

На правах рукописи

Шиф-

ШИРИН АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ
ШЛАМОВЫХ ОТХОДОВ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ
ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Специальность 2.5.5. Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Донской государственный технический университет».

Научный руководитель

Лебедев Валерий Александрович,
кандидат технических наук, профессор.

Официальные оппоненты

Кадырметов Анвар Минирович,
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ
ВО «Воронежский государственный лесо-
технический университет имени Г.Ф. Моро-
зова», кафедра «Машиностроительные тех-
нологии», заведующий кафедрой

Норман Александр Владимирович,
кандидат технических наук, ГБПОУ ВО
«Воронежский авиационный техникум им
В.П. Чкалова», директор

Ведущая организация

АО «Конструкторское бюро химавтоматики»

Защита диссертации состоится «21» июня 2023 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.286.06, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный технический университет», по адресу: г. Воронеж, пр-т Московский, 14, ауд. 216.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского государственного технического университета и на сайте www.cchgeu.ru.

Автореферат разослан «24» апреля 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент

Андрей Владимирович
Мандрыкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На машиностроительных предприятиях во время выполнения шлифовальных операций образуется большое количество отходов в виде шламов, в свою очередь, представляющих собой совокупность мелкодисперсных металлических и абразивных частиц, а также технологической жидкости (ТЖ). Для того, чтобы получить из отходов шлифовального производства вторичное сырье требуемого гранулометрического состава, которое могло бы эффективно использоваться в порошковой металлургии, литейном и инструментальном производстве, необходимо реализовать выполнение ряда последовательных технологических этапов по их переработке: отделению ТЖ, сушке, разделению отходов на составляющие компоненты с последующим измельчением. Большой вклад в решение этой задачи внесли российские научные школы НПО «ЦНИИТМАШ, ДГТУ, ЮРГПУ, КубГАУ, ВЛГТУ а также стран Англии, Беларусь, Латвии.

Анализ существующих технологий и механических устройств, предназначенных для выполнения наиболее ответственных за качество перерабатываемого сырья этапов, связанных с разрушением и измельчением конгломератов шламов свидетельствует, с одной стороны, о сложности этой проблемы, что привело к их многообразию, а с другой стороны, показывает, что эффективного решения этой проблемы на сегодняшний день нет. В качестве основных факторов, сдерживающих их применение и внедрение в отечественную практику, можно выделить следующие:

- налипание на частицы металлического компонента шлама нематаллических мелкодисперсных частиц, что снижает качество и эксплуатационные свойства получаемого продукта;
- высокая энергоёмкость и материалоёмкость конструкций;
- сложность управления процессом переработки шламовых отходов для получения продуктов с наименьшими гранулометрическими характеристиками и соответствующим исходному сырью качеством;
- высокая степень износа металлических средств измельчения.

Достижения в области магнетизма позволяют, путем использования устройств с вращающимся электромагнитным полем, на качественно новом уровне подойти к решению проблемы, связанной с разрушением и измельчением шламовых отходов. Выше изложенные аспекты переработки шламовых отходов металлопроизводства обуславливают актуальность настоящего исследования

Работа выполнялась в рамках фундаментальных исследований гранта РФФИ №. 20-38-90006 «Разработка физико-технологических основ разделения магнитной и немагнитной компонент шламовых отходов металлопроизводства с применением электромагнитного поля».

Целью работы является разработка эффективного способа разрушения и измельчения конгломератов шламов во вращающемся электромагнитном поле, выработка практических рекомендаций по его реализации в технологии переработки шламовых отходов шлифовального производства.

Для ее достижения необходимо решить следующие задачи:

1. Обосновать параметры, обеспечивающие формирование во вращающемся электромагнитном поле магнитовибрирующего слоя шламовых частиц, и расчетные зависимости, позволяющие определить их энергетическое состояние.
2. Разработать модель механизма разрушения и измельчения конгломератов шлама во вращающемся электромагнитном поле.
3. Разработать методику и средства контроля энергетического состояния и гранулометрических характеристик перерабатываемой среды.
4. Исследовать закономерности влияния режимов электромагнитного поля на характер движения конгломератов во вращающемся электромагнитном поле и производительность процесса.
5. Установить расчетные зависимости управляющих воздействий, позволяющих осуществить выбор характеристик магнитовибрирующего слоя, в котором обеспечивается получение ферромагнитных материалов заданного гранулометрического состава, и экспериментально подтвердить их адекватность.
6. Разработать рекомендации по конструкторско-технологическому обеспечению и организации переработки шламовых отходов шлифовального производства с применением устройств с вращающимся электромагнитным полем.

Объектом исследования является технология переработки шламовых отходов.

Предметом исследования является процесс разрушения конгломератов и измельчения ферромагнитных частиц шламовых отходов в условиях вращающегося электромагнитного поля.

Положения, выносимые на защиту: кинетические особенности магнитовибрирующего слоя, формируемого из шламовых частиц в устройствах с вращающимся электромагнитным полем, и расчетные

зависимости, позволяющие оценить энергетическое состояние частиц; модель, раскрывающую механизм и условия разрушения конгломератов и измельчения ферромагнитных частиц шлама в электромагнитном поле; расчетные методы выбора параметров управляющих воздействий, обеспечивающих получение ферромагнитных материалов заданного гранулометрического состава; экспериментальные исследования эффективности процессов разрушения конгломератов и измельчения ферромагнитных частиц шлама в устройствах с вращающимся электромагнитным полем; рекомендации по конструкторско-технологическому обеспечению переработки шламовых отходов шлифовального производства с применением электромагнитных устройств.

