующим фактором при высоких температурах практически при всех способах восстановления являются процессы макро- и микродиффузии, а процесс в целом лежит в диффузионной области. Длительность процесса при этом определяется интенсивностью переноса реагентов и величиной удельной площади реакционной поверхности. Интенсивность переноса реагентов из газовой среды к поверхности твердого тела (оксидных частиц) и от ядра потока к периферии определяется режимом движения потока, а также параметрами частиц и слоя. Для динамического продуваемого слоя дисперсного материала в первом приближении можно считать, что коэффициент массообмена, как и теплообмена, пропорционален корню квадратному из скорости потока:  $\beta \sim u^{0.5}$ .

Связь коэффициента массообмена ( $\beta$ ) с коэффициентом теплоотдачи ( $\alpha$ ) может быть представлена выражением:

$$\beta = \alpha \cdot \left( \frac{D}{a} \right)^{0.75} \cdot \frac{1}{c_p \cdot \rho_r} \cdot 10^{-2}, \text{ м/с}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $c_p$  – теплоемкость газов при постоянном давлении, Дж/(кг·К);  $\rho_r$  – плотность газов, кг/м<sup>3</sup>. Для газовых смесей (СО + СО<sub>2</sub>) и (СО + N<sub>2</sub>) отношение  $D/a \approx 0,7$ , для (СО<sub>2</sub> + Н<sub>2</sub>) при концентрациях водорода 25-30 % –  $D/a \approx 2,0$ .

Диффузионный поток ( $j$ ) в пограничном слое можно представить выражением:

$$j = \beta \Delta C = \beta (\Delta p) \frac{1}{RT}, \text{ моль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}), \quad (2)$$

где  $\Delta C$  и  $\Delta p$  – разность концентраций, моль/м<sup>3</sup>, и парциальных давлений, Па.

При диффузионном режиме разность давлений в пограничном слое будет превышать разницу давлений на фазовой границе на величину  $\Delta p = kRT/\beta$ . Для пористых частиц эта величина возрастает на порядок и более, пропорционально соотношению реакционной и геометрической поверхностей:  $k=10-50$ .

Общепринятая схема гетерогенной реакции при обработке высокопористого материала дополняется переносом (диффузией) реагентов вглубь материала по порам, трещинам и дефектам структуры. Перенос происходит вследствие концентрационного напора ( $dC/dx$ ) и турбулентных пульсаций газового потока, которые в нашем случае обеспечивают проникновение восстановителя ( $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ ) в микрополости, вплоть до микропор, соизмеримых по размеру с длиной свободного пробега его молекул. В микропоры успешно проникает и адсорбируется также сажистый углерод, образующийся при газификации восстановителей, конверсии  $\text{CH}_4$  и деструкции органики (масел), присутствующей в металлоотходах.

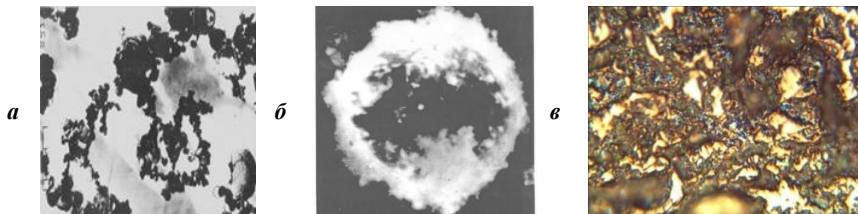
Наиболее значимым тормозящим фактором процесса восстановления является внутренняя диффузия – диффузия в твердом теле катионов железа и анионов кислорода. Она определяется градиентом концентраций, температурой и толщиной слоя образующихся продуктов. Длительность процесса при прочих равных условиях пропорциональна размерам восстанавливаемого тела, т.е. длине пути переноса ионов металла вглубь восстанавливаемого окисла ( $dx$ ). Как и газовая диффузия, поток ионов в твердом теле будет определяться законом Фика:

$$j_{Fe} = -D_{Fe} \frac{dC}{dx}, \text{ моль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}), \quad (3)$$

где  $D_{Fe}$  – коэффициент диффузии ионов железа.

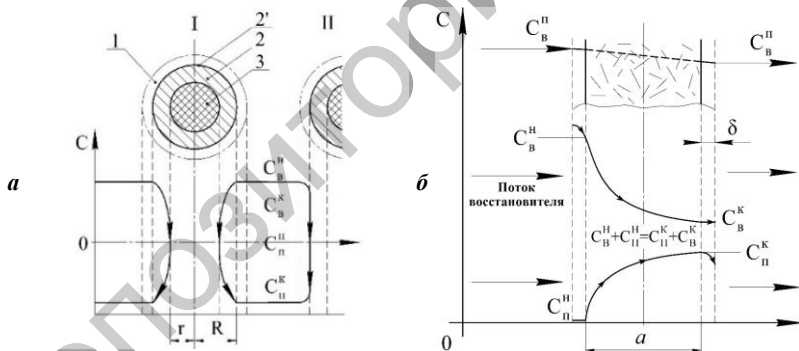
Исследования показали, что вопреки традиционным представлениям о снижении пористости в процессе восстановления, которые справедливы для окискованных материалов, пористость частичек окалина и других железосодержащих отходов значительно возрастает по мере восстановления. Суммарная поверхность (в пересчете) увеличивается в 3-5 раз, особенно за счет микропор, которые сливаются в общие полости или каналы, способствуя процессам переноса (рисунок 3).

Рост пористости в процессе восстановления обусловлен появлением новых фаз, что сопровождается уменьшением мольных объемов твердых продуктов реакции: от 21,8 см<sup>3</sup>/моль для  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , до 7,2 см<sup>3</sup>/моль для Fe. Причем пористость чешуек окалина, частичек аспирационной пыли и шламов в основном открытая, что при восстановлении обеспечивает равные условия практически по всей глубине восстанавливаемой частички.



**Рисунок 3. – Частички пыли дуговой печи (а×5000), аспирационной пыли (б×35000) и окалины (в×50) после восстановления**

Для описания процесса твердофазного восстановления дисперсных пористых оксидов железа разработана гомогенная (квазигомогенная) модель. В отличие от классической схемы восстановления «тела с непрореагировавшим ядром», согласно которой происходит постоянное уменьшение реакционной поверхности по мере увеличения толщины восстановленного слоя и соответствующее замедление процесса (рисунок 4.а), квазигомогенная модель основана на том представлении, что восстановители ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}$ ) проникают внутрь твердого тела, вступая во взаимодействие с оксидами по всему его объему одновременно (рисунок 4.б).



$C_v^n$  – концентрация восстановителя в газовом потоке;

$C_v^n$ ,  $C_n^n$ ,  $C_v^k$ ,  $C_n^k$  – соответственно, начальные и конечные концентрации восстановителя и продуктов реакции;

а – модель тела с непрореагировавшим ядром; б – квазигомогенная модель

**Рисунок 4. – Физические модели восстановления оксидов**

Возможны несколько наиболее вероятных вариантов развития процесса.

В случае, когда лимитирующей стадией является диффузия восстановителя сквозь пограничную пленку, удерживаемую на реакционной поверхности,



время восстановления частички определяется ее характерным размером (диаметром или толщиной –  $a$ , м), обратно пропорционально ее пористости, которая учитывается с помощью кажущейся плотности частички ( $\rho_b$ , кг/м<sup>3</sup>), и концентрационным напором восстановителя в пленке ( $\Delta C_b$ ):

$$\tau = 3 \frac{\rho_b a}{b k_g \Delta C_b}, \text{ с}, \quad (4)$$

где  $b$  – стехиометрический коэффициент реакции;  $k_g$  – коэффициент скорости химической реакции, моль/(м<sup>2</sup>·с);  $\Delta C_b$  – разница концентраций восстановителя в потоке и на поверхности частицы,  $\Delta C_b = C_b^n - C_b^k$ .

Если лимитирующей стадией является скорость внутренней диффузии, время полного восстановления составит:

$$\tau = 3 \frac{\rho_b a^2}{b D \Delta C_b}, \text{ с}, \quad (5)$$

где  $\Delta C_b$  – концентрационный напор восстановителя в частице  $\Delta C_b = C_b^n - C_b^k$ .

Оценить долевое влияние каждой стадии восстановления можно по соотношению:

$$-\frac{1}{S} \frac{dN_b}{d\tau} = K_{\Sigma} C_b = \frac{1}{\frac{1}{k_g} + \frac{1}{k_D} + \frac{1}{k_s}} C_b, \quad (6)$$

где  $\frac{1}{S} \frac{dN_b}{d\tau}$  – поток восстановителя через оксидную частицу;  $dN_b$  – изменение количества восстановителя за время  $\tau$ ;  $S$  – площадь реакционной поверхности;  $K_{\Sigma}$  – суммарный коэффициент скорости переноса восстановителя;  $k_D$  – коэффициент скорости диффузии восстановителя через пограничную пленку;  $k_s$  – коэффициент скорости движения восстановителя внутри пористой частицы.

Адекватность квазигомогенной модели проверялась путем проведения направленных экспериментов, в которых определялась результирующая скорость (продолжительность) процесса и степень восстановления. Полученные данные показали хорошую сходимость с расчетными значениями.

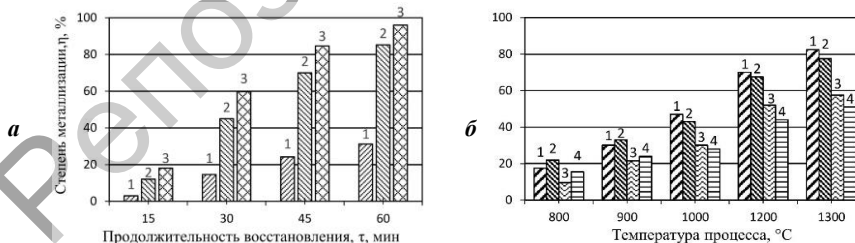
Лабораторные исследования процессов твердофазного восстановления дисперсных железосодержащих отходов (кузнечной и прокатной окалины, шлама и аспирационной пыли) осуществлялись в стационарном и в динамическом слое материалов в диапазоне 700-1300°С. Восстановление в стационарном слое проводилось как при полойной загрузке восстановителя и оксидов, так и после их предварительного перемешивания, в закрытых и открытых тиглях. Для исследования процессов восстановления в динамическом слое была специально разработана лабораторная установка, поз-

воляющая воспроизвести движение материала в ротационной печи. Процесс восстановления контролировался по убыли массы образца железосодержащих отходов, а достигнутая степень металлизации уточнялась по результатам химанализа образцов.

Дополнительно контролировался состав отходящих газов – CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>.

