

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права  
УДК 620.531.433

**ЛИТВИНКО**  
**Артём Анатольевич**

**ТЕХНОЛОГИЯ ГОРЯЧЕГО БРИКЕТИРОВАНИЯ  
ОТХОДОВ ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ В ПРЕСС-ФОРМАХ  
С ПОДВИЖНОЙ МАТРИЦЕЙ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.02.09 – технологии и машины обработки давлением

Минск, 2024

Научная работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

Научный  
руководитель

**ДЪЯКОНОВ Олег Михайлович,**  
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры  
«Порошковая металлургия, сварка и технология  
материалов» Белорусского национального техниче-  
ского университета

Официальные  
оппоненты:

**ТОМИЛО Вячеслав Анатольевич,**  
доктор технических наук, профессор, заведующий  
кафедрой «Машины и технология обработки метал-  
лов давлением имени С. И. Губкина» Белорусского  
национального технического университета;

**БОБАРИКИН Юрий Леонидович,**  
кандидат технических наук, доцент, заведующий  
кафедрой «Металлургия и технологии обработки  
материалов» УО «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»

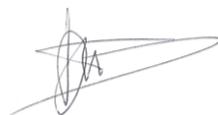
Оппонирующая организация Государственное научное учреждение «Физико-  
технический институт Национальной академии наук  
Беларуси»

Защита состоится 22 ноября 2024 г. в 14<sup>00</sup> на заседании совета по защите  
диссертаций Д 02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете  
по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202. Телефон  
ученого секретаря: +375 (17) 296-67-85; e-mail: mitomd@bntu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национально-  
го технического университета.

Автореферат разослан 21 октября 2024 г.

И. о. ученого секретаря совета по  
защите диссертаций, доктор техниче-  
ских наук, профессор



В. А. Томило

© Литвинко А. А., 2024  
© Белорусский национальный  
технический университет, 2024

## ВВЕДЕНИЕ

Получение качественных шихтовых материалов из отходов металлообработки является важнейшей составляющей ресурсного обеспечения литейного и металлургического производства. К отходам черных металлов относятся стальная и чугунная стружка, шлифовальные, опилолочные и обкатные шламы, аспирационная пыль, металлизированная пыль от обдирочных, наждачных и заточных станков, мелкофракционные отсеvy ферросплавов и др. Общий объем образования отходов черных металлов в Республике Беларусь составляет порядка 400 тыс. т в год. Стружка переплавляется россыпью или в брикетируемом виде, около 135–150 тыс. т в год экспортируется за рубеж. Шламы (примерно 45 тыс. т в год) вывозятся в отвалы или используются в качестве доменного присада, при этом безвозвратно теряется большое количество металлов и, в том числе, ценных легирующих элементов (вольфрам, молибден, ванадий, хром, никель и др.). Экспорт отходов металлообработки сокращает вторичные сырьевые ресурсы и не является экономически целесообразным.

Наиболее широкое применение в практике переработки металлической стружки получил плавильный передел. Среди известных способов подготовки стружки к переплаву различают холодное и горячее брикетирование, при этом горячее брикетирование, несмотря на свои очевидные и доказанные к настоящему времени преимущества, не получило широкого распространения. Так, в СССР и за рубежом в 70–80-х годах прошлого столетия были созданы установки горячего брикетирования стружки с нагревом в ротационных газовых печах. Брикетирование осуществлялось на гидравлических прессах и молотах в пресс-формах с неподвижной матрицей. Все производства с использованием данного вида оборудования прекратили свое существование по причине низкой стойкости пресс-форм, несовершенства нагревательных печей, нарушения экологических норм и окисления брикетов.