Научная новизна проведенных исследований заключается:

- в разработке наиболее эффективного способа разрушения и измельчения конгломератов шламов в условиях вращающегося электромагнитного поля, в котором, в отличие от существующих способов, разрушение и измельчение происходит за счёт их взаимного ударно-импульсного соударения (п. 5, 7 паспорта научной специальности 2.5.5)
- в установлении взаимосвязи между механическими и магнитными характеристиками ферромагнитных материалов и управляющими воздействиями вращающегося электромагнитного поля, необходимыми для разделения магнитной и немагнитной компонент шлама и получения дисперсной среды требуемой степени измельчения (п. 2, 3 паспорта научной специальности 2.5.5).

Теоретическая значимость. Установлены расчетные зависимости, позволяющие обосновать: энергетическое состояние шламовых частиц в устройствах с вращающимся электромагнитным полем; пороговые значения индукции магнитного поля, обеспечивающие разрушение и измельчение конгломератов шламовых отходов и являющихся исходной предпосылкой для выбора характеристик устройств реализации этих процессов переработки.

Практическая значимость. Разработаны технологические рекомендации и конструкторско-технологические решения технических средств, а также технология по реализации основных этапов переработки шламовых отходов шлифовального производства с применением электромагнитного поля.

Методы исследования и достоверность результатов. Теоретические исследования выполнены на базе научных основ теории

электромагнетизма, прочности и разрушения твердых тел. Экспериментальные исследования проведены в лабораторных условиях НИИ «Вибротехнология», НОЦ «Материалы» ДГТУ с использованием: опытно-экспериментальной установки, обеспечивающей обработку образцов шламовых отходов во вращающемся электромагнитном поле; современных средств спектрального и гранулометрического анализа образцов; специальных устройств измерения индукции магнитного поля; с применением методов математической статистики обработки результатов

Достоверность результатов обеспечена обоснованным изучением объема научной литературы, использованием современных средств и методик проведения исследований, и подтверждается согласованностью теоретических выводов с результатами их реальной экспериментальной проверки.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: научной конференции «Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий», г. Ростов-на-Дону, 2019-2020 гг.; научно-технической конференции «Жизненный цикл конструкционных материалов», г. Иркутск, 2019 г.; научном симпозиуме технологов-машиностроителей «Фундаментальные основы физики, химии и динамики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий», г. Ростов-на-Дону, 2019-2020 гг.; научном семинаре технологов – машиностроителей «Перспективные направления развития финишных и виброволновых технологий», г. Ростов-на-Дону, 2021 г.; научной конференции «Intelligent Manufacturing and Materials» г. Ялта 2021 г.; 17 международной научно-технической конференции «Динамика технических систем» г. Ростов-на-Дону, 2021 г.; научно-технической конференции «Современные тенденции развития инструментальных систем и металлообрабатывающих комплексов», г. Ростов-на-Дону, 2021 г.; научном симпозиуме технологов – машиностроителей «Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоемких технологических систем формообразования и сборки изделий», п. Дивноморское, 2022 г., Международной научно-технической конференции "Машиностроительные технологические системы" (METS2022), г. Азов, 2022 г.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 16 научных работ, в том числе 6 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 1 статья в системе «Scopus».

Личный вклад автора. Предложен способ и технические средства для переработки шламовых отходов, реализована методика моделирования процесса разрушения и измельчения шламовых отходов во вращающемся электромагнитном поле, проведены экспериментальные исследования, обработка и интерпретация полученных результатов, сформулированы основные результаты в виде публикаций, научных докладов и рукописи диссертации.

Структура и объем работы Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и общих выводов, библиографического списка, включающего 114 источников. Работа изложена на 143 страницах, содержит 61 рисунок, 27 таблиц, 5 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе раскрыта проблема и намечены пути повышения эффективности переработки шламовых отходов металлопроиз-

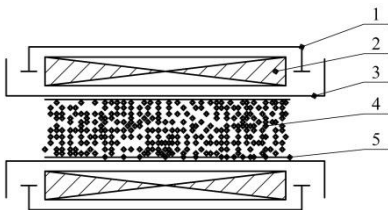


Рисунок 1 - Схема устройства с вращающимся электромагнитным полем:

- 1 – корпус;
- 2 – индуктор;
- 3 – рабочее пространство;
- 4 – ферромагнитные частицы;
- 5 – сменная вставка.

водства. Показано, что из всей совокупности видов шламов наибольший процент составляют шлифовальные, полученные при обработке сталей. Эти отходы состоят из смеси сильно окисленных и наклепанных металлических частиц, абразивных включений, а также технологической жидкости и масел, используемых при шлифовании. Для того, чтобы получить из отходов шлифовального производства вторичное сырье, которое эффективно может быть использовано в порошковой металлургии, литейном и

инструментальном производстве необходимо обеспечить выполнение ряда последовательных этапов по его переработке: отделению ТЖ, сушке, разделению отходов на составляющие компоненты, с последующим их измельчением с целью получения требуемого гранулометрического состава сырья.