Предварительное перемешивание оксидов и восстановителя более чем в 3 раза повышает интенсивность массообменных процессов и скорость восстановления. В динамическом слое скорости вырастают еще в 1,3-1,5 раза (рисунок 5, а). Наличие примесей и сложных соединений в составе железосодержащих отходов замедляет процессы восстановления, как следствие – многокомпонентные отходы восстанавливаются медленнее оксидных (рисунок 6.а). Активное развитие процессов ТФВ оксидов железа начинается при температурах выше 800 °С, увеличение температуры с 800 до 1000 °С в 2 раза повышает скорость процесса, при температуре 1200 °С скорость восстановления увеличивается еще в 1,2-1,5 раза (рисунок 5.б). При 1000-1100 °С уже через 15 минут в динамическом слое степень восстановления окалины графитом достигала 25-30%. Через 45 минут обработки при этих условиях окалина практически полностью восстанавливалась:  $\eta=90-98\%$  (рисунок 6.б). Аналогичные результаты были получены и при использовании других восстановителей: антрацита, лигнина и коксика, изменялось лишь время восстановления, что связано с различной реакционной способностью этих материалов. Полученные скорости в 6–8 раз выше, чем в известных процессах ТФВ при аналогичных температурах.

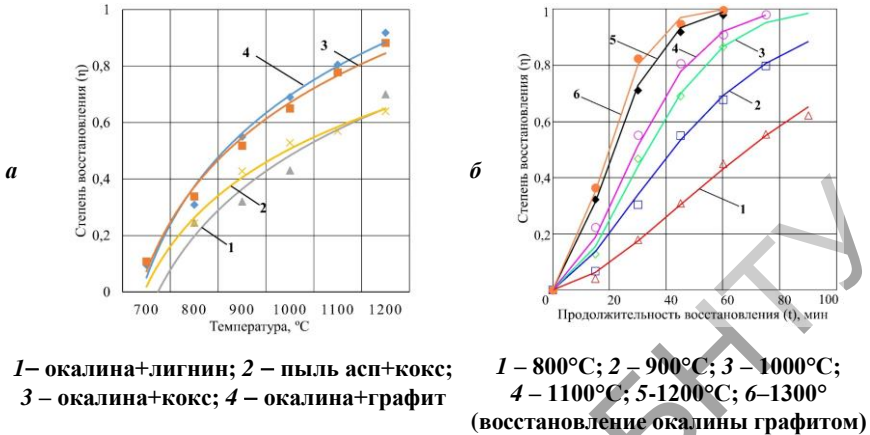
Одной из задач, поставленных в работе, было исследование эффективности использования различных твердых углеродсодержащих материалов для восстановления железосодержащих отходов. Исследовались материалы от графита (практически чистый углерод) до лигнина (отходы гидролольного производства спирта) при различных соотношениях и температурах. Наилучшими восстанавливаемыми способностями в диапазоне температур 1000-1300°С обладает графит, затем по убывающей: кокс, антрацит, лигнин (рисунок 5.б).



- 1 – послойное расположение материалов,  
2 – предварительно перемешанные материалы,  
3 – восстановление во вращающейся емкости

- 1 – графит, 2 – коксик,  
3 – антрацит, 4 – лигнин,  
восстановление в течение 30 минут

Рисунок 5. – Влияние условий восстановления (а) и используемого восстановителя (б) на скорость и степень металлизации окалины



**Рисунок 6. – Влияние вида восстановителя (а) и температуры (б) на процесс твердофазного восстановления**

Существенное значение для процессов восстановления имеет участие водорода, который увеличивает скорости процесса и смещает начало активной металлизации в область более низких температур. Так, в присутствии водорода при температурах процесса выше 900°C скорость и степень металлизации увеличиваются на 10-20 %. Водород не только сам участвует в восстановлении, но и выполняет при этом роль транспорта восстановителей в пористых структурах оксидных материалов, усиливает автокаталитический характер процесса восстановления, повышает роль прямого восстановления оксидов углеродом. Наличие водорода в составе печной атмосферы создает также условия для связывания и удаления серы через образование сероводорода, что способствует снижению содержания серы в получаемом металле.

Полученные результаты подтверждают адекватность применения квазигомогенной модели для описания процессов восстановления дисперсных железо-содержащих отходов. Построенные по экспериментальным данным графики в координатах «степень восстановления – время» и «степень восстановления – температура» в диапазоне 800-1300°C достаточно близко описываются экспоненциальной зависимостью вида:

$$\eta = 1 - \exp(-\alpha T_{np}^{\beta}), \quad (7)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  эмпирические коэффициенты, отражающие влияние дисперсности, пористости, реакционной способности восстановителя и состава газов (степени окисленности атмосферы).

Максимальное среднее квадратичное отклонение аппроксимирующих функций от экспериментальных данных при восстановлении окалины в динамическом слое составило: для графита – 0,032; коксика – 0,039; антрацита – 0,017; лигнина – 0,016 (рисунок 6). Результаты лабораторных экспериментов подтверди-

лись и в производственных условиях при отработке технологии рециклинга железосодержащих отходов на опытно-промышленном образце РНП.

В четвертой главе представлены результаты исследований процессов перехода к расплаву и жидкофазного восстановления оксидов железа как завершающей стадии рециклинга. Для исследования этих процессов в условиях максимально близких к производственным и разработки непрерывного твердо-жидкофазного процесса рециклинга была разработана опытно-промышленная ротационная наклоняющаяся печь РНП-0,5 (рисунок 7).



*а* – стадия ТФВ; *б* – стадия ЖФВ; *в* – слив металла и шлака в изложницу

**Рисунок 7. – Проведение экспериментальных плавов окалины в РНП-0,5**

Несмотря на то, что термодинамика процессов восстановления оксидов железа в жидкой ванне практически одинакова для любых агрегатов, осуществляющих процесс ЖФВ, кинетика процесса имеет существенные отличия, что, в конечном счете, приводит к различным технологиям рециклинга. В РНП переход к жидкой фазе начинается непосредственно после ТФВ путем перегрева и расплавления дисперсных металлизированных частиц при интенсивном перемешивании. Образующийся расплав представляет собой динамическую газожидкостную массу (пену). Турбулентный высокоскоростной газовый поток в РНП активно взаимодействует со шлаковым расплавом и поддерживает пенообразование.

В первичных каплях металла, содержащихся в отбираемых по ходу процесса пробах шлака, концентрация углерода достигает 3–4%. Образующийся сплав является чугуном, что соответствует и температурному диапазону процесса: первые капли образуются уже на начальной стадии ЖФВ при повышении температур в рабочей зоне до 1400–1450°C. При дальнейшем взаимодействии образующихся капель чугуна с расплавом, содержащим оксиды (FeO), происходит восстановление за счет углерода металла [C]:  $(\text{FeO}) + [\text{C}] \rightarrow [\text{Fe}] + \text{CO}$ .

Косвенным подтверждением этого является низкое содержание углерода: если не проводится специальная стадия науглероживания, металл, восстановленный в РНП, содержит не более 0,1–0,2% С.

Процесс перехода к расплаву и жидкофазного восстановления (довосстановлению) в РНП включает в себя следующие стадии:

- повышение температуры в рабочем пространстве печи до 1400-1500°C, образование (расплавление) шлака и появление первых капель чугуна;
- образование избыточного количества газов-восстановителей CO и H<sub>2</sub> и вспенивание шлака при дальнейшем росте температуры до 1700-1800°C;
- интенсивное взаимодействие оксидов железа (в основном – FeO) с твердым восстановителем (С) на границе раздела фаз в газовых пузырьках, как вспомогательный процесс – взаимодействие CO и H<sub>2</sub> с FeO и затем конверсия CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O твердым углеродом;
- обезуглероживание капель чугуна при движении в слое шлака с избыточным содержанием FeO;
- завершение процесса восстановления, уменьшение пенообразования, при необходимости – науглероживание жидкого металла.

Скорость перехода границы раздела компонентов «металл-шлак» (капля – слой шлака), примерно, в 10 раз больше скорости молекулярной диффузии в шлаках. Восстановление наиболее интенсивно идет на границе фаз. Кинетика процесса при высоких температурах описывается эмпирическим уравнением:

$$1 - \frac{1}{2}(1 - \eta) - \frac{1}{3}(1 - \eta)^{\frac{2}{3}} = k\tau \quad (8)$$

где  $\eta$  – степень восстановления FeO;  $k$  – константа скорости реакции, 1/с;  $\tau$  – время, с.

Восстановление в пузырьках вспененного шлака за счет CO и H<sub>2</sub>, возможно как стадия процесса с участием твердого углерода. С ростом температуры избыток CO сверх стехиометрического быстро возрастает. Реакция при высоких температурах достигает равновесия за ~ (3-5) с.

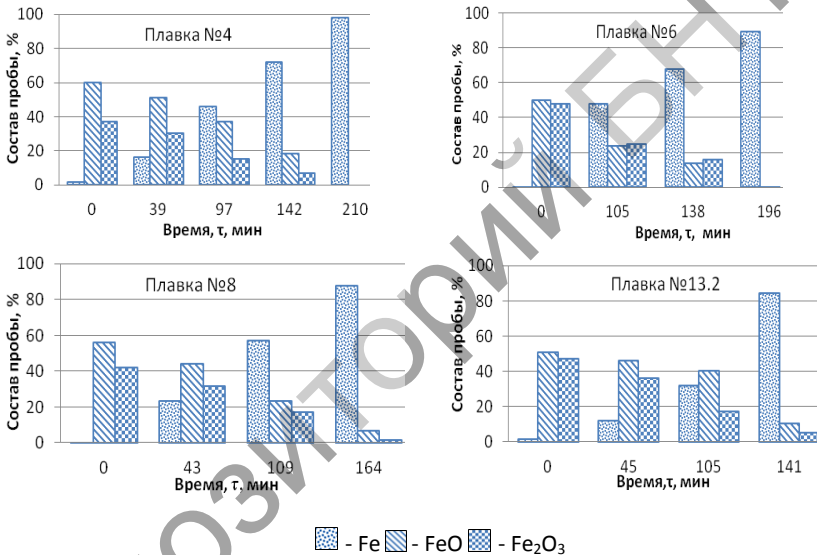
В условиях РНП, которые отличаются избытком восстановителя, значительной концентрацией FeO в шлаковом расплаве, заметным присутствием восстановленного и науглероженного железа, развитой поверхностью вспененного шлака, наиболее интенсивно развивается процесс первичного восстановления: (FeO) + C → [Fe] + CO. Полученные в опытно-промышленной РНП удельные (отнесенные к полезному объему печи) массовые скорости восстановления FeO равны 0,35-1,0 кг/(с·м<sup>3</sup>), что примерно в 6 раз выше скорости восстановления шлакового расплава продувкой CO.

РНП по сути является единственным плавильным агрегатом, который благодаря высокой технологической мобильности позволяет осуществить весь процесс восстановления оксидов в наиболее выгодном с точки зрения энергозатрат и термодинамики режиме: в начале при 1000-1200°C проводится процесс ТФВ, а после достижения уровня металлизации 70-80%, без перегрузки и охлаждения материала, печь переводится в режим ЖФВ.

