

Крестьянинов Денис Андреевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ
ТЕХНОЛОГИИ БРИКЕТИРОВАНИЯ
ЛЕГКОВЕСНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТХОДОВ**

Специальность: **01.04.13 – Электрофизика, электрофизические
установки**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Бочаров Юрий Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор **Слуцкер Александр Ильич**

кандидат технических наук, доцент
Иванов Дмитрий Владимирович

Ведущая организация: Институт электрофизики и
электроэнергетики Российской Академии
Наук (ИЭЭ РАН)

Защита состоится «13» апреля 2012 года в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.16 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, главный учебный корпус, аудитория _____.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «12» марта 2012 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.229.16
кандидат технических наук, доцент

Журавлева Н.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Рациональная переработка отходов производства и потребления – важная современная задача, оптимальное решение которой позволяет экономить природное сырье и уменьшает нагрузку на экологию. Важной проблемой является утилизация легковесных металлических отходов: металлической стружки, листовой обрезки, всплесков, отсева лигатур, в частности ферросплавов. Эти производственные отходы важно использовать наиболее полно, так как при их многократном повторном использовании возможно обеспечение минимального накопления примесей. Существует и другой источник таких отходов: смешанный и сложный лом, извлекаемый, в том числе из твердых бытовых отходов. Сложность переработки таких отходов связана с их низкой насыпной плотностью и отсутствием эффективной техники и технологии перегрузки при транспортировке и загрузке технологических агрегатов. Так при переплавке стружки навалом существенно возрастает время загрузки печей, потери металла достигают 50 %. Один из путей более рациональной переработки стружки – брикетирование её в местах образования, а затем перевозка и переработка брикетов. Существовавшие ранее методы брикетирования не позволяют брикетировать ряд материалов и недостаточно эффективны. При производстве изделий из дорогостоящих титановых сплавов образуется особенно много стружки. Стружка высокопрочных титановых сплавов не поддается брикетированию обычными методами, она немагнитная и обладает меньшей плотностью, чем стальная, что значительно затрудняет ее транспортировку и переработку.

Для решения этой проблемы предлагается использовать электроимпульсный метод брикетирования металлической стружки. Метод реализует один из современных подходов к решению подобных научно-технических задач - использование в качестве инструмента электрический ток большой плотности.

Главное достоинство этого метода – возможность брикетирования любых материалов при отсутствии больших энергетических затрат и использование доступного, чистого энергоносителя – электрического тока. Электрофизический метод брикетирования заключается в том, что стружку

сжимают при относительно не высоких давлениях, а затем, не снимая давления, пропускают импульс электрического тока определенной длительности и амплитуды. Это позволяет связать дисперсную среду в прочный брикет. Данная технология, за счёт рационально выбранных параметров процесса, позволяет использовать простое прессовое и электротехническое оборудование, параметры которого далеки от рекордных, что является её большим преимуществом.

Цель работы состоит в исследовании процессов, происходящих при электроимпульсном брикетировании легковесных металлических отходов, анализе и определении механизма процесса контактообразования, уровня образующихся газонасыщенных включений в зоне контакта при электроимпульсном воздействии на стружку, прочностных характеристик брикетов, определении параметров источника энергии и его режимов работы; проработке промышленного использования электроимпульсной технологии брикетирования.

Основные решаемые задачи:

- анализ существующих теоретических моделей, касающихся как электроимпульсных методов спекания гранул и упрочнения электродов, так и процессов при контактообразовании за счет пластической деформации, электросварки, плавления, фриттинге; выбор оптимальной теоретической модели, позволяющей оценивать параметры процесса электроимпульсного брикетирования, необходимые для его реализации;
- исследование электроимпульсного метода брикетирования для уточнения возможного механизма контактообразования, параметров процесса и расширения сферы применения электроимпульсной технологии и получаемых при этом материалов;
- исследование механических и химических свойств брикетов, получаемых при пропускании импульса электрического тока большой плотности;
- исследование возможности применения электроимпульсного метода брикетирования к мелкодисперсным средам;
- оценка параметров электроимпульсной установки, разработка концепции будущей промышленной установки электроимпульсного брикетирования.