Реализация двух последних этапов вызывает наибольшие трудности, обусловленные сложностью процессов, связанных с разрушением конгломератов шламов и измельчением их твердых компонентов. В работе для решения этой задачи предложен способ, основанный на использовании устройств с вращающимся электромагнитным по-

лем (ВЭМП). На рисунке 1 показано, что если ферромагнитные неравноосные частицы поместить во вращающееся электромагнитное поле достаточной напряженности, то они переходят в магнитовибрирующее состояние, совершая сложное хаотичное движение. В результате ударно-импульсного соударения происходит локальная упруго-пластическая деформация частиц, приводящая к их разрушению. Основными факторами, определяющими характер движения ферромагнитных частиц, являются частота вращения и напряженность магнитного поля, создаваемого индуктором, масса загрузки, размеры и магнитные свойства частиц. В главе показано, что устройства с вращающимся электромагнитным полем позволяют практически исключить применение металлических средств разрушения и измельчения, снизить материалоемкость технических средств, повысить эффективность процессов переработки шламовых отходов.

На основе априорной информации сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена теоретическим исследованиям механизма разрушения шламовых отходов в устройствах с вращающимся электромагнитным полем. После удаления ТЖ, обезжиривания и сушки шлам, подлежащий разрушению и измельчению, представляет собой совокупность конгломератов произвольной формы, состоящих на 80% из металлической стружки, что позволяет охарактеризовать их как твердое тело, обладающее ферромагнитными свойствами, основными характеристиками которых являются магнитная проницаемость μ и магнитный момент p_m .

Во вращающемся электромагнитном поле с индукцией $\vec{B} = \vec{B}_v \cos \omega t$ и угловой скоростью ω на ферромагнитную частицу действуют: момент, стремящийся повернуть её в направлении внешнего переменного электромагнитного поля и смещающая (переносная) сила. В результате действия этих сил ферромагнитные тела, имеющие произвольную не симметричную форму, под воздействием вращающегося электромагнитного поля совершают сложное движение с абсолютной угловой скоростью ω_a , для определения которой в работе предложена формула:

$$\omega_a = \sqrt{\omega^2 + \left(\frac{p_m B_v}{I \omega} \right)^2}, \quad [\text{с}^{-1}], \quad (1)$$

где B_v - [Тл]; ω - $[\text{с}^{-1}]$; p_m - $[\text{А} \cdot \text{м}^2]$; I - момент инерции конгломерата, $[\text{кг} \cdot \text{м}^2]$;

Движение отдельных частиц во вращающемся электромагнитном поле в больших дисперсных системах осложняется ударно-импульсным контактным взаимодействием их с другими частицами, в результате чего формируется магнитовибрирующий слой (МВС),

представляющий собой динамически устойчивое взвешенное состояние ферромагнитных частиц в электромагнитном поле. Изменение скорости движения частиц в устойчивом режиме магнитовибрирования показано на рисунке 2.

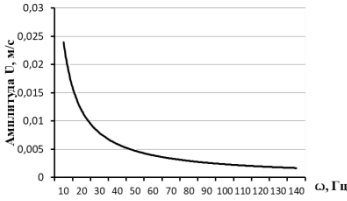


Рисунок 2 - Изменение амплитуды скорости движения ферромагнитных агрегатов в МВС от частоты вращения электромагнитного поля.

Считая: в условиях установившегося магнитовибрирующего слоя энергия, сообщаемая конгломератам от магнитного поля компенсируется диссипацией энергии, затрачиваемой на их разрушение; изменения ориентации магнитных моментов частиц за время между последовательными столкновениями относительно мало; энергия от поля сообщается

частицам, как через поступательную, так и через вращательную степени свободы; конгломераты обладают замороженными магнитными моментами; а также приняв, что в пределах половины цикла периода колебаний, т.е. $T/2 = \pi/\omega$, при соударении разновеликих конгломератов разрушаются оба конгломерата, получена формула, позволяющая определить их энергетическое состояние E в виде

$$E = \frac{1}{2\pi} \frac{\rho m^2}{\omega^2} \left[\frac{B_v^2}{I} + \frac{1}{m} \left(\frac{\partial B_v}{\partial y} \right)^2 \right], \text{ Дж}, \quad (2)$$

где $\frac{dB_v}{dy}$ - градиент индукции магнитного поля [Тл/м]; m - масса конгломерата [кг];

Разрушение конгломератов или его ферромагнитных агрегатов произойдет тогда, когда их энергетическое состояние, определяемое по формуле (2), будет достаточным для разрушения прочностных связей между частицами, входящими в их состав.