После достижения температуры размягчения шлаков (1100-1200°C) начинается заметное спекание частиц, процесс переходит в стадию крицеобразования. Для ограничения развития этого процесса было использовано увеличение расхода восстановителя и добавление флюсов. Однако решающую роль играет

температура нагрева материала, его повышение до  $\sim 2$  К/с позволяет исключить образование кризиса. Весь период перехода в высокотемпературную область занимает 4-6 мин.

В опытно-промышленной РНП на Белорусском металлургическом заводе были проведены экспериментальные восстановительные плавки с различными составами шихты (использовались окалина, шлак, аспирационная пыль, чугунная и смешанная стружка, в качестве восстановителя – графит, коксик, антрацит, уголь, лигнин, флюсы – известняк, доломит, плавиковый шпат) и соотношениями режимных параметров ( $T$ ,  $\tau$ ) твердо- и жидкофазных процессов (рисунок 8).



**Рисунок 8.** – Изменение состава окалины при проведении восстановительных плавки в РНП с использованием различных технологических режимов

Экспериментальные плавки показали, что при оптимальных режимах непрерывный процесс твердо-жидкофазного восстановления обеспечивает выход металла, близкий к теоретически возможному – до 90% от  $Fe_{общ}$ . Некоторые составы полученного металла представлены в таблице 1.

По основным и примесным элементам металл соответствовал составу исходного железосодержащего сырья, содержание P не превышало 0,02%, S – 0,2% и определялось, в основном, составом используемых восстановителей. Количество углерода в решающей степени зависит от режима рециклинга, а также от того проводится или нет в конце процесса науглероживание.

Таблица 1. – Состав металла, полученного в РНП из железосодержащих отходов

№ пл.	Содержание компонентов, %											
	Fe <sub>общ</sub>	Fe <sub>мет</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C	S	Mn	Si	P	Cr	Ni	Cu
1	97,5	92,5	5,1	1,4	0,23	0,1	0,25	0,2	0,02	0,001	0,14	0,24
3	96,0	95,2	1,1	–	2,3	0,07	0,02	0,05	0,011	0,004	0,1	0,23
4	97,8	97,8	0,3	–	1,3	0,14	0,008	0,17	0,012	0,01	0,11	0,22
6	93,9	90,4	1,5	0,9	0,6	0,04	0,16	0,65	0,04	–	0,09	0,2
8	93,8	87,5	6,5	1,1	3,8	0,05	0,02	0,05	0,02	0,015	0,12	0,34
13.2	91,2	84,0	9,0	5,2	0,17	0,25	0,05	0,1	0,02	0,05	0,31	0,33
14.1	93,8	86,2	9,8	–	0,09	0,06	0,34	1,5	0,011	0,001	0,14	0,23

Примечание: пл. №6 – базовый состав шихты: окалина, коксик, известняк; пл. №1 – окалина 67% + пыль ДСП 33%, антрацит вместо коксика; пл. №3 – на стадии ЖФВ добавлялся графит; пл. №4 – известняк+плавиковый шпат; пл. №8 – науглероживание графитом; пл. №13.2 – окалина 50%+ шлам 50%, уголь вместо кокса; пл. № 14.1 – окалина 67% + пыль ДСП 33%, лигнин вместо кокса.

Отличия разработанного способа рециклинга в РНП, основанного на непрерывном твердо-жидкофазном процессе восстановления, от известных технологий прямого получения железа, можно представить с помощью диаграммы Fe-C (рисунок 9).

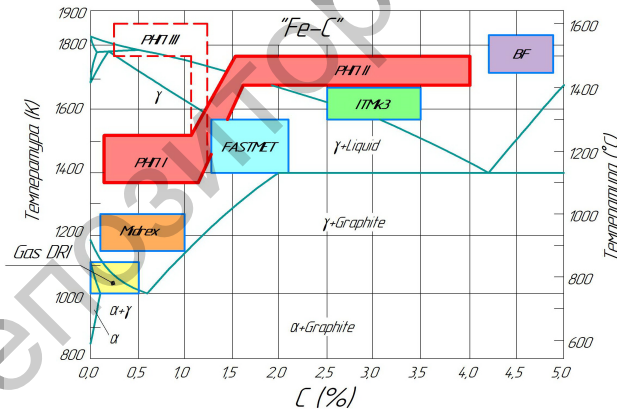


Рисунок 9. – Технологический интервал получения железоуглеродистых сплавов в РНП

Процесс ТФВ в РНП (область РНП I) протекает при более высоких температурах чем в шахтных печах, таких как Midrex, HIL и др., и примерно соответствует рабочим температурам в печах с вращающимся подом (процессы Fastmet, Comet). Но в отличие от большинства одностадийных процессов ТФВ, где конечным продуктом является губчатое железо (исключение составляет

лишь ПТmk3, в котором продуктом являются гранулы (корольки) чугуна), разработанный процесс включает в себя переход в стадию ЖФВ с получением стали (область РНП III) или чугуна (область РНП II), аналогичного получаемому в доменных печах (BF).

**В пятой главе** представлены результаты комплексного исследования процессов теплообмена, движения газов и дисперсных материалов в ротационных печах, выполненные с использованием компьютерного и имитационного моделирования.

Для математического описания движения газов использовалась система уравнений Навье-Стокса для реальных неизоэтермических потоков, уравнений неразрывности, сохранения энергии и состояния. Передача тепла нагреваемому материалу в печах подобного типа осуществляется в основном конвекцией. Дополнительно, особенно в зоне температур выше 1300 К, тепло передается излучением от газов к футеровке и слою материалов, а также от нагретой футеровки к материалу с учетом степени черноты газов и угловых коэффициентов. При этом установлено, что доля тепла, передаваемого материалу излучением, в ротационных печах не превышает 10-15%.

Суммарное тепловое взаимодействие поверхности слоя с окружающей средой в ротационной печи может быть представлено следующим выражением:

$$\lambda_{cl} \frac{dT}{dx} = -\alpha(T_g - T_M) + c_{лр}(T_{cm}^4 - T_M^4)f_{лр} + c_{лг}(T_g^4 - T_M^4)\xi_{лр}, \quad (9)$$

где  $\lambda_{cl}$  – теплопроводность слоя, Вт/(м·К);  $\alpha$  – коэффициент конвективной теплоотдачи от газового потока к слою материала, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_g$ ,  $T_M$ ,  $T_{cm}$  – соответственно, температуры газов, материала, стенок печи, К;  $c_{лр}$  – приведенный коэффициент излучения от стен печи, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $f_{лр}$  – угловой коэффициент;  $c_{лг}$  – коэффициент излучения газового потока, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $\xi_{лр}$  – степени черноты газов. Коэффициент конвективной теплоотдачи от газового потока к слою материала определялся из критериальной зависимости вида  $\alpha = f(Re, Nu, Pr)$  и рассчитывался по ходу процесса по результатам расчета текущих температур и режимов движения потока.

Для расчета нагрева динамического продуваемого слоя дисперсных материалов использовалось эмпирическое уравнение Б.И.Китаева для продуваемого движущегося слоя агломерата в доменной печи, приведенное к условиям ротационной печи:

$$\frac{T_M}{T_g} = 1 - \exp \left[ -\psi \frac{\alpha_v}{c_M^* (1 - \varphi)} \left( 1 - \frac{Q_g c_g^*}{Q_M c_M^*} \right) \tau \right], \quad (10)$$

где  $Q_g$  и  $Q_M$  – расход газов-теплоносителей, м<sup>3</sup>/с, и количество материала, одновременно нагреваемого в печи, кг;  $c_g^*$ ,  $c_M^*$  – кажущиеся теплоемкости газов и материала, учитывающие тепловые эффекты физико-химических превраще-

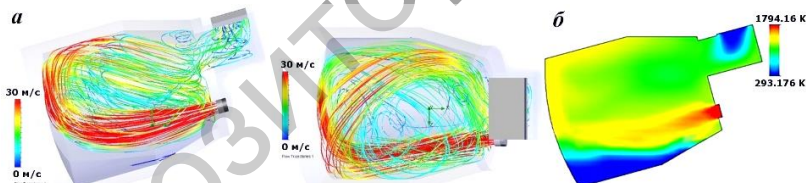


ний,  $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$  и  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ , соответственно;  $\psi$  – коэффициент, зависящий от критерия Био:  $\psi = \frac{1}{1 + 0,2 Bi}$ ;  $\phi$  – порозность слоя;  $\alpha_v$  – коэффициент теплоотдачи на единицу объема дисперсного материала,  $\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ . Объемный и поверхностный коэффициенты теплообмена связаны соотношением:  $\alpha_v = \alpha \cdot S / \phi$ , где  $S$  – средняя удельная площадь поверхности частиц слоя,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ . Коэффициенты  $\alpha_v$  и  $\lambda_{ct}$  определялись по результатам натуральных экспериментов.

Численное моделирование проводилось для печей различного типа: традиционных короткобарабанных с прямолинейным поступательным движением газового потока (КБП) и ротационных наклоняющихся с петлеобразным циркуляционным движением газов.

Верификация результатов моделирования осуществлялась при проведении экспериментальных плавков на опытно-промышленной печи РНП-0,5 и производственных испытаний промышленных печей КБП-3,0 и РНП-2,0, предназначенных, соответственно, для рециклинга свинцовых шламов и переработки стружки черных металлов.

Исследования выполнялись с помощью прикладных программных пакетов (ППП) ANSYS CFX и Solid Works Flow Simulation. Для исследования течения газов использовалась 3D-модель печи, созданная в ППП SolidWorks 14.0, разбитая с помощью ANSYS Meshing на сетку с количеством элементов, равным 290665 шт. Результатами численного моделирования являются поля температур, скоростей и траектории движения газового потока (рисунок 10).



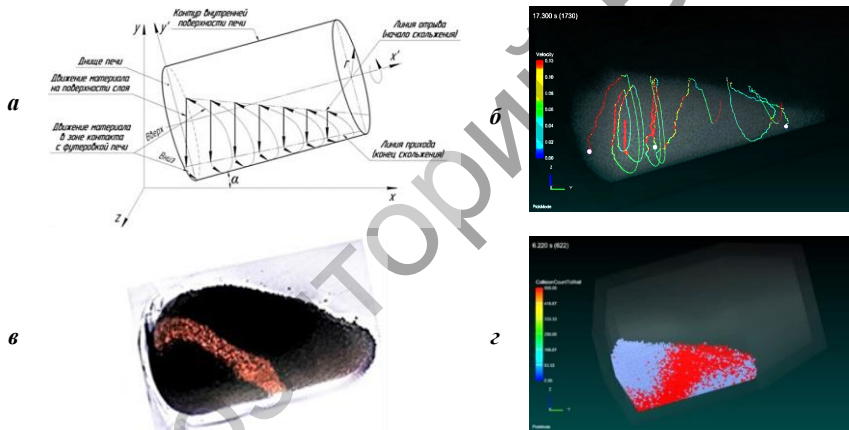
**Рисунок 10.** – Траектории и скорости движения газов (а) и температуры (б) в РНП

Моделирование позволило установить, что характер движения газов в РНП значительно отличается от традиционных представлений. Газовый поток в рабочем пространстве РНП вращается как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях, причем при определенных режимах может происходить смена направления вращения. Скорости взаимодействия потока газов с материалом при циркуляционном движении в 5-8 раз превышают поступательную (осевую) скорость потока, что соответственно интенсифицирует теплообмен ( $\alpha_v \sim v_2^{0,65}$ ) и, благодаря циклонному эффекту, уменьшает унос высокодисперсных фракций материала из печи. Аэродинамика потока и его взаимодействие с материалом зависит от расположения горелок, их числа и угла атаки, конфигурации слоя

Результаты численного моделирования движения газов послужили базой для разработки технических решений, направленных интенсификацию работы ротационных печей, которые были успешно реализованы на практике.