Методы научных исследований. Работа включала анализ научно-технической литературы, по проблеме электроимпульсного брикетирования и смежным областям; расчёты и оценки для определения явлений и процессов, которые следует учитывать при исследовании механизма электроимпульсного брикетирования, и формирование наиболее подходящей теоретической модели процесса, оценка параметров эксперимента и экспериментальной установки; экспериментальные исследования для получения данных об электрическом сопротивлении сжатой стружки перед ее электроимпульсной обработкой, о сопротивлении брикетов, полученных после пропускания импульса тока через образец; о процессе контактообразования, о механических и химических свойствах брикетов (для этих целей разработана методика исследования прочности брикетов и изготовлена соответствующая установка).

Научная новизна:

- доказана эффективность электрофизического метода брикетирования легковесных металлических отходов над существующими аналогами;
- показано, что при электроимпульсном воздействии на материал в зоне контакта происходит плавление металла. Ранее считалось, что этот процесс осуществляется за счёт чисто твёрдотельных механизмов;
- установлено, что при электроимпульсном брикетировании непосредственно в области точек сварки нет зон повышенной концентрации газовых примесей, из-за которых впоследствии в выплавляемом слитке могут возникать газонасыщенные дефекты;
- установлено, что прочностные характеристики брикетов полученных новым вариантом метода электроимпульсного брикетирования, при котором ток пропускается перпендикулярно направлению прессования, не отличаются от предыдущего варианта метода, однако предложенная схема пропускания тока более технологична.

Достоверность и обоснованность результатов базируется на сопоставлении полученных результатов с работами других авторов, в том числе работающих в смежных областях науки и техники, с теоретическими расчётами и оценками. При проведении экспериментальных работ использовались современные методы исследования и проверенные методики измерений.

Разработанная концепция промышленной установки электроимпульсного брикетирования подтверждена опытом экспериментальной эксплуатации специально созданной модельной установки.

Практическая ценность:

- на модельной установке определены оптимальные технологические параметры установки, разработана и проверена концепция промышленной установки для электроимпульсного брикетирования;
- определены значения механической прочности брикетов, получаемых при использовании промышленного варианта электроимпульсного метода брикетирования;
- для брикетов, образованных из стружки после пропускания импульсного тока, получены средние значения содержания кислорода и азота в местах контактов, эти значения показывают, что в выплавленных слитках исключено появление опасных газонасыщенных включений;
- установлено, что для реализации электроимпульсного брикетирования не требуется очистка стружки или применение защитных атмосфер;
- электроимпульсным методом получены брикеты с диэлектрическими и электропроводящими включениями, экспериментально установлено, что проводящие включения могут занимать до 50 % объёма брикета, а диэлектрические до 30 %. Показано, что брикеты из металлической стружки, смеси стружки разных металлов, брикеты с включениями – перспективный материал для использования в качестве лигатуры;
- обоснована возможность существенного расширения сферы применения технологии, в частности: получение лигатур, композитных брикетов, брикетов из порошка.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

- 1) при электроимпульсном брикетировании в процессе формирования контактов происходит плавление материала. Ранее предполагалось, что этот процесс осуществляется за счет чисто твердотельных механизмов;
- 2) брикетирование электроимпульсным методом может быть реализовано без использования защитной атмосферы, в том числе для реакционных материалов. Установлено, что после пропускания импульсного тока через