В Республике Беларусь в 1988–2004 гг. на Минском заводе «Вторчермет» и ОАО «МПЗ» по проекту и при непосредственном участии сотрудников Белорусской государственной политехнической академии (кафедра «Порошковая металлургия и технология материалов») перерабатывались стружковые и шламовые отходы инструментальных и подшипниковых сталей. Технологический комплекс горячего брикетирования включал в себя установку горячего брикетирования стружки с непрерывным муфельным нагревом, исключающим окисление металлических частиц. Брикеты поставлялись на заводы «AG Krupp» (Германия), АО «Металлургический завод «Электросталь» (Россия), ОАО «БМЗ» (Беларусь). Таким образом было достигнуто высокое качество брикетов, претензии металлургов относились лишь к способности брикетов удерживать в себе определенное количество порошковых наполнителей при сбрасывании с большой высоты (до 4 м).

Актуальность настоящей диссертационной работы продиктована необходимостью разработки новой технологии горячего брикетирования, способной обеспечить снижение энергосиловых параметров и износа инструмента, повышение плотности и прочности брикетов.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с научными программами, проектами и темами**

Исследования и результаты, положенные в основу диссертации, соответствуют перечню приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы в соответствии с Указом Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156 (пункты 1, 3, 4).

Научные исследования по теме диссертации проводились на кафедре «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов» БНТУ в соответствии с заданием «2.02, ГБ 21-07/7», НИР «Разработка научных основ получения высококачественного металлургического сырья из дисперсных отходов металлообработки», подпрограммы «Металлургия», государственной программы научных исследований «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении» на 2021–2025 годы. Многие результаты фундаментального и прикладного характера получены при выполнении договора о научно-техническом сотрудничестве с ОАО «МТЗ» № 41/06-2019 от 30.07.2019 г.: «Внедрение технологии горячего брикетирования отходов черных металлов на ОАО «МТЗ».

### **Цель, задачи, объект и предмет исследования**

*Целью* настоящей работы является разработка технологии горячего брикетирования отходов черных металлов в пресс-формах с подвижной матрицей, обеспечивающей снижение энергосиловых параметров, износа инструмента, повышение качества брикетов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие *задачи*:

1. Разработать схему нагружения с учетом силового и температурного воздействия на прессовку и условий трения.
2. Создать и испытать пресс-форму горячего брикетирования с подвижной матрицей, повышенным ходом и минимальным износом подвижных частей, внутренним и внешним охлаждением.
3. Исследовать механизм и разработать физико-математическую модель процесса брикетирования отходов черных металлов для определения режимов нагружения по химическому составу и критериям качества горячепрессованных брикетов.
4. Провести теоретические и экспериментальные исследования по определению влияния схемы нагружения, вида материала и температуры на энергосиловые параметры процесса, характер деформационного уплотнения, износ пресс-формы и качество брикетов.
5. Разработать и внедрить в производство технологию горячего брикетирования отходов черных металлов в пресс-формах с подвижной матрицей.

**Объект исследования** – металлургические брикеты и композиты из стальной и чугушной стружки с мелкофракционными углеродосодержащими, шлакообразующими и легирующими добавками, оборудование и технология их получения.

**Предмет исследования** – механизм деформационного уплотнения дисперсий черных металлов с различными структурно-реологическими свойствами, влияние схемы нагружения, термомеханической и термомеханической обработки (температур-

ного, силового, химического и сорбционно-молекулярного взаимодействия) на качество брикетов, производительность и экономическую эффективность процесса брикетирования.

### **Научная новизна**

1. Разработана физико-математическая модель процесса горячего брикетирования структурно-неоднородных дискретных металлических материалов в пресс-формах с подвижной матрицей, консолидируемых в пластически деформируемое пористое тело, в виде замкнутой системы уравнений, описывающей поведение тела с учетом его структурно-реологических характеристик, схемы нагружения, температуры, трения и других технологических факторов, отличающаяся от известных моделей возможностью построения полей напряжений и плотности по объему прессовки на любом этапе нагружения.

2. Предложен экспериментально-аналитический метод определения структурно-реологических характеристик шихтовых материалов (стальная и чугунная стружка, порошки металлосодержащих шламов, аспирационная пыль и др.), составляющих основу разработанной феноменологической модели: предела текучести, относительного сжатия и показателя степени объемной деформации, применение которого позволяет производить расчеты технологических параметров процесса брикетирования указанных материалов с учетом их геометрических и физико-механических свойств.