Для исследования характера и закономерностей движения дисперсных материалов в РНП была разработана методика имитационного моделирования. Модель выполнялась на основе принципов гидродинамического подобия. Подобие режимов движения материалов в модели и реальной печи, в частности, по структуре и конфигурации слоя, позволило распространить полученные результаты на натурные образцы.

Благодаря имитационному моделированию было установлено, что дисперсные материалы совершают в РНП винтовое возвратно-поступательное движение, что, в отличие от традиционных вращающихся печей, обеспечивает активное перемешивание материала, как в радиальном, так и в осевом направлении (рисунок 11).



**а** – схема движения дисперсной частицы, находящейся на поверхности слоя;  
**б** – расчетная траектория движения отдельных частиц материала;  
**в** – движение материалов в имитационной модели; **z** – компьютерное моделирование процесса перемешивания

**Рисунок 11. – Движение дисперсных материалов в РНП**

Скорость “вращения” материала в поперечном сечении превышает скорость вращения печи в 2-5 раз. Это превышение зависит от адгезионных свойств материала, относительного объема загрузки и величины сегмента, занимаемого материалом. Чем ближе материал находится к горловине печи, тем меньший сегмент окружности он занимает и тем больше оборотов совершает за один оборот печи. При снижении сцепления материала с футеровкой, что наблюдается,

например, при высокотемпературном нагреве металлоотходов, когда силы аутогезии превышают силы трения, материал начинает проскальзывать по поверхности печи и слабо участвует в обменных процессах.

В общем случае, в поперечном (радиальном) сечении материала, вращающегося в РНП, можно выделить две зоны: относительно неподвижное ядро и активно циркулирующую вокруг него периферийную зону.

Скорость движения частиц в зоне, примыкающей к поверхности печи ( $v_p^I$ ), определяется скоростью вращения печи ( $\omega$ ) и внешним трением на границе «материал – футеровка»:  $v_p^I = k \cdot \omega \cdot r$ , где  $k$  – коэффициент, учитывающий условия внешнего трения,  $k \leq 1$ .

Скорость движения материала, находящегося на свободной поверхности слоя в момент обрушения (скольжения), определяется перепадом высот ( $\Delta H$ ) между точками начала скольжения и его завершения, углом наклона печи ( $\alpha$ ) и зависит от внутреннего трения материала. В общем случае для скорости движения частиц по свободной поверхности в осевом ( $v_o^{II}$ ) и радиальном ( $v_p^{II}$ ) направлении можно записать:  $v_o^{II} = \sqrt{\Delta H \cdot a_o \cdot \sin \alpha}$ ,  $v_p^{II} = \sqrt{\Delta H \cdot a_p \cdot \cos \alpha}$ , где  $a_o$  и  $a_p$  – соответственно, осевая и радиальная составляющие ускорения ( $a$ ) движения частицы по свободной поверхности слоя,  $a = g - \gamma g$ , где  $\gamma$  – коэффициент сопротивления движению частицы по свободной поверхности слоя, в первом приближении можно считать его равным коэффициенту внутреннего трения  $\gamma = f_o$ .

Для определения количественных характеристик движения дисперсных материалов в РНП было проведено компьютерное моделирование с использованием ППП CD-Adapco Star CCM+ и метода DEM (конечных элементов). Расчет выполнялся на основе мгновенного баланса сил тяжести, инерции, с учетом сил аутогезии и адгезии, упруго-вязко-пластического взаимодействия между частицами, размеров и формы частиц. В результате были уточнены данные о движении материалов в РНП и структуре слоев по всей длине печи, впервые были получены количественные характеристики траекторий и скоростей отдельных частиц, определены параметры процесса перемешивания материала (конвекции) и его взаимодействия с поверхностью печи, что позволило получить данные необходимые для расчета теплообмена в слое и на границе «материал–футеровка».

Численное моделирование позволило установить, что скорости движения частиц в ядре и на периферии слоя могут отличаться в десятки раз, однако четкой границы между зонами не существует, распределение скоростей в пределах поперечного сечения нестабильно, зависит от расстояния до горловины печи (толщины слоя) и изменяется во времени (рисунок 12).

Большой градиент скоростей в сечении слоя и пульсационный характер движения материала в РНП обеспечивают высокую интенсивность перемешивания и, как следствие, теплообмена в слое. Как показали результаты имитационного

и компьютерного моделирования, выравнивание состава и соответственно температуры в слое материала в РНП происходит в течение 5-10 оборотов корпуса печи (рисунок 13).

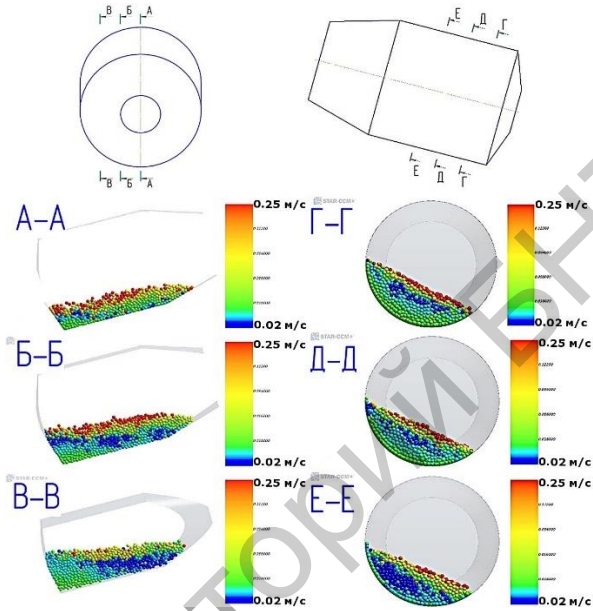
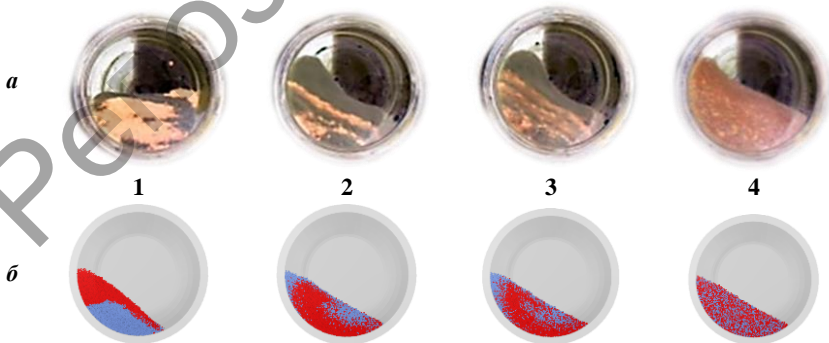


Рисунок 12. – Распределение скоростей частиц в поперечном и продольном сечении слоя материала в РНП



1 – начало вращения; 2 – один оборот корпуса; 3 – 2 оборота; 4 – 6 оборотов  
 а – имитационное моделирование; б – компьютерное моделирование

Рисунок 13. – Перемешивание материала в РНП

Данные по скорости смешивания материалов, полученные в результате численного моделирования, позволили рассчитать объемный коэффициент теплообмена в слое, который для условий нагрева материалов в РНП составил  $\alpha_v = 2-3$  кВт/(м<sup>3</sup>·К), что подтвердилось при проведении производственных испытаний печи РНП-2,0 на Гомельском литейном заводе «Центролит».

Комплексные исследования движения дисперсных материалов и теплообменных процессов в РНП позволили определить оптимальные технологические режимы их работы и разработать рекомендации по проектированию и применению.

**В шестой главе** представлены рекомендации по расчету и конструированию РНП различной производительности, емкости и назначения, разработанные технологические процессы и оборудование для рециклинга дисперсных железосодержащих отходов и отходов цветных металлов, результаты их апробации и освоения в производстве, а также рекомендации по организации производственных участков рециклинга металлоотходов на предприятиях втормета и машиностроительных заводах.

Разработанные ротационные наклоняющиеся плавильные печи являются первыми печами такого рода созданными в Беларуси, а печи, предназначенные для рециклинга дисперсных железосодержащих отходов не имеют мировых аналогов. Созданные агрегаты позволяют эффективно работать с дисперсными отходами как черных, так и цветных металлов. КПД печей достигает 50-55%, что в 3-5 раз выше, чем у электрических индукционных, дуговых или стационарных топливных печей при работе на подобных материалах. РНП обеспечивают в 2 раза более высокие скорости нагрева и в 1,5-2 раза меньший пылеунос чем традиционные КБП.

Ротационные печи позволяют вести методический режим обработки как по температуре, так и по составу атмосферы печи. Шлак в таких печах перегрет и имеет высокую активность. В случае необходимости в них можно произвести доводку расплава и его рафинирование перед разливкой. Ротационные печи могут работать на жидком и газообразном топливе, а в качестве восстановителей использовать любые углеродосодержащие материалы, в том числе, отходы (например, отсев кокса и угля или лигнин). Достоинством таких печей являются относительно низкие капитальные затраты и простота изготовления, удобство обслуживания и высокая степень управляемости металлургических процессов.

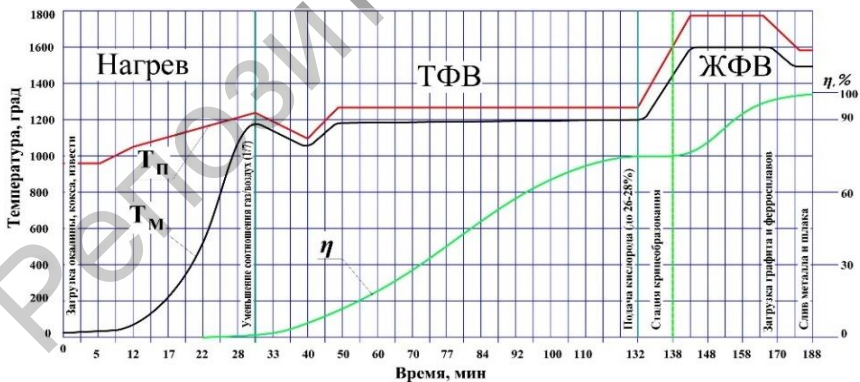
В РНП могут быть успешно реализованы процессы переработки как металлических, так и оксидных отходов, а также безокислительный высокотемпературный нагрев дисперсных шихтовых материалов, например, стружки, с последующей переплавкой их в имеющихся индукционных печах. Такая схема была реализована на Гомельском литейном заводе «Центролит». Нагрев стружки в РНП до 700-800 °С при затратах природного газа 8-14 м<sup>3</sup> на тонну позволил полностью освободиться от влаги, масел и органических примесей, на 180-220 кВт·час сократить удельные затраты электроэнергии и на 30-35% время расплавления стружки в индукционных печах.