- сжатую стружку, содержание кислорода и азота в точках сварки не препятствует использованию металла в любых металлургических переделах;
- 3) электроимпульсным методом получены брикеты с включениями кускового материала, как электропроводящего, так и диэлектрического. Электропроводящий кусковой материал может занимать до половины объема брикета, а диэлектрический до 30 %. Показана возможность использования брикетов в качестве лигатуры;
 - 4) при пропускании импульсного электрического тока через сжатую стружку образуются брикеты, обладающие равной прочностью по всем направлениям, хотя при их формировании имеются выделенные направления – направление прессования и направление пропускания электрического тока, которые могут совпадать или быть взаимно перпендикулярными. Величина прочности таких брикетов позволяет использовать их в целом ряде технологических процессов;
 - 5) обоснована возможность получения по электроимпульсной технологии ряда материалов и полуфабрикатов, из стружки и отходов, порошков и гранул;
 - б) предложена концепция промышленной установки электроимпульсного брикетирования. Её производительность увеличена за счет сокращения времени цикла изготовления брикетов. Предлагаемые технические решения обоснованы теоретически и экспериментально апробированы, в том числе с использованием модельной установки.

Личный вклад соискателя. Участие в определении целей и задач исследования. Выполнение аналитического обзора научно-технической литературы. Выполнение расчётов параметров установок и всех их элементов. Участие в создании модельной установки и разработке концепции будущей промышленной установки. Разработка, монтаж и испытание пульта управления ГИТ модельной установки. Изготовление установки (стенда) для прочностных испытаний брикетов. Выполнение прочностных испытаний брикетов, подготовка публикаций.

Реализация результатов работы. На основе предложенных методов и результатов выполненных исследований разработаны технические решения для создания промышленной установки для брикетирования легковесных

металлических отходов. Работа является участником программы СТАРТ-2010.

Апробация работы и достоверность результатов. Основные результаты исследований были представлены на 6 Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «ЭКОЛОГИЯ И НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС», Пермь, Россия, 2007 г.; на Международном форуме «14 специализированная выставка Металлэкспо 2008» (VI ежегодная конференция «Новые тенденции рационального использования вторичных ресурсов и проблемы экологии»), Москва, Россия, 2008 г.; на Конференции (школа-семинар) по физике и астрономии для молодых учёных Санкт-Петербурга и Северо-Запада «Физика СПб», Санкт-Петербург, Россия, 2009 г.; на Международной научно-практической конференции «Инновации в теории и практике управления отходами», Пермь, Россия, 2009 г.

Опубликованные работы. По теме диссертации опубликовано 14 работ, из них две в изданиях из списка ВАК Минобрнауки России, а также оформлен патент на полезную модель и один отчёт по НИР.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы из 102 наименований; изложена на 171 странице, содержит 44 рисунка и 4 таблицы.

Автор выражает особую благодарность старшему научному сотруднику ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН к.т.н. Самуйлову Сергею Дмитриевичу за консультирование и предоставление аппаратной базы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи работы, методы исследований; отмечена научная новизна и практическая ценность работы, личный вклад соискателя.

В первой главе «Возможности электрического тока большой плотности как технологического инструмента и перспективные области его применения» анализируется возможность использования электрического тока большой плотности как технологического инструмента, обосновывается актуальность проблемы брикетирования металлической стружки и мелкодисперсных металлических отходов, проводится сравнительный анализ существующих и разрабатываемых методов брикетирования.

Основные выводы по первой главе. В результате анализа существующих методов брикетирования металлических отходов выявлены их недостатки, сформулированы цели и задачи исследования. Необходимо прояснить процессы контактообразования при электроимпульсном брикетировании и определить оптимальные режимы работы этого электрофизического метода.

Во второй главе «Выбор расчетной модели» рассматриваются теоретические аспекты контактообразования при электроимпульсном брикетировании и выполняются расчеты и оценки, на основе которых выбирается и обосновывается наиболее подходящая расчётная модель. Суть этой модели состоит в том, что композитный гетерогенный материал заменяется решеткой последовательных и параллельных сопротивлений, роль которых играют контакты между кусками проводника, а сами куски играют роль соединяющих проводов. В рамках этой модели прочность получаемого брикета можно вычислить по формуле:

$$Q = \alpha(Q_c + Q_i) \quad (1)$$

где $\alpha \sim 0,2$ – численный коэффициент, учитывающий неравномерность прочности получаемых брикетов по сечению, и по высоте. Силу, возникающую в образце в результате прессования можно определить из соотношения:

$$Q_c \approx 0,5P S(\gamma_c/\gamma_m - 0,5) \quad (2)$$

где P - усилие прессования, S - площадь сечения образца, γ_c - плотность сжатой стружки, γ_m - плотность металла. В результате электрической сварки контактов создаётся сила сопротивления разрыву контактов:

$$Q_i = \int_{a_2}^{a_1} Mqa^2 f(a)da = \frac{qM(a_M^3 - a_2^3)}{6a_o} \quad (3)$$

где $f(a)$ – функция распределения контактов по размерам, $a_M = \max \{a_1, 2a_o\}$ a_1 - наибольший контакт, который может быть сварен током, a_2 - контакт который ток разрушает, a_o – средний размер контакта, которые определяются:

$$a_{1,2} = \left(\frac{E}{MN\gamma_m a_o e_{1,2}} \right)^{1/2} \quad a_o = \frac{NS\rho_m}{MH\rho_c} \quad (4)$$

где E – энергия, вкладываемая в образец при пропускании импульса

электрического тока e_1, e_2 . удельная энергия необходимая соответственно для разогрева (увеличения пластичности материала) или плавления материала контакта. Число последовательных слоев определяется по формуле:

$$N = (H/h)(\gamma_c/\gamma_m)^{1/3} \quad (5)$$

В каждом из последовательных слоев M параллельных контактов:

$$M = (S/s)(\gamma_c/\gamma_m)^{2/3} \quad (6)$$

где ρ_c и ρ_m удельное сопротивление сжатой стружки и металла, H – длина образца, h - средняя толщина кусков проводника, s - средняя площадь куска проводника, приходящаяся на один контакт.

Основной вывод по второй главе. Прделанный анализ позволяет рассчитать параметры установки для электроимпульсного брикетирования по промышленной схеме. Установлено, что не требуется больших усилий прессования (давление прессования до $0,5 \text{ кН/см}^2$, усилие $\sim 50 \text{ кН}$) и требуется применение ГИТ обладающего параметрами импульса тока: амплитуда до 500 кА , и длительность до 500 мкс .

В третьей главе «Модельная установка, методика экспериментальных работ и измерений» описана разработанная по заданным во второй главе параметрам экспериментальная установка, представляющая собой пресс (усилием 50 кН) и ГИТ ($W=52 \cdot 10^3 \text{ Дж}$, $C=16,8 \cdot 10^{-3} \text{ Ф}$, $U=2500 \text{ В}$, $I=250 \cdot 10^3 \text{ А}$). Для выбора оптимальных режимов брикетирования установка позволяет регулировать значение разрядного тока, размеры получаемых брикетов и их плотность, а также производить брикеты при реализации обоих методов брикетирования – при пропускании импульсов тока в направлении прессования и перпендикулярно ему. На рисунке 1 приведена типичная осциллограмма импульса тока при брикетировании титановой стружки.

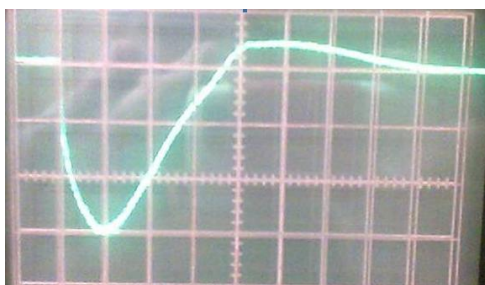


Рисунок 1 – Осциллограмма импульса тока модельной установки (брикет №4 от 15.13.11, развертка 100 кА/дел , 100 кс/дел ; разрядное напряжение 2500 В , амплитуда тока 300 кА)

Основные выводы по третьей главе. По сформулированным во второй главе расчетным параметрам, технологическим требованиям и условиям разработана и сконструирована модельная установка для электроимпульсного брикетирования стружки. Установлено, что установка с параметрами: усилие прессования 50 кН , импульсы тока длительностью $\sim 400 \text{ мкс}$ с амплитудой до 300 кА наиболее эффективна для решения общих задач электроимпульсного брикетирования металлической стружки.