3. При исследовании зависимостей влияния давления прессования и сил контактного трения на величину и распределение плотности по объему брикета в условиях всестороннего неравномерного сжатия в пресс-формах с подвижной матрицей, установлено непрерывно возрастающее воздействие на прессовку сил нормального давления и нормальных напряжений при непрерывно убывающем значении касательных напряжений, практически полное отсутствие сил контактного трения на боковой поверхности и у основания прессовки, рост интенсивности уплотнения прессовки при перемещении фронта уплотнения совместно с матрицей в одном и том же направлении, что по сравнению с известными способами брикетирования мелкофракционных отходов металлообработки обеспечивает снижение энергосиловых параметров процесса и износа пресс-формы, минимизацию остаточной пористости, повышение плотности и прочности брикетов.

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

1. Физико-математическая модель процесса брикетирования отходов черных металлов с различными структурно-реологическими свойствами в виде замкнутой системы уравнений, полученной методом совместного решения дифференциальных уравнений равновесия металлического пористого тела (прессовки) и условия пластичности с учетом условий нагружения в пресс-формах с подвижной матрицей (вид шихты, ее исходные структурно-реологические характеристики, начальная плотность, температура, трение и другие факторы), позволяющая производить построение полей напряжений и плотности по объему прессовки на любом этапе нагружения, что послужило основой для определения необходимых параметров нагружения (давление, усилие, работа деформации) в соответствии с требуемыми физико-механическими характеристиками (плотность, прочность, осыпаемость) готовых брикетов.

2. Экспериментально-аналитический метод определения структурно-реологических характеристик шихтовых материалов, брикетируемых в пресс-формах с подвижной матрицей: предела текучести, относительного сжатия и показателя степени объемной деформации, составляющих основу численных расчетов феноменологической модели, заключающийся в последовательных приближениях расчетных диаграмм прессования (зависимости плотности прессовки от давления прессования) к экспериментальной с максимально возможной степенью ее конформного отображения, что позволило определить значения указанных характеристик и использовать их при расчетах технологических параметров процесса брикетирования с погрешностью, не превышающей 12 %.

3. Теоретические и экспериментальные зависимости влияния величины и направления действия сил контактного трения на напряженно-деформированное состояние прессовки и сопротивление деформированию в условиях всестороннего неравномерного сжатия в пресс-формах с подвижной матрицей, позволившие установить непрерывно возрастающую величину сил нормального давления и нормальных напряжений на контактных поверхностях и в глубине материала и непрерывно убывающее значение касательных напряжений при практически отсутствующем воздействии на прессовку сил бокового контактного трения, в результате чего удалось достигнуть снижения энергосиловых параметров процесса брикетирования и износа пресс-формы.

4. Результаты теоретического и экспериментального исследования влияния напряженно-деформированного состояния прессовки на величину и распределение плотности по объему под воздействием распределенной поверхностной нагрузки со стороны прессующего пуансона и подвижной матрицы в направлении усилия прессования, позволившие установить, что формирование фронта уплотнения прессовки при минимальном относительном сдвиге контактирующих с матрицей поверхностей приводит к увеличению плотности готового брикета, благодаря чему удалось достигнуть более равномерного распределения плотности по объему брикета по сравнению с известными методами и минимизировать таким образом остаточную пористость в его центральной области, повысить прочность брикетов.

#### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Автором разработана новая схема нагружения дискретных металлических материалов с учетом силового и температурного воздействия на прессовку и условий трения, создана пресс-форма горячего брикетирования с подвижной матрицей, повышенным ходом и минимальным износом подвижных частей, внутренним и внешним охлаждением. Проведены экспериментальные исследования, лабораторные и промышленные испытания опытной установки и технологической оснастки, установлены режимы деформационного уплотнения стальной и чугуновой стружки. Разработана технология горячего брикетирования отходов черных металлов в пресс-формах с подвижной матрицей.