Согласно закону П. Риттингера, работа, затрачиваемая на разрушение конгломерата, представляющего собой совокупность ферромагнитных агрегатов и неметаллических частиц, удерживаемых в общей массе адгезионными и магнитостатическими силами, равна

$$E_p = E_{\text{адг}} \cdot D_k^2, \text{ [Дж]}, \quad (3)$$

где $E_{\text{адг}}$ - адгезия сочетания кремний-железо, [Дж/м²]; D_k - диаметр конгломерата, [м];

Используя закон В.Л. Кирпичёва и Ф. Кика предложена следующая зависимость для определения расхода энергии, затрачиваемой на разрушение ферромагнитных агрегатов

$$E_p = \frac{\pi \sigma_v^2 D_{\text{ч.к.}}^3}{12E} (Z_u^3 - 1), \text{ [Дж]} \quad (4)$$

где σ_B - предел прочности ферромагнитного агрегата и его частиц [Па]; E – модуль упругости ферромагнитного материала, [Па]; $Z_u = \frac{D_{ч.н.}}{D_{ч.к.}}$ – степень измельчения ферромагнитного агрегата; $D_{ч.н.}$, $D_{ч.к.}$ – исходный размер ферромагнитного агрегата и конечный размер измельченных частиц, м.

На основе формул (2), (3) и (4) впервые установлены расчетные зависимости, позволяющие на стадии проектирования операций по переработке шламовых отходов обосновать пороговые значения индукции магнитного поля, обеспечивающие:

-разрушение конгломератов шламовых отходов, и как следствие разделение, содержащихся в них магнитной и немагнитной компонент

$$B_{vp} = 8,02 \cdot \sqrt{\mu_0 \cdot \mu \cdot \pi (\rho_{ч} \cdot N \cdot D_{ч} \cdot E_{адг\ ч})^{0,5}} [\text{Тл}], \quad (5)$$

- измельчение ферромагнитных частиц

$$B_{vi} = 3.42 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_B \cdot \mu_0 \cdot \mu \cdot D_{ч.к.}}{Z_{и}} \cdot \pi \left[\frac{\rho_{ч}}{E} \cdot (Z_{и}^3 - 1) \right]^{0,5}} [\text{Тл}]. \quad (6)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, [Н/А²]; μ – относительная магнитная проницаемость; $\rho_{ч}$ – плотность ферромагнитных частиц [кг/м³]; $D_{ч}$ – размер абразивных частиц конгломерата [м]; N – количество частиц, формирующих ферромагнитный агрегат конгломерата, соизмеримых с размером абразивных частиц; π – [рад/с]

Для оценки продолжительности процессов разрушения конгломератов t_p и измельчения ферромагнитных частиц $t_{и}$ шламовых отходов в устройствах с вращающимся электромагнитном поле (при загрузке среды массой, объём которой меньше объёма рабочей зоны) впервые предложены вероятностные модели в виде

$$t_p = \frac{2\pi Z_p}{P\omega}, [\text{с}]; \quad t_{и} = \frac{2\pi Z_{и}}{P\omega}, [\text{с}], \quad (8)$$

где P – интенсивность процесса разрушения частиц; Z_p – среднестатистическая степень разрушения конгломератов, представляющая собой отношение масс исходных конгломератов к массе выделившихся при разрушении неферромагнитных частиц.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований влияния режимов вращающегося электромагнитного поля на энергетическое состояние, процессы разрушения и измельчения шламов, подтверждающие приемлемость расчетных зависимостей, предложенных для обоснования условий их реализации.



Рисунок 3 - Опытно-экспериментальная установка.

Для проведения экспериментальных исследований была разработана и изготовлена опытно-экспериментальная установка, представленная на рисунке 3. Основным элементом устройства, создающим вращающееся электромагнитное поле, являлся индуктор, который обеспечивал в рабочей

зоне устройства, ограниченной цилиндрической втулкой диаметром 70 мм, и выполненной из парамагнитного материала, практически однородное магнитное поле с индукцией до 9,5 мТл и частоту вращения магнитного поля до 100 Гц при частоте питающей сети до 50 Гц. В качестве образцов для проведения экспериментальных исследований использовались шлифовальные шламы, получаемые в результате выполнения шлифовальных операций стальных деталей, изготавливаемых на промышленных предприятиях Ростовской области. Образцы шламовых отходов подвергались промывке и сушке с целью удаления из их состава технологической жидкости.

Металлографический и гранулометрический анализ шламовых образцов, проведенный с помощью цифрового фотоаппарата и электронного микроскопа ZEISS Crossbeam 350 показал, что они представляют собой совокупность сильно окисленных конгломератов, с размерами в пределах 40-100 мкм. Металлическая составляющая, размером от 35 до 80 мкм, имеет вид стружки с высокоразвитой поверхностью, форма которой зависит от технологии обработки (рисунок 4). В этой массе встречаются прозрачные частицы абразива с размерами 70 – 200 мкм. Прочность сцепления частиц конгломератов составляет 5,9–7,3 МПа, а металлических частиц в 1,5-2 раза ниже предела прочности обрабатываемого материала.

Элементно-компонентный анализ состава исследуемых шламов, представленный на рисунке 5, свидетельствует об их схожести по своему составу и процентному соотношению составляющих его элементов. Содержание абразива в общей массе шламов составляет примерно 6–15%.