На основе анализа выделены наиболее оптимальные методики исследований: для изучения газонасыщенного слоя контактных зон получаемых брикетов используется метод ядерного микроанализа и нейтронно-активационный метод определения кислорода; для определения механической прочности – разработана методика и испытательный стенд.

В четвертой главе «Экспериментальные исследования процесса брикетирования дисперсных проводящих сред и получаемых брикетов» приведены результаты исследований возможности получения брикетов из стружки различных металлов и сплавов при использовании двух принципиально различных методов обработки – при пропускании импульсного электрического тока вдоль оси прессования и при пропускании тока перпендикулярно прессованию. Предел прочности в случае, когда разламывающее усилие создавалось перпендикулярно направлению сжатия составил $\sigma_{\perp} = 0,274 \pm 0,121 \text{ (Н/мм}^2\text{)}$, для случая пропускания тока вдоль направления сжатия $\sigma_{\parallel} = 0,216 \pm 0,08 \text{ (Н/мм}^2\text{)}$. Полученные значения в пределах ошибки измерений равны, следовательно, прочность брикетов на излом существенно не зависит от направления их нагружения, и можно ввести $\sigma = 0,245 \pm 0,1 \text{ МПа}$ по результатам обеих серий испытаний. Это соответствует значениям, полученным ранее при исследовании брикетов, полученных при пропускании импульсов тока в направлении прессования. На рисунке 2 показан характерный внешний вид зоны контакта.

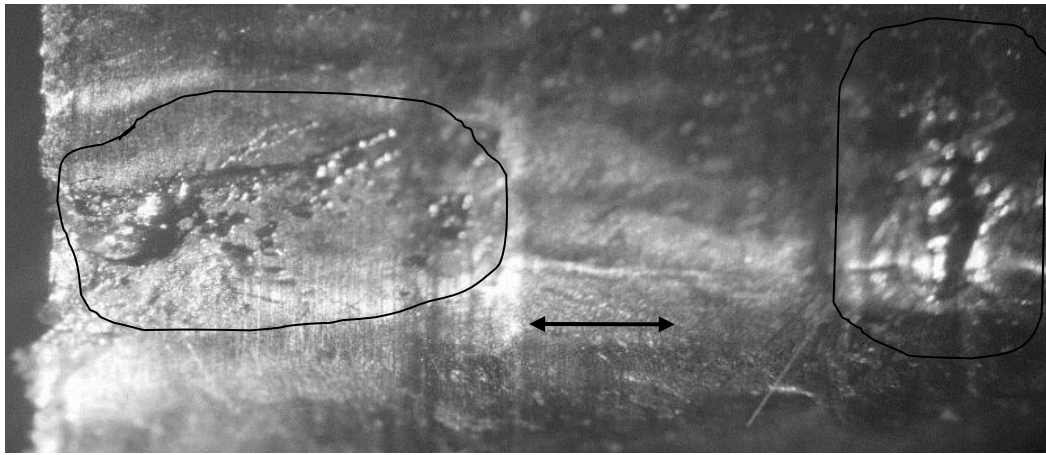


Рисунок 2 - Характерный внешний вид контактов. Линиями выделены зоны контактов, стрелкой обозначен отрезок 1 мм

На фотографии зоны контакта видны следы плавления металла в виде кратеров и выброшенные капли металла. Это свидетельствует о том, что в процессе контактообразования происходит плавление металла.

При исследовании газонасыщенного слоя контактной зоны брикетов, получаемых электроимпульсным методом, было выявлено, что при брикетировании титановых сплавов содержание кислорода в зоне контакта на глубине 1,75-2,25 мкм с поверхности стружки составляет в среднем 0,6 % (максимум – 1,0 %); содержание азота - в среднем 0,1 % (максимум 0,25%), что примерно равно газонасыщению поверхности стружки образующейся при обработке полуфабрикатов и не может быть препятствием к их использованию.