Совместно с научным руководителем диссертационной работы, доктором технических наук, профессором кафедры «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов» О. М. Дьяконовым сформулированы цель и задачи исследований, основные положения, выносимые на защиту, разработана физико-математическая модель процесса брикетирования дискретных металлических материалов. Научным

руководителем оказывалась научно-консультационная и практическая помощь на всех этапах выполнения диссертационной работы.

Совместно с доктором технических наук, профессором, академиком НАН Беларуси Е. И. Маруковичем, проведен анализ перспектив применения технологии горячего брикетирования на предприятиях Республики Беларусь. Совместно с доктором технических наук, профессором, член-корреспондентом НАН Беларуси Ф. И. Пантелеенко обсуждались вопросы создания и внедрения технологического комплекса для переработки отходов шлифования методами порошковой металлургии. Совместно с инженером В. Ю. Середой на ОАО «МТЗ» создана опытная установка, изготовлены опытные партии горячепрессованных брикетов, проведены их промышленные испытания и контрольные плавки.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Материалы диссертационной работы доложены и обсуждены на двух международных научно-технических конференциях ассоциации литейщиков и металлургов Республики Беларусь «Литейное производство и металлургия»: «Получение высококачественного металлургического сырья из отходов металлообрабатывающего производства» – г. Жлобин, 2019; «Совершенствование технологии рециклинга отходов черных металлов в процессах их подготовки к металлургическому переплаву» – г. Минск, 2020. На IV Международной конференции «Перспективные высокоэнтропийные материалы» доложены материалы на тему «Производство брикетов и металлургических композитов из отходов черных металлов» г. Черноголовка, Россия.

По результатам диссертационной работы в соответствии с техническим заданием БНТУ в ЗАО «Солггорский институт проблем ресурсосбережения с опытным производством» (ЗАО «СИПРсОП») создается опытная установка горячего брикетирования стальной и чугунной стружки с последующим переплавом брикетов в индукционных печах для получения крупногабаритных отливок корпусных деталей. По результатам промышленных испытаний в ЗАО «СИПРсОП» предполагается внедрение новой технологии и оборудования на ОАО «МТЗ».

### **Опубликование результатов диссертации**

Содержание диссертации опубликовано в 13 научных работах, из которых 3 статьи в рецензируемых научных изданиях в соответствии с пунктом 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (2,2 авт. листа), 4 статьи в других научных изданиях, включенных в перечень ВАК Республики Беларусь (2,6 авт. листа), 2 статьи и 1 тезис доклада в научных сборниках и материалах конференций. Для подтверждения новизны технических решений поданы 3 заявки на изобретения Республики Беларусь.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Полный объем диссертации составляет 156 страниц, включая 44 иллюстрации, 26 таблиц, список использованных источников в количестве 90 наименований, список публикаций соискателя из 13 наименований и 3 приложений.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

**В первой главе** выполнен аналитический обзор литературы по теме исследования. Показано, что недостатком пресс-форм с неподвижной матрицей являются значительные силовые и энергетические затраты на преодоление сил бокового контактного трения, которые приводят к интенсивному износу деталей пресс-формы, неравномерному распределению плотности по объему брикета, расслоению и разрушению брикета при сбрасывании с большой высоты при перевалках и загрузке в плавильные агрегаты. Одним из выходов из создавшегося положения является создание новой пресс-формы с подвижной матрицей, снижающей действие сил бокового контактного трения.

Анализ существующих методов расчета энергосиловых параметров процесса прессования дискретных металлических материалов показал, что для построения полей напряжений и плотности в очаге деформации необходимо создание феноменологической физико-математической модели, описывающей поведение пористой брикетной массы на основе трех структурно-реологических характеристик (предела текучести, относительного сжатия и показателя степени объемной деформации) с минимальным количеством эмпирических поправок. Такая модель должна учитывать влияние сил контактного трения как на величину энергосиловых параметров (давление, усилие, работа деформации), так и на распределение напряжений и плотности по объему брикета.