Технология переработки оксидных и многокомпонентных железосодержащих отходов в РНП может быть условно разделена на два основных этапа, реализуемых последовательно и неразрывно:

I – нагрев и твердофазное восстановление оксидов железа в восстановительной атмосфере (достигается сжиганием газа при недостатке кислорода  $\alpha = 0,6-0,7$ ) в присутствии восстановителя при температуре 1000-1200 °С. Этот процесс занимает 2,5-3 часа в зависимости от степени окисленности исходного сырья. По окончании ТФВ степень металлизации достигает 70-80%;

II – расплавление, жидкофазное восстановление, при необходимости – науглероживание расплава, выдержка до прекращения кипа и разливка в изложницы. Температура в печи поднимается до 1700-1800 °С, что достигается обогащением дутья кислородом до 27-29%. Продолжительность стадии – 30-50 минут, при этом степень металлизации достигает 95-98 %.

Апробация технологического процесса проводилась на опытно-промышленной печи РНП-0,5 на Белорусском металлургическом заводе, по результатам были получены следующие данные по удельному расходу основных материалов и энергоносителей: железосодержащее сырьё (окалина, шлам) – 1550-1700 кг, флюсы (известняк, доломит, плакиновый шпат) – 100-150 кг, восстановитель (коксик, отсев угля) – 600-700 кг, топливо (природный газ) – 200-220 м<sup>3</sup>, кислород – 35-45 м<sup>3</sup>, электроэнергия ~ 15 кВт·ч. Указанные расходы изменяются пропорционально содержанию железа ( $Fe_{общ}$ ) в исходном сырье. При переработке окалины выход металла достигал 62-64% при влажности сырья 3-5% и  $Fe_{общ} \sim 72-75\%$ , т.е. составил 85-91% от теоретически возможного. Характерный температурно-временной режим рециклинга окалины представлен на рисунке 14.



$T_{II}$  – температура в печи;  $T_M$  – температура материалов;  
 $\eta$  – степень металлизации

Рисунок 14. – Режим восстановительной плавки окалины в РНП

Процесс рециклинга металлических отходов (стружки, мелкого скрапа, отходов дробилки и т.п.) в РНП сводится к переплавке. Окисление металла при нагреве предотвращается благодаря высокой скорости нагрева (60-80 К/мин.) и созданию восстановительной атмосферы в печи.

Полученный в РНП металл в зависимости от поставленной задачи может быть: 1 – разлит в слитки (чушку) с последующим использованием в качестве шихты в традиционных плавильных агрегатах; 2 – передан в жидком виде в электропечи для доводки – получения химсостава, соответствующего марочным сплавам; 3 – доведен до заданного состава непосредственно в РНП.

Металл, полученный в РНП-0,5, использовался при выплавке сортовой стали в электродуговых печах «БМЗ», а также для замены традиционных шихтовых материалов при плавке серого чугуна в среднечастотных тигельных печах литейного цеха БНТУ. Аprobация этого процесса была осуществлена при получении опытной партии типовых фасонных отливок из чугуна СЧ 20. При выплавке металла для опытной партии отливок 50% шихты было заменено на металл из РНП. Все отливки опытной партии соответствовали требованиям конструкторской и технической документации и ГОСТ 1215-85, не уступали по качеству отливкам из контрольной партии и превосходили их по прочностным показателям.

На машиностроительных заводах, имеющих собственное литейное производство наиболее рациональным способом рециклинга является реализация дуплекс-процесса: «РНП–индукционная печь» или «РНП–дуговая печь». При этом исключается необходимость повторного расплавления чушки, а затраты электроэнергии на плавку могут быть сокращены до 100-150 кВт·ч на тонну.

Помимо рециклинга железосодержащих отходов (окалины, шлама, железного огарка, стальной и чугунной стружки) были разработаны и внедрены в производство технологические процессы и ротационные печи, предназначенные для переработки дисперсных алюминиевых, медных и свинцовосодержащих отходов (лома аккумуляторных батарей).

В общей сложности при выполнении диссертации создано 8 технологических процессов рециклинга, модернизированы и спроектированы 15 ротационных установок (некоторые из них представлены на рисунке 15), для трех предприятий разработаны проектные решения. Результаты диссертации были внедрены или прошли апробацию на 12 предприятиях Республики Беларусь и России.

**В приложениях** приведены копии документов, подтверждающих практическое применение результатов диссертационной работы, разработанных технологий и оборудования (Акты производственных испытаний, апробации и внедрения), новизну технических решений (патенты и заявки на изобретения), адекватность результатов компьютерного моделирования процессов тепломассообмена в РНП, а также техдокументация на разработанные технологические процессы

*а**б**в*

*а* – переработка чугунной стружки "Центролит" (г. Гомель); *б* – рециклинг свинца "КПВР СПЛАВ" (г. Рязань, РФ); *в* – рециклинг алюминиевых отходов "БелТОР 7" (г. Мозырь)

**Рисунок 15. – Ротационные печи, разработанные в ходе выполнения работы**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Разработаны научно-технологические основы и установлены закономерности интенсивного рециклинга дисперсных железосодержащих отходов с характерным размером частиц (толщиной или диаметром)  $\leq (1-3) \cdot 10^{-3}$  м, основанного на непрерывном процессе твердо-жидкофазного восстановления в одном агрегате – РНП. Разработанная новая технология позволяет получать высококачественные шихтовые материалы – сталь и чугун из железосодержащих отходов различного состава, степени загрязнения, окисленности, неоднородности свойств и характеристик без их предварительной подготовки при высокой технологической гибкости и рентабельности производства. В качестве восстановителей могут использоваться отходы твердых углеродсодержащих материалов [4, 28, 35, 49, 50, 52]. Установленные закономерности интенсивной переработки дисперсных материалов в РНП могут эффективно использоваться и в рециклинге дисперсных отходов цветных сплавов, включая свинцовые, что подтвердили натурные испытания и опыт их внедрения [1, 10, 22, 39, 41].

2. Установлены характеристики дисперсных металлоотходов, определяющие выбор способов и технологических режимов их переработки в исходном некомоккованном виде: дисперсность, загрязненность, химический и минералогический состав, макро- и микропористость, плотность (истинная и кажущаяся), адгезионные свойства, скорости витания. Установлены закономерности изменения этих характеристик в процессе хранения, а также нагрева в динамическом слое. Существенная структурная и химическая неоднородность, большое количество дефектов, высокая дисперсность, пористость и развитая реакционная поверхность, присущие этим материалам, позволяют значительно интенсифицировать процессы их обработки (нагрева, восстановления, расплавления) в ротационных печах [6, 9, 12, 14, 27, 29, 52].



3. Установлен механизм переноса восстановителей ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}$ ) в пористых тонких структурах оксидных материалов, разработана квазигомогенная модель твердофазного восстановления пористых дисперсных частиц оксидов железа и схема расчета процесса восстановления подобных материалов при постоянном градиенте концентраций по сечению отдельного элемента слоя (частицы), с учетом его геометрических параметров, макро- и микропористости. Разработанная модель позволяет описать одновременное развитие восстановительных процессов в объеме пористой оксидной частицы, объясняет закономерности протекания гетерогенных процессов в динамическом продуваемом слое дисперсных железосодержащих отходов со скоростями, в десятки раз превышающими восстановление окускованных материалов (агломерата или окатышей) [1, 16, 17, 24, 28, 40, 48, 50, 52].

4. Разработана методика и проведены исследования, позволившие определить эффективность использования различных твердых восстановителей в процессах ТФВ оксидов железа, а также выявить ускоряющее влияние водорода. Установлено, что в присутствии водорода при температурах  $900^\circ\text{C}$  и выше скорость и степень металлизации увеличивается на 10-20%, водород участвует в восстановлении и выполняет роль транспорта углерода в пористых структурах оксидных материалов, усиливает автокаталитический характер процесса восстановления, повышает долю и влияние прямого восстановления. По степени эффективности восстановления железосодержащих отходов в интервале температур  $1000\text{-}1300^\circ\text{C}$  исследованные углеродсодержащие материалы располагаются следующим образом: графит, кокс, антрацит, уголь, лигнин [7, 8, 10, 11, 14, 21, 23, 29, 30, 45, 54].

5. Выявлено и уточнено влияние режимных, в том числе температурных и концентрационных параметров на процессы восстановления. Установлена экспоненциальная зависимость скорости и степени восстановления дисперсных оксидных железосодержащих материалов в динамическом слое в диапазоне температур  $800\text{-}1300^\circ\text{C}$  от времени и температуры процесса:  $\eta = 1 - \exp(-\alpha T_{mp}^b)$ , что подтверждает адекватность разработанной квазигомогенной модели восстановления. Установлено, что повышение температуры восстановления с  $800$  до  $1100^\circ\text{C}$  в 2-3 раза увеличивает скорость процесса. Восстановление дисперсных оксидных железосодержащих отходов в динамическом слое с использованием дисперсных восстановителей ( $<1\text{мм}$ ) позволяет увеличить скорость процесса в 3-5 раз по сравнению с восстановлением в неподвижном слое [1, 24, 28, 31, 34, 44, 46, 48].

6. Выявлены закономерности перехода к расплаву и жидкофазному восстановлению. Определены режимы, исключаяющие спекание материалов и образование крицы при переходе от ТФВ к расплаву, при этом важнейшим требованием является высокая скорость подъема температуры  $\sim 2\text{ К/с}$ . Разработана физическая модель и математическое описание ЖФВ в РНП, где шлаковый расплав находится в постоянном движении, активно взаимодействуя с высокоскоростным турбулентным газовым потоком, и представляет собой однородную

динамическую газо-жидкостную массу (пену) с равномерно распределенными частицами твердого восстановителя. Это приводит к осуществлению окислительно-восстановительных реакций во всем объеме шлака и обеспечивает более высокую интенсивность восстановительных процессов, чем при струйной продувке в стационарных печах [13, 19, 20, 36, 47, 55].

7. Разработана методика расчета и математическое описание массопереноса и теплообмена в РНП в условиях взаимодействия высокоскоростного турбулентного газового потока с динамическим слоем перемешиваемых дисперсных материалов с учетом структуры слоя, характеристик материалов и параметров процесса. Впервые проведено комплексное исследование теплообменных процессов, включающее натурные эксперименты, компьютерное и имитационное моделирование, позволившее установить новые закономерности и впервые дать количественную оценку движения газов и материалов в печах такого типа. Учитывая, что в РНП скорости движения материала сопоставимы со скоростью движения газов, полученные данные расширяют и дополняют представления общей теории печей, в которой движение материалов практически не учитывается – считается пренебрежимо малым относительно скорости газового потока.