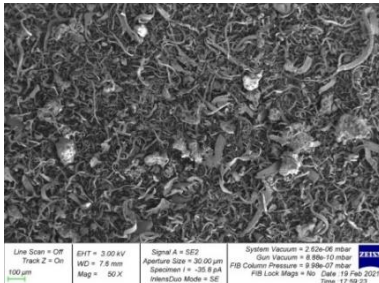


Рисунок 4 - Вид конгломератов шламов ООО «10-ГПЗ» после удаления ТЖ, полученные на электронном микроскопе. (100х)

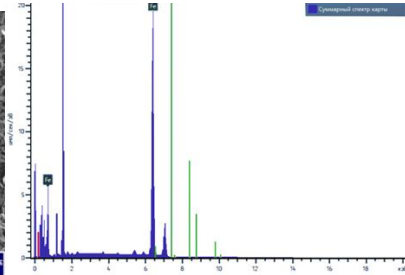


Рисунок 5 - Спектрограмма элементного распределения составляющих шламов после удаления ТЖ.

Проведенное с помощью тесламетра определение индукции магнитного поля, наводимого в экспериментальном устройстве, позволило сделать вывод о её однородности в устройствах, реализующих вращающееся электромагнитное поле, и сформировать представление о равномерности его воздействия на технологический материал и общую стационарность протекания процесса.

Исследования процессов взаимодействия конгломератов шлама и его ферромагнитных агрегатов во вращающемся электромагнитном поле, оценки свойств поведения, их структурирования и фазовых переходов, проведенные на основе индукционного метода измерений, позволили установить и экспериментально подтвердить закономерности влияния режимов электромагнитного воздействия на характер и параметры движения конгломератов во вращающемся электромагнитном поле, проиллюстрированные на рисунках 6, 7, 8, 9.

Установлено, что изменение угловой частоты магнитного поля до 60 Гц способствует росту энергетической активности конгломератов в магнитовибрирующем слое. Процессы, обеспечивающие технологический эффект разрушения конгломератов шламовых отходов, протекают более интенсивно. При увеличении угловой частоты свыше 60 Гц начинают формироваться цепочные комплексы, образуя так называемые «магнитные струны», снижающие степень хаотизации, скорость и амплитуду колебаний конгломератов, и, как следствие, к потере их энергетической активности (рисунки 6, 8), что и показал индукционный метод, зафиксировавший в этом диапазоне падение относительного сигнала.

Как показано на рисунках 7 и 9, рост значения индукционной ЭДС, а, значит, технологический эффект обработки, достигает своего максимума при степени загрузки рабочей зоны устройства шламовой средой на 35–40%. Кроме того, установлено, что с увеличением исходно-

го размера подвергаемых переработке ферромагнитных частиц, их ударно-импульсная разрушающая активность конгломератов снижается, а с увеличением степени разрушения увеличивается.

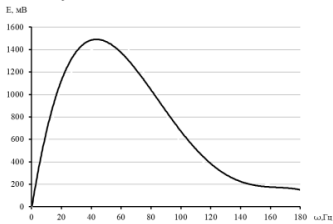


Рисунок 6 - Расчетная зависимость индукционной ЭДС от угловой частоты магнитного поля ω , Гц при $B = 8,8$ мТл, $D_{исх} = 40$ мкм, $K = 0,2$, $Z_p = 1$

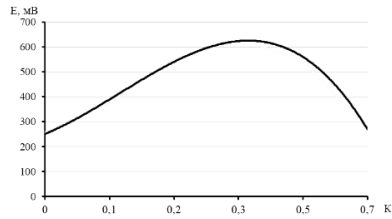


Рисунок 7 - Расчетная зависимость индукционной ЭДС от степени загрузки среды К при: $D_{исх} = 40$ мкм, при $B = 8,8$ мТл, $\omega = 100$ Гц, $K = 0,2$

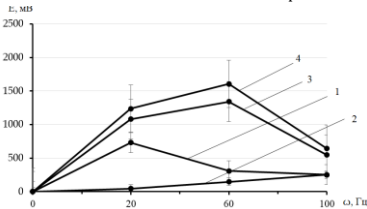


Рисунок 8 - Экспериментальная зависимость индукционной ЭДС от угловой частоты магнитного поля ω , при К: 1- 0,2; 2-0,0; 3-0,3;4-0,7.

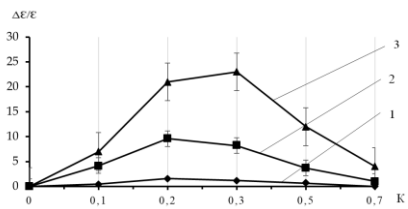


Рисунок 9 - Экспериментальная зависимость относительного сигнала $\Delta\epsilon/\epsilon$ от степени загрузки среды К при ω : 1- 100 Гц; 2- 60 Гц; 3- 20 Гц

Результаты экспериментальных исследований процессов разрушения и измельчения конгломератов шламовых отходов во вращающемся электромагнитном поле, проведенные с применением специально разработанных средств контроля позволили констатировать следующее:

- принятая для проведения экспериментальных исследований величина индукции вращающегося электромагнитного поля 8,8 мТл, превышающая в 2 раза пороговое (формулы 5,6), обеспечивает эффективное разрушение конгломератов на составляющие его компоненты, а также измельчение ферромагнитных частиц до 2,5 мкм (рисунки 11, 12).

- эффективность протекания процессов согласуется с выше установленными кинетическими закономерностями активности частиц в устройствах с ВЭМП (рисунки 13, 14);

- полученные графики зависимости интенсивности разрушения и измельчения конгломератов от частоты электромагнитного поля (рисунки 15, 16) позволяют (с погрешностью в пределах 15%) оценить

продолжительность этих процессов на основе предложенных зависимостей (8).