**Во второй главе** приведено описание опытной установки для исследования процесса горячего брикетирования, которая была создана на базе гидравлического пресса Д2434В усилием 2500 кН. Пресс оборудован электроконтактным манометром ЭКМ-ДМ2005фCr1Ex для измерения давления масла в главном гидроцилиндре, механической линейкой со стрелкой на ползуне для измерения хода ползуна, а также нижним гидравлическим выталкивателем усилием 600 кН. Нагрев образцов стружки и других отходов металлообработки осуществляли в муфельной печи СНОЛ-1,6,2,5.1/11-И2М (до 1100 °С, керамика, 4 л) в стальных мерных стаканах, обеспечивающих засыпку горячей шихты в пресс-форму с заданной температурой и в требуемом объеме. В процессе нагрева в ограниченном пространстве камеры печи создавалась защитная углеводородная атмосфера в результате термической возгонки масляной компоненты СОЖ.

В качестве материалов для проведения экспериментального исследования выбрали токарная сливная стружка стали 45, фрезерная стружка скалывания подшипниковой стали ШХ15 и токарная стружка надлома серого чугуна СЧ25. В качестве углеродосодержащих, легирующих и шлакообразующих добавок приняты мелкофракционные отсеvy кокса, ферросплавов, металлосодержащие шламы подшипникового производства. Для всех выбранных материалов нагрев осуществляли до полного удаления из шихты жидкой фазы. Температурный интервал нагрева составлял 700–850 °С. В результате пиролиза углеводородных соединений на поверхности частиц образовывалось покрытие толщиной 0,5–0,7 мм. Помимо защитных функций от окисления данное покрытие выполняло роль смазки в процессе горячего прессования.

Температуру внутреннего пространства печи СНОЛ измеряли с помощью хромель-алюмелевой термопары, встроенной в корпус печи. В связи со значительным временем выдержки шихта прогревалась до температуры печи и полного удаления СОЖ.

Диаграмма прессования  $p(\Delta h)$  строилась методом поэтапного деформирования при практически одинаковых исходных значениях массы шихты в матрице пресс-формы. Давление прессования определяли по известным значениям давления в главном гидроцилиндре пресса с пересчетом на площадь формирующей полости матрицы пресс-формы. Пористость брикетов определяли методом секущих. Испытания на осыпаемость проводили по стандартной методике СТБ 2026-2010 путем трехкратного сбрасывания брикета на бетонное основание с высоты одного метра. В связи с производственной необходимостью высоту сбрасывания увеличивали до 5 м.

В третьей главе представлены результаты моделирования и расчета процесса брикетирования отходов черных металлов в пресс-форме с подвижной матрицей (рисунок 1). Заготовка 1 (дискретное тело) брикетуется в жесткой цилиндрической матрице 2, запрессованной в поршень 3 пневмоцилиндра 4. Поршень 3 в своем исходном верхнем положении удерживается давлением сжатого воздуха в подпоршневой полости пневмоцилиндра 4. При совершении верхним пуансоном 5 рабочего хода матрица 2 перемещается вместе с ним с одной и той же скоростью. При этом нижний пуансон 6 остается неподвижным. Объем пористого тела 1 уменьшается, т. е. происходит процесс брикетирования. При обратном холостом ходе пуансона 5 пневмосистема с помощью пуансона 6 возвращает матрицу 2 в исходное верхнее положение. Брикет 1 выталкивается из матрицы 2 пуансоном 6. Далее цикл повторяется.

При данной схеме нагружения усилие пресса  $P$  преодолевает сопротивление деформированию со стороны прессовки  $R$  и силу трения на ее боковой поверхности  $F_{тр}$ . Направления векторов реактивных напряжений на боковой поверхности показаны на рисунке 2.