Циркуляции (вращения) газов в РНП происходят в вертикальной и горизонтальной плоскостях, причем циркуляционные скорости на порядок превышают поступательную скорость газового потока, что обеспечивает интенсификацию процессов теплообмена и массопереноса. Установлена параболическая зависимость коэффициента теплообмена от скорости движения газового потока относительно поверхности материала в степени 0,5-0,8. Высокие скорости вращения газового потока в РНП создают циклонный эффект, благодаря которому более чем в 2 раза снижается вынос из печи высокодисперсных материалов. Характер движения газов в РНП и эффективность работы печи существенно зависят от скорости и направления факела газовых горелок и их позиционирования относительно слоя материала. Адекватность расчетов, представленных в работе, подтверждается результатами верификации и практикой применения разработанных печей [1-3, 5, 17, 18, 25, 26, 30, 31, 36, 38, 53].

8. Выявлен характер и закономерности движения дисперсных материалов в РНП. Впервые установлено, что материал совершает винтовое возвратно-поступательное движение с осевой скоростью, зависящей от диаметра, угла наклона и скорости вращения печи, при этом его окружная скорость превышает в 2-5 раз скорость вращения печи, пропорционально отношению длины окружности корпуса к длине сектора, занимаемого материалом. Выявлена структура динамического слоя материала, состоящая из поверхностной зоны активного движения («скользящей зоны») и относительно неподвижного «ядра». Скорости движения частиц в ядре и на периферии слоя отличаются в десятки раз, но четкой границы между зонами не существует.

Впервые получены данные о траектории движения отдельной частицы динамического слоя. Параметры и конфигурация слоя зависят от адгезионных и аутогезионных характеристик материала, скорости вращения и угла наклона

печи. Высокие скорости вращения слоя, возвратно-поступательное движение в осевом направлении, градиент скоростей по сечению слоя, пульсационный характер движения обеспечивают высокую интенсивность перемешивания и, соответственно, теплообмена. Объемный коэффициент теплообмена в РНП достигает значений 2000-3000 Вт/(м<sup>3</sup>·К), что почти на 3 порядка выше чем в стационарном слое. Разработана схема расчета движения полидисперсного материала в РНП. Полученные данные расширяют представления теории движения и смешивания дисперсных сыпучих материалов во вращающихся установках [32, 34, 39, 42].

9. Установлены оптимальные конструктивные и механические параметры КБП и РНП, обеспечивающие высокие прочностные и динамические характеристики печей, надежность и устойчивость при знакопеременных нагрузках. Разработаны РНП, отличающиеся формой и соотношением основных размеров рабочего пространства, профилем днища, позиционированием горелок и возможностью управления вектором газового потока, наличием устройств для подачи в печь газообразных и порошкообразных продуктов (кислорода, восстановителей, флюсов) и повышения интенсивности перемешивания материалов, возможностью обогащения дутья и управления атмосферой в печи, конструкцией приводов, опорной части, крышки печи и газоотводящего тракта. Созданные РНП позволяют осуществлять рециклинг как черных, так и цветных металлоотходов, обеспечивают гибкий управляемый режим термообработки, безокислительный интенсивный нагрев и высокие скорости восстановления и расплавления дисперсных материалов, сокращение пылеуноса и высокий термический КПД, который в 2,5-3,0 раза превышает КПД традиционных печей [30, 31, 33, 43, 59-62].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Разработанные в ходе выполнения диссертации новые технологические процессы, оборудование для их реализации, проектные решения были внедрены или прошли апробацию на 12 предприятиях Республики Беларусь и Российской Федерации, в том числе для рециклинга железосодержащих и свинецсодержащих отходов, отходов алюминиевых и медных сплавов с получением высококачественных пихтовых материалов и литейных сплавов. Расчетный экономический эффект, полученный на указанных предприятиях, благодаря внедрению разработанных технологий и оборудования составил 1,46 млн. долларов США [37, 39, 44, 52, 54].

2. Разработаны рекомендации по расчету и конструированию ротационных печей емкостью от 0,5 до 20 тонн для рециклинга отходов черных и цветных металлов. В соответствии с этими рекомендациями модернизированы и изготовлены 15 ротационных установок. Разработанные печи имеют высокий термический КПД (до 50% и выше) и позволяют перерабатывать как вновь образующиеся низкосортные отходы, так и накопленные в отвалах [15, 30, 31, 33, 37, 39, 51]. Технические решения и конструкции установок защищены 7 патентами Республики Беларусь [56-62].

3. Впервые в мировой практике осуществлен процесс получения железа из оксидов (оксидных и многокомпонентных железосодержащих отходов) с выходом металла (чугуна или стали) до 90% от теоретически возможного путем непрерывного твердо-жидкофазного восстановления в одном агрегате (РНП) без перегрузок и остановок при интенсивном режиме со скоростями, в 5-10 раз превышающими скорости восстановления в известных процессах ТФВ, и в 3-4 раза меньшими удельными энергозатратами, чем в процессах ЖФВ. Процесс позволяет вести порционную переработку материалов, что дает возможность осуществлять децентрализованный, в том числе малотоннажный, рециклинг дисперсных металлоотходов без какой-либо их предварительной подготовки непосредственно на предприятиях-источниках этих отходов [1, 35-37, 49, 52, 54]. Приоритет разработанной технологии подтвержден заявкой на Евразийский патент [63].

4. Разработанные технологии и оборудование для рециклинга дисперсных металлоотходов рекомендуются для внедрения на машиностроительных, металлургических и металлообрабатывающих предприятиях, а также предприятиях втормета, где образуются и накапливаются дисперсные отходы черных и цветных металлов независимо от их состава, количества и степени загрязнения. Наибольшие преимущества эти технологии демонстрируют при переработке дисперсных материалов с размером частиц от 0,05-0,1 до 20-30 мм и содержанием извлекаемого металла не менее 40-45% [1, 13, 22, 29, 37, 39, 41, 43].

Внедрение разработанных технологий и получение высококачественных шихтовых материалов или непосредственно литейных сплавов из металлоотходов позволит решить важные экономические и экологические народнохозяйственные задачи: создать новую сырьевую базу для отечественного литейного производства, сократить импорт первичных шихтовых материалов и металлов, организовать безотходный оборот металлов в промышленности, ликвидировать накопленные металлоотходы. В масштабах Беларуси переработка только вновь образующихся железосодержащих отходов позволит ежегодно возвращать в производство до 150-200 тысяч тонн чугуна и стали. Рентабельность производственных участков по переработке собственных дисперсных металлоотходов, организованных на предприятиях, составит не менее 50%, а возврат инвестиций – не более 9-12 месяцев. Производственная мощность таких участков может составлять от 0,5-1 тысячи до 50-100 тысяч тонн ежегодно перерабатываемых отходов. Освоение результатов работы позволит получить реальный экономический и социальный эффект в масштабах страны [36, 43, 52].

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Монография

1. Ровин, С.Л. Рециклинг металлоотходов в ротационных печах / С.Л. Ровин. – Минск: БНТУ, 2015. – 382 с.

### Статьи

2. Ровин, Л.Е. Интенсификация тепловой обработки дисперсных материалов / Л.Е. Ровин, О.М. Валицкая, С.Л. Ровин // *Литье и металлургия*. – 2003. – № 3. – С. 97–98.

3. Ровин, С.Л. Печи ротационного нагрева / С.Л. Ровин, Л.Е. Ровин, О.М. Валицкая // *Литье и металлургия*. – 2004. – № 4. – С.84–86.

4. Ровин, Л.Е. Внедрение энергосберегающих технологий в литейном производстве / С.Л. Ровин, Л.Е. Ровин // *Энергоэффективность*. – 2005. – №5. – С.22–24.

5. Ровин, С.Л. Ротационные печи для тепловой обработки и сушки полидисперсных материалов / С.Л. Ровин, Л.Е. Ровин, О.М. Валицкая // *Литье и металлургия*. – 2006. – № 2, Ч.1. – С.64–67.

6. Ровин, Л.Е. Рециклинг железосодержащих отходов / Л.Е. Ровин, С.Л. Ровин // *Литье и металлургия*. – 2006. – № 2, Ч. 2. – С.159–165.

7. Ровин, С.Л. Вопросы ресурсосбережения в литейном и металлургическом производстве / С.Л. Ровин, Л.Е. Ровин // *Metall информ.* – 2008. – № 2-3. – С.32–36.

8. Ровин, С.Л. Пути ресурсосбережения в машиностроении / С.Л. Ровин // *Metall информ.* – 2008. – № 5. – С.41–43.

9. Ровин, С.Л. Чугунная стружка как шихтовой материал / С.Л. Ровин, В.М. Матюшенко, О.М. Валицкая, Т.М. Заяц // *Литье и металлургия*. – 2008. – № 3., Спецвыпуск. – С.158–161.

10. Ровин, С.Л. Рециклинг металлоотходов / С.Л. Ровин, Л.Е. Ровин, В.А. Жаранов // *Литье и металлургия*. – 2008. – № 3. Спецвыпуск. – С.153–157.

11. Ровин, Л.Е., Экономия энергетических и материальных ресурсов в литейном и металлургическом производстве / Л.Е. Ровин, С.Л. Ровин, Д.М. Кукуй // *Металлургия: Республ. межведом. сб. научн. тр.* – Минск: БНТУ, 2008. – Вып. 31. – С.107–129.

12. Кукуй, Д.М. Опыт утилизации металлической стружки / Д.М. Кукуй, И.В. Емельянович, В.П. Петровский, Л.Е. Ровин, С.Л. Ровин // *Литье и металлургия*. – 2009. – № 1. – С.47–50.

13. Кукуй, Д.М. Получение чугуна из окалины в ротационных печах / Д.М. Кукуй, Л.Е. Ровин, С.Л. Ровин, В.А. Маточкин, С.В. Терлецкий, В.Н. Прохоренко // *Литье и металлургия*. – 2009. – № 3. – С.200–203.

14. Кукуй, Д.М. Использование железосодержащих отходов РУП «БМЗ» в качестве вторичных материальных ресурсов / Д.М. Кукуй, Л.Е. Ровин, С.Л. Ровин, В.А. Маточкин, Т.Н. Липаткина // *Литье и металлургия*. – 2009. – № 3. – С. 314–316.

15. Ровин, С.Л. Металлургические достоинства ротационных наклоняющихся печей / С.Л. Ровин, Л.Е. Ровин, Т.М. Заяц // *Литье и металлургия*. – 2010. – № 4. – С. 40–44.

16. Ровин, С.Л. Восстановление оксидов железа в ротационных печах / С.Л. Ровин, Л.Е. Ровин, Т.М. Заяц // *Литье и металлургия*. – 2011. – № 1. – С. 38–45.

17. Rovin, S.L. One-stage metal wastes recycling / S.L. Rovin, L.E. Rovin, V.A. Zharanov, T.M. Zayats // *Литье и металлургия*. – 2011. – № 2. – С.40–42.