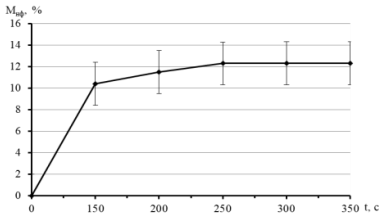


Рисунок 11 - Изменение количества отделившейся массы неферромагнитных частиц конгломератов в процессе их разрушения в условиях ВЭМП

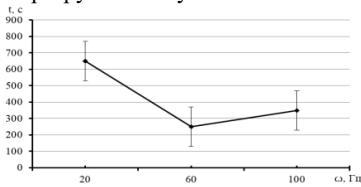


Рисунок 13 - Влияние частоты ВЭМП на продолжительность разрушения конгломератов

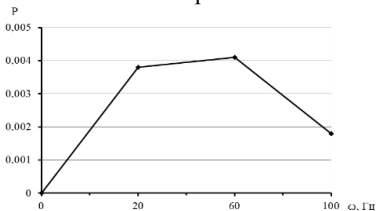


Рисунок 15 - Зависимость интенсивности разрушения конгломератов от частоты ВЭМП

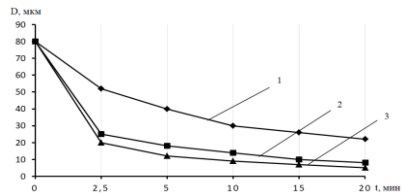


Рисунок 12 - Изменение среднего размера ферромагнитных частиц в процессе измельчения в условиях ВЭМП, при 1-20 Гц, 2-100 Гц, 3-60 Гц

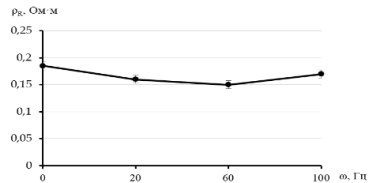


Рисунок 14 - Влияние частоты ВЭМП на эффект измельчения частиц

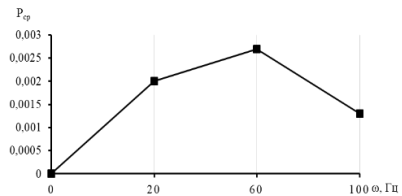


Рисунок 16 - Зависимость интенсивности измельчения ферромагнитных частиц от частоты ВЭМП

В четвертой главе приведены конструкторско-технологические решения технических средств и технологии по реализации основных этапов переработки шламовых отходов шлифовального производства с применением электромагнитного поля.

С целью эффективной реализации этапов переработки шламовых отходов, предусматривающих разрушение и разделение на ферромагнитные и неферромагнитные компоненты, а также измельчение выделившихся ферромагнитных частиц с 40 до 2,5 мкм разработан технологический комплекс с применением устройств с вращающимся электромагнитным полем (рисунок 17).

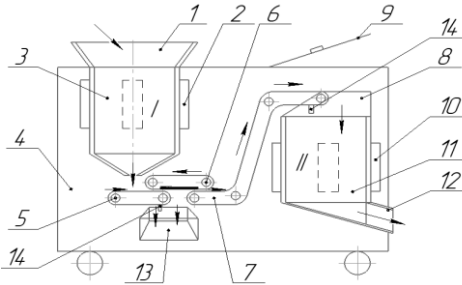


Рисунок 17 - Технологическая схема комплекса разделения и измельчения шламовых отходов: 1 – бункер –приемник; 2, 10 – электромагниты; 3,11 – камера; 4 – корпус; 5,7 – транспортеры ленточные; 6-транспортер ленточный с электромагнитом; 8 – ограждающее устройство; 9-люк; 12,13 – склиз; 14-щетка.

Основным преимуществом такого комплекса является отсутствие промежуточных операций загрузки-выгрузки шлама, малые габаритные размеры (1200x400x500мм), полная автоматизация протекания процесса, автономность и мобильность, высокая производительность переработки, достигающая 0,8-0,9 кг/ мин, при индукции магнитного поля 8,5мТл и частоте 60Гц. По сравнению с переработкой на базе устройств, состоящих из бильной мельницы и магнитовибрационного сепаратора, комплекс позволяет повысить технико-экономическую эффективность переработки шламовых отходов в 4 раза.

Переработка шламовых отходов может быть организована или на базе совокупности передвижных устройств, или на базе стационарных участков, включающих технические средства, обеспечивающих реализацию всех этапов переработки шламовых отходов

В пятой главе разработаны технологические рекомендации по реализации процесса переработки шламовых отходов в устройствах с вращающимся электромагнитным полем и рекомендации по обоснованию их конструктивных и технических характеристик.

Показано, что сырье, полученное в результате переработки шламовых отходов, востребовано для изготовления высококачественных изделий порошковой металлургии, литейного и инструментального производства. Это доказывает перспективность рассматриваемого способа и целесообразность дальнейшего проведения исследований и опытно конструкторских работ по: отработке конструкций технологического оборудования, применению ВЭМП для нанесения на поверхности деталей машин твердосмазочных антифрикционных покрытий, получению вторичного сырья для изготовления изделий приборостроения и микроэлектроники. Исследования в этом направлении позволят решить задачу по импортозамещению технологий и технических средств по переработке шламовых отходов.