Брикетирование стружки отличается большим ходом подвижных частей пресса и пресс-формы. Объем столба стружки уменьшается в 5–8 раз. Уплотнение столба стружки по высоте неравномерное. В пресс-форме с подвижной матрицей фронт уплотнения распространяется от подвижного пуансона к неподвижному по закону волны сжатия, перемещается совместно с матрицей в одном и том же направлении при минимальном относительном сдвиге контактирующих поверхностей. В связи с этим величина и работа сил трения, а следовательно, и износ матрицы минимизируются. В верхних углах закрытого пространства матрицы металл «защемлен», движется со скоростью матрицы, скорость перемещения металла относительно матрицы, а следовательно, и силы трения равны нулю.

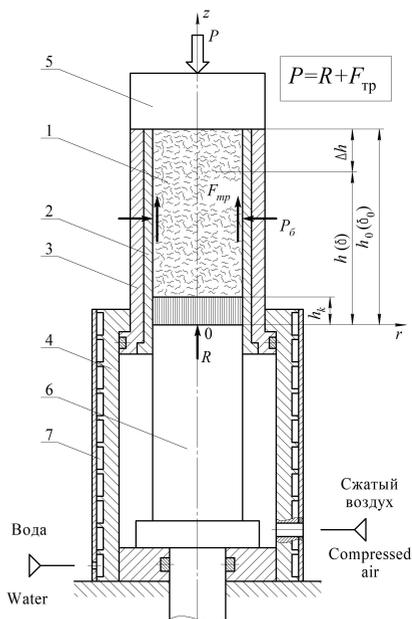


Рисунок 1 – Технологическая схема брикетирования стружки в пресс-форме с подвижной матрицей

Ход прессующего пуансона и матрицы устанавливается в зависимости от требуемой степени деформации прессовки, он не ограничивается конструктивными особенностями пресс-формы и не зависит от термомеханической усталости упругой опоры – сжатого воздуха. Износ прессующего пуансона исключен, так как пуансон не входит в матрицу.

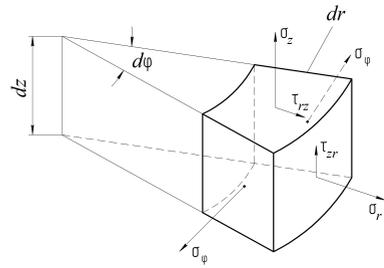
Неподвижный опорный пуансон в процессе прессования воспринимает нормальную нагрузку. По окончании процесса брикет представляет собой практически компактное тело, выдавливание которого в зазор между матрицей и пуансоном не представляется возможным.

Периодическая чистка пресс-формы производится сжатым воздухом. Пресс-форма охлаждается изнутри потоком холодного воздуха, снаружи – водяной рубашкой 7 (рисунок 1).

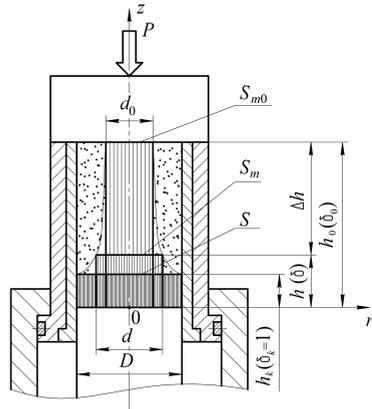
Физической моделью консолидированного пористого тела является изотропное несжимаемое жесткопластическое тело, для которого справедливо применение уравнений механики сплошной среды. Наличие пор в теле рассматривается лишь как особенность его геометрического строения, оказывающая влияние на величину и распределение напряжений и плотности. Расчет напряженно-деформированного состояния тела для рассматриваемого фиксированного момента осуществляется по среднему значению относительной плотности, которая является общим переменным параметром процесса прессования.

В основу построения физико-математической модели процесса прессования структурно-неоднородных отходов металлообработки положен идеализированный случай однородного уплотнения, при котором плотность прессовки распределена равномерно по объему на любом этапе нагружения. Применяя метод консолидации металлических сечений в плоскостях перпендикулярных оси  $z$  (рисунок 3), получаем сплошное несжимаемое тело, которое при осадке сохраняет свою форму (цилиндр переходит в цилиндр – случай однородной осадки заготовки с нулевой пористостью).