18. Ровин, С.Л. Рекуператор для высокотемпературного подогрева дутья / С.Л. Ровин, Л.Е. Ровин, Р.В. Емельянов // *Литье и металлургия*. – 2011. – № 3. Спецвыпуск. – С.171–175.

19. Ровин, С.Л. Критичная стадия восстановления оксидов в ротационных печах / С.Л. Ровин, Л.Е. Ровин, Т.М. Заяц, Н.Г. Кислицына // *Литье и металлургия*. – 2012. – № 3. Спецвыпуск. – С.58–60.

20. Ровин, С.Л. Процессы жидкофазного восстановления окислы в ротационных печах / С.Л. Ровин, Л.Е. Ровин // *Литье и металлургия*. – 2012. – №3. – С. 11–20.

21. Кукуй, Д.М. Энерго- и ресурсосберегающие технологии в литейном производстве / Д.М. Кукуй, С.Л. Ровин, Л.Е. Ровин // *Металлург*. – 2012. – № 9. – С. 16–19.

22. Ровин, С.Л. Решение проблемы утилизации аккумуляторного лома и производства свинца в Беларуси / С.Л. Ровин, С.С. Охремчук // *Литье и металлургия*. – 2013. – № 3., Спецвыпуск. – С.87–89.

23. Ровин, С.Л. Использование ротационных печей для рециклинга железосодержащих отходов / С.Л. Ровин // *Литье и металлургия*. – 2014. – № 1. – С. 56–61.

24. Ровин, С.Л. Влияние дисперсности материалов на скорости процессов твердофазного восстановления / С.Л. Ровин // *Литье и металлургия*. – 2014. – № 4. – С.7–9.

25. Ровин, Л.Е. Высокотемпературный подогрев шихты / Л.Е. Ровин, С.Л. Ровин // *Электрометаллургия*. – 2014. – № 12. – С.3–9.

26. Ровин, С.Л. Аэродинамика ротационных короткобарабанных печей / С.Л. Ровин // *Литье и металлургия*. – 2015. – № 1. – С.46–51.

27. Ровин С.Л. Классификация и свойства дисперсных металлоотходов / С.Л. Ровин, Л.Е. Ровин // *Литье и металлургия*. – 2015. – № 2. – С.5–13.

28. Ровин, С.Л. Механизм восстановления дисперсных железосодержащих отходов в динамическом слое / С.Л. Ровин // *Литье и металлургия*. – 2015. – № 3. – С.20–29.

29. Ровин, С.Л. Переработка техногенных железосодержащих отходов / С.Л. Ровин, Л.Е. Ровин // *Литье и металлургия*. – 2015. – № 4. – С.67–70.

30. Ровин, С.Л. Особенности конструкции и опыт эксплуатации ротационных наклоняющихся печей / С.Л. Ровин // *Металлургия: Республ. межведом. сб. научн. тр.* – Минск: БНТУ, 2015. – Вып.36. – С.39–63.

31. Ровин, С.Л. Исследование работы ротационных наклоняющихся плавильных печей / Ровин С.Л. // *Наука и техника*. – 2016. – № 1. – С.18–28.

32. Ровин, С.Л. Движение дисперсных материалов в ротационных наклоняющихся печах / С.Л.Ровин // *Литье и металлургия*. – 2016. – № 1. – С.5–10.

33. Ровин, С.Л. Конструкция ротационных наклоняющихся печей: моделирование и расчет / С.Л.Ровин // *Механическое оборудование металлургических заводов* – 2016. – № 1. – С.30–47.

34. Ровин, С.Л. Компьютерное моделирование движения дисперсных материалов во вращающихся печах / С.Л. Ровин, Л.Е. Ровин, В.А. Жаранов, В.С. Мазуров // *Литье и металлургия*. – 2016. – № 2. – С.39–44.

35. Калиниченко, А.С. Пути повышения качества отливок и эффективности использования вторичных ресурсов / А.С. Калиниченко, Ф.И. Рудницкий, Ю.А. Николайчик, А.Г. Слущкий, В.А. Шейнерт, С.Л. Ровин // *Металлургия в машиностроении Беларуси: итоги и перспективы научного обеспечения: Сб. науч. статей; под ред. академика Е.И. Маруковича и д.т.н. А.А. Шипко* – Минск: Беларуская навука, 2016. – С.95–114.

36. Ровин, Л.Е. Малотоннажный рециклинг железосодержащих отходов ротационных наклоняющихся печей / Л.Е. Ровин, С.Л. Ровин // *Литейщик России*. – 2016. – № 9. – С.29–34.

37. Ровин, С.Л. Рециклинг дисперсных металлоотходов в литейных цехах / С.Л. Ровин, Л.Е. Ровин // *Литье Украины*. – 2016. – № 9. – С.8–11.

38. Ровин, С.Л. Движение газов в ротационных наклоняющихся печах / С.Л. Ровин, Л.Е. Ровин, В.А. Жаранов // *Литье и металлургия*. – 2016. – № 3. – С.11–19.

39. Ровин, С.Л. Переработка дисперсных металлоотходов в литейных цехах машиностроительных предприятий / С.Л. Ровин, Л.Е.Ровин // *Литейное производство*. – 2016. – № 10. – С.30–34.

40. Ровин С.Л. Особенности восстановления дисперсных пористых материалов/ С.Л. Ровин, Л.Е. Ровин, Т.М. Заяц // *Литье и металлургия*. – 2016. – № 4. – С.11–18.

41. Ровин С.Л. Рециклинг лома и отходов меди и медных сплавов в Беларуси / С.Л. Ровин, Л.М. Новак, А.В. Фатеев // *Литье и металлургия*. – 2017. - №2. – С.128–130.

42. Ровин С.Л. Движение и смешивание дисперсных материалов в ротационных печах / С.Л. Ровин, Л.Е. Ровин, В.А. Жаранов, В.С. Мазуров // *Литье и металлургия*. – 2017. – № 2. – С.117–127.

43. Ровин С.Л. Применение ротационных наклоняющихся печей для организации безотходного оборота металлов на машиностроительных предприятиях и

производства отливок / С.Л. Ровин, А.С. Калиниченко // *Литье Украины*. – 2017. – № 8. – С.2–8.

### **Материалы конференций и тезисы докладов**

44. Ровин, С.Л. Ресурсосберегающие технологии в литейном и металлургическом производстве / С.Л. Ровин, Л.Е. Ровин // VII Московский международный салон инноваций и инвестиций: доклады семинара «Научно-технические разработки Беларуси, Казахстана, России для многостороннего сотрудничества», Москва, 5-8 февр. 2007г. / МЦНТИ. – М., 2007. – С.15–22.

45. Ровин, С.Л. Переработка и вторичное использование металлоотходов / С.Л. Ровин, Л.Е. Ровин // *Белорусский промышленный форум 2007*. Технологии, оборудование, качество: сб. материалов 10-го Международного симпозиума, Минск, 15-18 мая 2007г. / Министерство промышленности Республики Беларусь, Министерство экономики Республики Беларусь, Министерство энергетики Республики Беларусь, НАНБ, Департамент по энергоэффективности, Экспофорум – Минск, 2007. – С.95–96.

46. Ровин, С.Л. Подготовка и рециклинг металлоотходов / С.Л. Ровин, Л.Е. Ровин, Т.М. Заяц // *Металлургия и литейное производство 2007*. Беларусь: материалы Международной науч.-техн. конф., Жлобин, 6-7 сент. 2007г. / Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь, ПО «БМЗ»; под ред. д.т.н. Д.М. Кукуя – Жлобин, 2007. – С.325–329.

47. Ровин, С.Л. Внедрение энергосберегающих технологий для плавки железоуглеродистых сплавов на подогретой шихте / С.Л. Ровин, Л.Е. Ровин, Ю.Н. Фасевич // *Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии: материалы VII Международной науч.-техн. конф.*, Гродно, 27-28 сент. 2007г. / НИЦ проблем ресурсосбережения НАНБ, ГрГУ им. Я.Купалы – Гродно, 2007. – С.17.

48. Rovin, L.E. Scrap-metal recycling in rotary tilting furnace / L.E. Rovin, S.L. Rovin, V.A. Zharanov // *Mechanical Engineering 2007 (ME-2007)*: сб. докладов 11-ой Международной конференции, посвященной 70-летию Словацкого технического университета в Братиславе (STU in Bratislava), Братислава, Словакия, 29-30 ноября 2007г. / Association of Slovak Scientific and Technological Societies, Slovak Association of Mechanical Engineers, STU in Bratislava – Братислава, Словакия, 2007. – P.40–41.

49. Rovin, S.L. Metal Wastes Recycling By Means Of Rotary Furnaces / S.L. Rovin, L.E. Rovin // 71-й Всемирный конгресс литейщиков: сб. докладов, Бильбао, Испания, 19-21 мая 2014г. / Tabira Foundry Institute, World Foundry Organization – Бильбао, Испания, 2014. – P.45–47.

50. Ровин, С.Л. Масштабный фактор при твердофазном восстановлении / С.Л. Ровин // *Литейное производство и металлургия 2014*. Беларусь: труды 22-й Международной науч.-техн. конф., посвященной 60-летию кафедры «Машины и технологии литейного производства» БНТУ, Минск, 22-24 окт. 2014г. /



Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь, БНТУ; под ред. д.т.н. Д.М. Кукуя – Минск, 2014. – С.124–126.

51. Ровин, С.Л. Моделирование и расчет элементов конструкции ротационных наклоняющихся печей / С.Л. Ровин, Л.Е. Ровин, В.С. Мазуров // Наука – образованию, производству, экономике: материалы XIV Международной науч.-техн. конф., Минск, 28 апреля 2016г. / БНТУ – Минск, 2016. – С.343.

52. Ровин, С.Л. Малотоннажный рециклинг на базе ротационных наклоняющихся печей – альтернатива накоплению низкосортных дисперсных металлоотходов / С.Л. Ровин // Литейное производство и металлургия 2016. Беларусь: труды 24-й Международной науч.-техн.конф., Минск, 19-21 окт. 2016г. / Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь, МЦ ОАО «БМЗ»; под ред. академика НАН Беларуси Е.И. Маруковича – Жлобин, 2016. – С.24–34.

53. Ровин, Л.Е. Движение газов и дисперсных материалов в ротационных наклоняющихся печах / Л.Е. Ровин, С.Л. Ровин, В.А. Жаранов // Литейное производство и металлургия 2016. Беларусь: труды 24-й Международной науч.-техн.конф., Минск, 19-21 окт. 2016 / Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь, МЦ ОАО «БМЗ»; под ред. академика НАН Беларуси Е.И. Маруковича – Жлобин, 2016. – С.39–43.

54. Ровин, С.Л. Децентрализованный рециклинг дисперсных металлоотходов / С.Л. Ровин // Современные проблемы машиноведения: тезисы докладов XI Международной науч.-техн. конф. (научные чтения, посвященные П.О. Сухому), Гомель, 20-21 окт. 2016г. / ГГТУ им. П.О.Сухого, Филиал ПАО «Компания «Сухой» ОКБ «Сухого». – Гомель, 2016. – С.170.