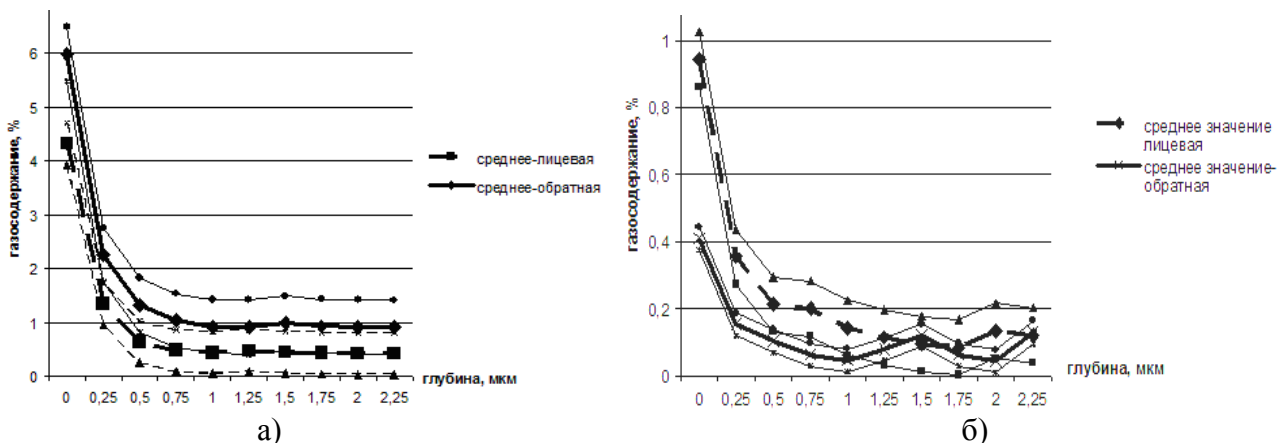


Рисунок 3 - Среднее содержание кислорода (а) и азота (б) в металле с лицевой и обратной стороны в зоне точек сварки (сплав 3М, контакты из центральной области брикета, тонкими линиями показано среднеквадратичное отклонение)

Для промышленности актуальны универсальные методы обработки материалов, поэтому исследована возможность использования электроимпульсного метода для брикетирования не только титановых сплавов, но и ряда других материалов. Установлено что можно получать брикеты из отходов любых металлов и

сплавов, в том числе из смеси стружки разных металлов, а также композитные брикеты. Получены композитные брикеты с включениями кусков материала не только с высокой, но и с низкой электропроводностью. В качестве такого материала были использованы куски металлосодержащей горной породы с удельным электрическим сопротивлением $\sim 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, то есть на 11 порядков больше, чем у стали марки «сталь 3», которая использовалась в качестве основы брикета. Фрагмент брикета показан на рисунке 4. На рисунке 5 показан брикет из титанового порошка с включениями стеклянных шариков.



Рисунок 4 – Фотография фрагмента композитного брикета из стружки стали «Сталь 3» с добавкой кусков материала с малой электропроводностью (горной породы). Размер брикета: 200х60х60 мм; плотность 1,4 г/см³; масса 1кг (400 г стружки и 600 г породы).