Результаты диссертационного исследования рассмотрены, одобрены и приняты для конструкторско-технологической проработки и изготовления опытно промышленного образца передвижного комплекса переработки шламовых отходов шлифовального производства на ОАО «Технология» г. Азов, Ростовской области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен способ разрушения и измельчения шламовых отходов шлифовального производства, основанный на использовании вращающегося электромагнитного поля. Способ отличается от существующих методов высокой производительностью и технико-экономической эффективностью, и позволяет производить разрушение, разделение и измельчение конгломератов шлама за счёт их взаимного ударно-импульсного соударения. В результате проведенного комплекса исследований, сочетающего аналитические и экспериментальные методы, созданы физико-технические основы переработки шламов с применением электромагнитного поля, разработаны технические средства и технологии по реализации основных этапов переработки шламовых отходов шлифовального производства, обеспечивающие получение вторичного сырья для дальнейшего использования, например, при изготовлении изделий порошковой металлургии, в литейном и инструментальном производстве и как следствие решение важных народнохозяйственных задач связанных с ресурсосбережением сырья и импортозамещением технологий и средств по его переработке.

Заключение детализируется общими выводами, вытекающими из материалов диссертации.

Общие выводы

1 Разработана аналитическая модель, раскрывающая кинетические закономерности магнитовибрирования шламовых частиц во вращающемся электромагнитном поле в зависимости от индукции и частоты магнитного поля, продолжительности его воздействия, степени загрузки рабочей зоны устройства, магнитных свойств среды, и позволяющая оценить их энергетические состояние.

2. Предложены расчетные зависимости, позволяющие определить величину пороговых значений индукции магнитного поля, при которых обеспечивается технологический эффект разрушения конгломератов и измельчения ферромагнитных частиц в условиях вращающегося электромагнитного поля, а также оценить продолжительность выполнения этих процессов.

Предложенные зависимости являются основой для проектирования технологических операций по переработке шламовых отходов и обоснования исходных характеристик устройств, разрабатываемых для их реализации.

3. Установлено, что для реализации процессов разделения конгломератов шлама на ферромагнитную и неферромагнитную компоненты, индукция вращающегося электромагнитного поля должна быть выше 2,5 мТл, а для реализации процесса измельчения ферромагнитных (стальных) частиц требуется высокоградиентное поле с индукцией не менее 5,5 мТл.

4. Доказано, что наибольшая энергетическая активность частиц шламовых отходов, и, как следствие, производительность процессов разрушения и измельчения конгломератов, достигается при частотах магнитного поля в пределах 50-60 Гц и загрузке среды не более 35-40% объёма рабочей зоны устройства.

5. Разработанные экспериментальные методики и устройства обеспечивают, с достаточной для практики точностью, проведение оценки и контроля энергетического состояния магнитовибрирующего слоя и гранулометрических характеристик ферромагнитных частиц, получаемых в процессе переработки шламовых отходов в устройствах с вращающимся электромагнитным полем.

6. Разработанный комплекс для переработки шламовых отходов успешно решает задачу совмещения процессов разрушения, разделения и измельчения конгломератов без их последующей дополнительной сепарации, и по сравнению с переработкой шламов в бильной мельнице и магнитовибрационном сепараторе, позволяет повысить технико-экономическую эффективность переработки шламовых отходов в 4 раза.

7. Полученные результаты проведённых исследований по переработке шламовых отходов шлифовального производства с применением устройств с вращающимся электромагнитным полем способствуют решению важных народнохозяйственных задач таких как - ресурсосбережение сырья и импортозамещение технологий и средств по их переработке.

ПО СОДЕРЖАНИЮ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО 16 ПЕЧАТНЫХ РАБОТ:

Публикации в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ и в системе «Scopus»

1. Лебедев В. А. Технологическое обеспечение переработки шламовых отходов шлифовального производства с применением электромагнитного поля / В. А. Лебедев, **А. А. Ширин**, Н. С. Коваль, Ю. М. Вернигоров // Воронежский научно-технический Вестник. – 2022. – Т. 2. – № 2(40). – С. 30-37. – DOI 10.34220/2311-8873-2022-30-37. – EDN QJNSRA.
2. Вернигоров Ю.М. Научоемкая технология получения композиционных порошков в магнитовибрирующем слое/ Ю.М. Вернигоров,