55. Ровин, С.Л. Твердо-жидкофазное восстановление оксидных металлов / С.Л. Ровин, Т.М. Заяц // Современные проблемы машиноведения: тезисы докладов XI Международной науч.-техн. конф. (научные чтения, посвященные П.О.Сухому), Гомель, 20-21 окт. 2016г. / ГГТУ им. П.О.Сухого, Филиал ПАО «Компания «Сухой» ОКБ «Сухого». – Гомель, 2016. – С.171.

## Патенты

56. Ротационная установка для термообработки и плавки дисперсных и кусковых материалов: пат. ВУ 1424 / Л.Е. Ровин, О.М. Валицкая, С.Л. Ровин. – Оpubл. 30.06.2004.

57. Ротационная качающаяся установка для термообработки и плавки дисперсных и кусковых материалов: пат. ВУ 1732 / Л.Е. Ровин, О.М. Валицкая, С.Л. Ровин. – Оpubл. 30.12.2004.

58. Ротационная установка для термообработки и сушки дисперсных и кусковых материалов: пат. ВУ 2428 / Л.Е. Ровин, О.М. Валицкая, С.Л. Ровин. – Оpubл. 28.02.2006.

59. Ротационная наклоняющаяся установка для плавки дисперсных и кусковых материалов: пат. ВУ 2770 / Л.Е.Ровин, О.М.Валицкая, С.Л.Ровин. - Оpubл. 30.06.2006.

60. Ротационная наклоняемая печь для выплавки чугуна, стали и других тугоплавких сплавов из дисперсных и кусковых материалов: пат. ВУ 4989 / Н.В. Андрианов, В.А. Маточкин, В.Н. Прохоренко, Л.Е. Ровин, С.Л. Ровин, Д.М. Кукуй. – Оpubл. 28.02.2009.

61. Ротационная наклоняемая печь для выплавки чугуна, стали и других сплавов из дисперсных материалов: пат. ВУ 7412 / Л.Е. Ровин, С.Л. Ровин, Т.М. Заяц. – Оpubл. 30.08.2011

62. Ротационная наклоняемая печь для переработки дисперсных материалов: пат. ВУ 10518 / Л.Е. Ровин, С.Л. Ровин, Т.М. Заяц, И.Н. Торбочкин. – Оpubл. 28.02.2015

63. Способ малотоннажного рециклинга дисперсных железосодержащих металлоотходов без их предварительной подготовки путем твердо-жидкофазного восстановления в ротационной наклоняющейся печи с получением чугуна или стали: заявка № 2017/ЕА/0050 / С.Л. Ровин, А.С. Калинин, Л.Е. Ровин. – Оpubл. 23.06.2017



Handwritten signature in black ink, appearing to be 'Lof'.

РЕПОЗИТОРИЙ БГУ

## РЭЗІЮМЭ

Ровін Сяргей Леанідавіч

**Тэхналогія і абсталяванне малатанажнага рэцыклінгу дысперсных металаадходаў у ратацыйных печах з атрыманнем высакаякасных шыхтавых матэрыялаў для ліцейнай вытворчасці**

**Ключавыя словы:** дысперсныя металаадходы, рэцыклінг, цвёрда- і вадкафазнае аднаўленне, цепламасаабмен, ратацыйныя печы.

**Мэта работы:** распрацоўка тэхналогіі і абсталявання малатанажнага рэцыклінгу дысперсных металаадходаў, у тым ліку аксідных і шматкампанентных, у ратацыйных нахіляючыхся печах (РНП) на падставе няспыннага працэсу цвёрда-вадкафазнага аднаўлення з атрыманнем высакаякасных шыхтавых матэрыялаў для ліцейнай вытворчасці.

**Метады даследвання і апаратура:** вызначэнне грануламетрычнага і хімічнага складу, адгезійных, фізіка-механічных якасцей, порыстасці і ўдзельнай паверхні, аналіз мікраструктуры матэрыялаў, аналіз складу газаў, кампутарнае і імітацыйнае мадэляванне працэсаў, аптычныя і скануючыя мікраскопы, спектрометры, дыфрактометры, прылады для вызначэння порыстасці БЭТ-метадам, экспрэс-аналізатары вугляроду, газааналізатары, страндартныя і агульнапрынятыя ў тэхнічных навуках метады даследаванняў і лабараторнае абсталяванне.

**Атрыманыя вынікі і іх павізна.** Распрацаваны тэарэтычныя асновы, тэхналогія і абсталяванне малатанажнага рэцыклінгу дысперсных металаадходаў. Праведзены комплексныя даследаванні руху газаў і дысперсных матэрыялаў у ратацыйных печах, устаноўлены механізмы і заканамернасці цепламасапераносу. Распрацавана квазігамагенная мадэль цвёрдафазнага аднаўлення дысперсных порыстых аксідаў жалеза, устаноўлена ўплыванне газападобных і цвёрдых адноўнікаў на хуткасць і ступень аднаўлення ў тонкіх структурах аксідных матэрыялаў. Даследаваны заканамернасці вадкафазнага аднаўлення аксідаў жалеза ў РНП. Распрацаваны рэкамендацыі па канструяванні РНП для рэцыклінгу дысперсных адходаў чорных і каляровых металаў ёмістасцю 0,5-20 тон. Упершыню ў сусветнай практыцы рэалізаваны малатанажны рэцыклінг дысперсных жалезазмяшчальных металаадходаў без іх папярэдняй падрыхтоўкі і акамкоўвання, заснаваны на няспынным цвёрда-вадкафазным працэсе аднаўлення, які здзяйсняецца у РНП.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні:** тэхналогіі рэцыклінгу дысперсных металаадходаў, абсталяванне (15 устаноў) і праектныя рашэнні укаранены або прайшлі апрабачку на 12 прадпрыемствах Беларусі і Расіі. Разліковы эканамічны эффект склаў суму, эквівалентную 1,46 млн. долараў ЗША.

**Галіна выкарыстання:** машынабудаванне, ліцейная і металургічная вытворчасць.

## РЕЗЮМЕ

Ровин Сергей Леонидович

### **Технология и оборудование малотоннажного рециклинга дисперсных металлоотходов в ротационных печах с получением высококачественных шихтовых материалов для литейного производства**

**Ключевые слова:** дисперсные металлоотходы, рециклинг, твердо- и жидкофазное восстановление, тепломассообмен, ротационные печи.

**Цель работы:** разработка технологии и оборудования малотоннажного рециклинга дисперсных металлоотходов, в том числе оксидных и многокомпонентных, в ротационных наклоняющихся печах (РНП) на основе непрерывного процесса твердо-жидкофазного восстановления с получением высококачественных шихтовых материалов для литейного производства.

**Методы исследования и аппаратура:** определение гранулометрического и химического состава, адгезионных, физико-механических свойств, пористости и удельной поверхности, анализ микроструктуры материалов, состава газов, компьютерное и имитационное моделирование процессов, оптические и сканирующие микроскопы, спектрометры, дифрактометры, приборы для определения пористости БЭТ-методом, экспресс-анализаторы углерода, газоанализаторы, стандартные и общепринятые в технических науках методы исследований и лабораторное оборудование.

**Полученные результаты и их новизна.** Разработаны теоретические основы, технология и оборудование малотоннажного рециклинга дисперсных металлоотходов. Проведены комплексные исследования движения газов и дисперсных материалов в ротационных печах, установлены механизмы и закономерности тепломассопереноса. Разработана квазигомогенная модель твердофазного восстановления дисперсных пористых оксидов железа, установлено влияние газообразных и твердых восстановителей на скорость и степень восстановления в тонких структурах оксидных материалов. Исследованы закономерности жидкофазного восстановления оксидов железа в РНП. Разработаны рекомендации по конструированию РНП для рециклинга дисперсных отходов черных и цветных металлов емкостью 0,5-20 тонн. Впервые в мировой практике реализован малотоннажный рециклинг дисперсных железосодержащих отходов без их предварительной подготовки и окомкования, основанный на непрерывном твердо-жидкофазном процессе восстановления, осуществляемом в РНП.

**Рекомендации по использованию:** технологии рециклинга дисперсных металлоотходов, оборудование (15 установок) и проектные решения внедрены или прошли апробацию на 12 предприятиях Беларуси и России. Расчетный экономический эффект составил сумму, эквивалентную 1,46 млн. долларов США.

**Область применения:** машиностроение, литейное и металлургическое производство.

## SUMMARY

**Rovin Sergey Leonidovich**

### **Technology and equipment for low-tonnage recycling of dispersed metal wastes in rotary furnaces with producing high quality charged materials for foundry**

**The keywords:** dispersed metal wastes, recycling, solid- and liquid-phase reduction, heat-mass exchange, rotary furnaces.

**The aim of work:** development of technology and equipment for low-tonnage recycling of dispersed metal wastes including oxide and multicomponent ones in tilting rotary furnaces (TRF) based on continuous process of solid-liquid reduction with producing high quality charged materials for foundry.

**Methods of work and equipment:** defining granulometric and chemistry composition, adhesive, physical and mechanical properties, porosity and specific surface, analysis of materials microstructure and gas composition, computer and imitation modeling, optical and electronic microscopes, spectrographs, diffractometers, equipment for porosity defining by BET-method, express carbon analyzers, gas analyzers, standard and generally accepted in technical science methods of investigations and laboratory equipment.

**Results and their novelty.** Theoretical bases, technology and equipment for low-tonnage recycling of dispersed metal wastes were developed. Complex explorations of gas and dispersed materials motion in rotary furnaces were implemented; mechanisms and regularity of heat-mass transfer were established. Physical quasi-homogenize model of solid-phased reduction of dispersed porous iron oxides was developed. Influence of flue and solid deoxidizers on velocity and reduction degree within the fine structure of oxide materials was established. Regularities were explored of liquid-phase reduction of iron oxides process in TRF was worked out. Recommendations on TRF designing with capacity of 0.5...20 tons for recycling of dispersed wastes of ferrous and non-ferrous metals were found out. For the first time in world practice the low-tonnage recycling of dispersed iron-containing wastes by means of continuous solid-liquid phase reduction process in TRF was held without preliminary wastes preparation and pelleting.

**Recommendation for usage:** technologies for recycling of dispersed metal wastes, equipment (15 units) and design solutions were introduced or tested on 12 Belarus and Russian plants. The estimated economic effect amounted to the equivalent of 1.46 million U.S. dollars.

**The sphere of usage:** mechanical engineering, foundry and metallurgy.

Научное издание

**РОВИН**

**Сергей Леонидович**

**ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МАЛОТОННАЖНОГО  
РЕЦИКЛИНГА ДИСПЕРСНЫХ МЕТАЛЛООТХОДОВ  
В РОТАЦИОННЫХ ПЕЧАХ С ПОЛУЧЕНИЕМ  
ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ДЛЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени доктора технических наук  
по специальности 05.16.04 – Литейное производство

---