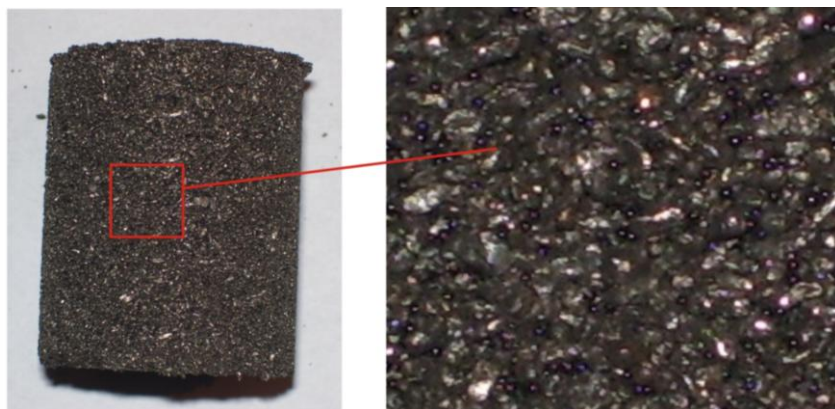


Рисунок 5 – Композитный брикет из порошка титана и стеклообразных минеральных шариков (размер брикета: диаметр 35, высота 40,5 мм; масса 109 г, плотность 2,8 г/см³; осыпь порошка 3,4 г, 3,1 %, содержание шариков по насыпному объёму 20 %, по весу 16%, в объёме брикета стекло 9%, титан 55%, поры 36 %). Справа увеличенное изображение его центральной части 1х1 см.

Таким образом, показана возможность вовлечения в брикеты, в значительном количестве, любых материалов, как проводящих, так и диэлектрических. Это важно для изготовления лигатур, однако может использоваться и для возвращения в

металлургический процесс любых видов дисперсных отходов.

Основные выводы по четвертой главе. Брикет, полученные при пропускании импульсного тока в направлении перпендикулярном направлению прессования, обладают одинаковой прочностью по всем направлениям, примерно равной прочности брикетов получаемых по прежней схеме. При промышленной реализации метода может быть осуществлен переход к этой более технологичной схеме электроимпульсного брикетирования. Получены композитные брикеты из металлической стружки и порошка с металлическими и диэлектрическими включениями различных размеров. Электропроводность включений варьировалась от диэлектрика и до величины несколько большей, чем проводимость металла матрицы. Экспериментально установлено: проводящие включения могут занимать до 50 % объема готового брикета, а диэлектрические до 30 %. Выявлено, что при брикетировании титановых сплавов содержание кислорода и азота в зоне контакта примерно равно газонасыщению поверхности стружки образующейся при обработке полуфабрикатов и не может быть препятствием к их использованию.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1) Доказана эффективность электрофизического метода брикетирования легковесных металлических отходов над существующими аналогами.

2) Показано, что при пропускании через массив сжатой стружки импульса электрического тока амплитудой 250 кА , длительностью 400 мксек , содержание кислорода и азота в точках сварки стружек не препятствует использованию металла в любых металлургических переделах. Брикетирование электроимпульсным методом может быть реализовано без использования защитной атмосферы, в том числе для реакционных материалов. Отсутствие существенного газонасыщения точек сварки указывает на то, что в зоне сварки нет мощных газовых разрядов.

3) Получены брикеты с включениями кускового материала, как электропроводящего, так и диэлектрического. Электропроводящий кусковой материал может занимать до половины объема брикета, а диэлектрический до 30 %. Показана возможность использования таких брикетов в качестве лигатуры.

4) Установлено, что получаемые при электроимпульсном брикетировании образцы обладают равной прочностью по всем направлениям, хотя при их формировании имеются выделенные направления – направление прессования и направление пропускания электрического тока, которые могут совпадать или быть

взаимно перпендикулярными. Величина прочности брикетов позволяет использовать брикеты в целом ряде технологических процессов.

5) Обоснована возможность получения по электроимпульсной технологии ряда материалов и полуфабрикатов, как из стружки и отходов, так и из порошков и гранул.

6) Разработана концепция промышленной установки для брикетирования, предложено её конструктивное решение, обоснованное теоретически и проверенное экспериментально с использованием модельной установки.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1) Крестьянинов Д.А., Бочаров Ю.Н., Самуйлов С.Д., Филин Ю.А. О возможности использования электрофизической технологии брикетирования металлической стружки для изготовления лигатур. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2008. – № 6 (70). – С. 125 – 130.