- В.А. Лебедев, К.К. Лелетко, **А.А. Ширин** // Научные технологии в машиностроении – 2019 – № 5 – С.3-8.
3. Вернигоров Ю.М. Экспресс-метод оценки гранулометрического состава порошков ферромагнитных материалов/ Ю.М. Вернигоров, В.А. Лебедев, **А.А. Ширин**// Вестник Кузбасского государственного технического университета – 2020 – № 4. – С.25-29.
 4. Лебедев В.А. Технологические возможности обработки деталей в устройствах с вращающимся электромагнитным полем и перспективы их применения / В.А. Лебедев, А.А. Кочубей, Г.В. Демин, **А.А. Ширин** // Научные технологии в машиностроении – 2020 – № 10 – С.22-28.
 5. Лебедев, В. А. Энергетические аспекты измельчения ферромагнитных частиц шлифовального шлама во вращающемся электромагнитном поле / В. А. Лебедев, **А. А. Ширин**, Н. С. Коваль // Транспортное машиностроение. – 2022. – № 1-2(1-2). – С. 29-39. – DOI 10.30987/2782-5957-2022-01-02-29-39. – EDN NGGPOY.
 6. Lebedev V.A. Improving the Efficiency of Metal Production Waste Processing in Electromagnetic Field/ V.A. Lebedev, Y.M. Vernigorov, **A.A. Shirin**, L.V. Chunakhova and E.P. Melnikova// Materials Science Forum, Vol 1037, pp 759-766.
 7. Исследование процесса переработки конгломератов шлифовального шлама в устройствах с вращающимся электромагнитным полем / В. А. Лебедев, **А. А. Ширин**, Н. С. Коваль, Ю. М. Вернигоров // Advanced Engineering Research. – 2022 – Т. 22. – № 4. – С. 338–345. – DOI 10.23947/2687–1653-2022-22-4-338-345. – EDN BJQXLZ.

Публикации в других научных изданиях

1. Кочубей А.А. Энергетический баланс ферромагнитного индентора магнитооживленного вращающегося слоя/ А.А. Кочубей, Ю.В. Грудинин, **А.А. Ширин**// Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий: сборник трудов, посвященного памяти заслуженного деятеля науки и техник РФ, д.т.н. почётного профессора Бабичева А.П. – Ростов н/Д: ДГТУ – 2019 – С. 216-220.
2. Вернигоров Ю.М. Выделение немагнитной фракции из шламовых отходов металлопроизводства в электромагнитном поле/ Ю.М. Вернигоров, В.А. Лебедев, К.К. Лелетко, **А.А. Ширин** // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): мат-лы IX Всерос. науч.-техн. конф. с международным участием.- Иркутск: Изд-во ИРНИТУ – 2019 – С. 50-56

3. Вернигоров Ю.М. Предпосылки применения вращающегося электромагнитного поля для разделения шламовых отходов шлифовального производства/ Ю.М. Вернигоров, В.А. Лебедев, **А.А. Ширин** // Фундаментальные основы физики, химии и динамики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий: сборник трудов научного симпозиума технологов-машиностроителей– Ростов н/Д: ДГТУ – 2019 – С. 418-420.
4. Вернигоров Ю.М. Технология применения неметаллической фракции шлифовального шлама/ Ю.М. Вернигоров, В.А. Лебедев, Д.М. Плотников, К.К. Лелетко, **А.А. Ширин** // Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий: сборник трудов научного семинара, посвященного памяти заслуженного деятеля науки и техники РФ, доктор технических наук, почётного профессора ДГТУ А.П. Бабичева – Ростов н/Д: ДГТУ – 2020 – С. 82-88.
5. Вернигоров Ю.М. Принципиальная технологическая схема переработки шламовых отходов шлифовального производства/ Ю.М. Вернигоров, В.А. Лебедев, **А.А. Ширин** // Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий: сборник трудов научного семинара, посвященного памяти заслуженного деятеля науки и техники РФ, доктор технических наук, почётного профессора ДГТУ А.П. Бабичева– Ростов н/Д: ДГТУ – 2020 – С. 370-374.
6. Вернигоров Ю.М. Энергетические условия, обеспечивающие формирование и устойчивый режим магнитовибрирующего слоя во вращающемся электромагнитном поле/ Ю.М. Вернигоров, **А.А. Ширин**, Г.В. Демин // Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий: сборник трудов научного симпозиума технологов-машиностроителей– Ростов н/Д: ДГТУ – 2020 – С. 338-342
7. Лебедев, В. А. Моделирование процесса переработки шламовых отходов бесконтактным способом / В. А. Лебедев, **А. А. Ширин** // Современные тенденции развития инструментальных систем и металлообрабатывающих комплексов: Сборник трудов научно-технической конференции, посвященной памяти заслуженного деятеля науки и техники Российской Федерации, доктора технических наук, профессора А.А. Рыжкина, Ростов-на-Дону, 21 января 2021 года. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2022 – С. 309-317. – EDN IDINSI.

8. Ширин А.А. Применение устройств с вращающимся электромагнитным полем в технологии переработки шламовых отходов металлопроизводства/ **А.А. Ширин**, Г.В. Демин // Перспективные направления развития Финишных и виброволновых технологий. Сборник трудов научного семинара технологов-машиностроителей – Ростов н/Д: ДГТУ – 2021 – С. 400-406.
9. Lebedev, V. A. Technological characteristics of crushing griding sludge ferromagnetic particles in rotating electromagnetic field / V. A. Lebedev, Yu. M. Vernigorov, **A. A. Shirin** // Practice Oriented Science: UAE - RUSSIA - INDIA : Proceedings of the International University Scientific Forum, UAE, 27 января 2023 года. – UAE: Инфинити, 2023. – P. 221-232. – EDN AGROFY.

В печать 11.04.2023. Формат 60×84/16.

Объем 1,25 усл. п. л. Тираж 100 экз. Заказ № 569

Отпечатано в издательском центре ДГТУ

Адрес университета и полиграфического предприятия:

344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1