2) Крестьянинов Д.А., Пузаков И.Ю., Корнилова М.А., Самуйлов С.Д. Газонасыщение точек сварки при брикетировании титановых сплавов электроимпульсным методом. // Технология лёгких сплавов. – 2011. – № 1. – С. 98-107.

3) Крестьянинов Д.А., Самуйлов С.Д., Щербаков И.П. Патент на Полезную модель № 107723 «Устройство для брикетирования металлической стружки», дата приоритета 07.02.11., БИ № 24 27.08.2011.

4) Крестьянинов Д.А., Самуйлов С.Д., Щербаков И.П. Отчёт по теме 012-011-713-70. Разработка опытной электроимпульсной установки брикетирования металлической стружки. Рег. № 02201160622, от 08.09.2011. - 58 с.

5) Крестьянинов Д.А., Самуйлов С.Д. Электроимпульсная технология брикетирования легковесных металлоотходов. // Шестая Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Экология и научно-технический прогресс» Пермский Государственный технический университет г. Пермь. 2007, – С. 244 – 247.

6) Крестьянинов Д.А. Электроимпульсная технология брикетирования металлической стружки и легковесных металлоотходов. // Симпозиум Молодые учёные промышленности северо-западного региона. Материалы конференций симпозиума. – 2007. – С. 80 – 81.

7) Крестьянинов Д. А. Электроимпульсный метод брикетирования металлической стружки и легковесных металлоотходов. // Молодые учёные промышленности северо-западного региона. Материалы конференций политехнического симпозиума. – 2007. – С.244 – 245.

8) Крестьянинов Д.А., Самуйлов С.Д., Бочаров Ю.Н. Электроимпульсная технология брикетирования легковесных металлоотходов. // 13 международная специализированная выставка Металл-Экспо 2007, конференция Новые тенденции рационального использования вторичных ресурсов и проблемы экологии. Тезисы докладов. –С. 11 - 12.

9) Крестьянинов Д.А. Электроимпульсная технология брикетирования легковесных металлоотходов. // Экология и научно-технический прогресс. VI международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных. –Пермь. -2007. -С.244.

10) Крестьянинов Д.А., Бочаров Ю.Н., Самуйлов С.Д. Использование импульсного электрического тока большой плотности в качестве технологического инструмента для брикетирования металлоотходов. // XXXVI неделя науки СПбГПУ. Материалы Всероссийской межвузовской НТК студентов и аспирантов СПбГПУ. Часть II. -СПб. : Изд-во Политехнического у-та, 2008. -С. 9 – 10.

11) Крестьянинов Д.А., Самуйлов С.Д., Бочаров Ю.Н., Игнатов В.И., Краснов А.А. Новые результаты и новые возможности использования электроимпульсной технологии для переработки легковесных металлоотходов. // Международный форум «14 специализированная выставка Металлэкспо 2008» VI ежегодная конференция «Новые тенденции рационального использования вторичных ресурсов и проблемы экологии» 13 ноября 2008 Металлэкспо. –2008. –С. 171 – 179.

12) Крестьянинов Д.А., Самуйлов С.Д., Бочаров Ю.Н., Игнатов В.И., Краснов А.А., Егоров А.В., Аккерман Э. Пористые металлические материалы, получаемые с использованием электроимпульсной технологии. // Неделя металлов в Москве. – 2009. –С. 164 – 169.

13) Крестьянинов Д.А., Самуйлов С.Д., Бочаров Ю.Н. Электрофизическое компактирование дисперсных металлических сред. // Конференция (школа-семинар) по физике и астрономии для молодых учёных Санкт-Петербурга и Северо-Запада «Физика СПб» 29-30 октября 2009 г. –С. 96 - 97.

14) Крестьянинов Д.А., Самуйлов С.Д., Бочаров Ю.Н. Утилизация дисперсных металлических отходов. // Международная научно-практическая конференция «Инновации в теории и практике управления отходами» 5 – 6 ноября 2009 года в г. Пермь. –2009. –С.142-149.