Относительная плотность прессовки  $\delta$  определяется как отношение критического объема  $V_k$  к его текущему значению  $V$ , или критической высоты  $h_k$  к ее



**Рисунок 2 – Элементарный объем очага деформации с компонентами тензора напряжений на боковой поверхности прессовки**



**Рисунок 3 – Схема консолидации металлических сечений пористого тела**

текущему значению  $h$ , или как отношение площади поперечного металлического сечения  $S_m$  к номинальной площади цилиндрического отверстия матрицы  $S$ :

$$\delta = \frac{V_k}{V} = \frac{Sh_k}{Sh} = \frac{S_m h}{Sh} = \frac{h_k}{h} = \frac{S_m}{S}. \quad (1)$$

Коэффициент бокового давления  $\xi$  равен отношению степеней деформации прессовки в поперечном  $\varepsilon_r$  и продольном  $\varepsilon_z$  сечениях:

$$\begin{aligned} \xi(\delta) &= \int_{\delta_0}^{\delta} d\xi = \int_{\delta_0}^{\delta} d \frac{\varepsilon_{r\varphi}}{\varepsilon_z} = \int_{\delta_0}^{\delta} d \left( \frac{S_m - S_{m0}}{S} \cdot \frac{h_0 - h}{h_0} \right) = \\ &= \int_{\delta_0}^{\delta} d \left[ (\delta - \delta_0) \frac{\delta}{\delta - \delta_0} \right] = \int_{\delta_0}^{\delta} d\delta = \delta - \delta_0 < 1. \end{aligned} \quad (2)$$

Как следует из выражения (2), сжатие пористого тела в замкнутом объеме подчинено степенному закону. При однородном уплотнении показатель степени равен единице – зависимость коэффициента бокового давления от плотности линейная. В случаях неоднородного уплотнения эта зависимость нелинейная и может быть представлена в виде следующей степенной функции:

$$\xi = \frac{\sigma_r + \tau_{rz}}{\sigma_z + \tau_{zr}} = \varepsilon(\delta - \delta_0)^m \leq 1, \quad (3)$$

где  $\sigma_z, \sigma_r, \tau_{zr}, \tau_{rz}$  – компоненты тензора напряжений в цилиндрических координатах  $z, r, \varphi$ ;  
 $\varepsilon$  – характеристика пластичности материала или относительное сжатие при заданных температурно-скоростных условиях деформации;

$m$  – показатель степени объемной деформации, который зависит от начальной плотности прессовки и геометрии ее структурных элементов.

Уравнение (3) устанавливает связь между напряжениями и плотностью в любой точке очага деформации и отображает таким образом физическую природу процесса уплотнения. Вывод этого уравнения основан на теореме теории пластичности металлических тел о пропорциональности напряжений и степеней деформаций при простом монотонном нагружении.

Параметры линейного и объемного уплотнения связаны между собой следующим уравнением:

$$\varepsilon_z + \varepsilon_r - \varepsilon_\varphi = \varepsilon_z. \quad (4)$$

В левой части равенства  $\varepsilon_z$  – степень линейной деформации по оси  $z$ , в правой – этот же параметр представляет собой степень объемной деформации. Отсюда следует, что степени деформации  $\varepsilon_r, \varepsilon_\varphi$  и напряжения  $\sigma_r, \sigma_\varphi$  в направлении осей  $r$  и  $\varphi$  в условиях осесимметричного нагружения равны между собой:

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= \varepsilon_\varphi, \\ \sigma_r &= \sigma_\varphi.\end{aligned}\tag{5}$$

С учетом выражений (3), (5), закона парности касательных напряжений  $\tau_{rz} = \tau_{zr} = \tau$  и обозначения  $\sigma_z = \sigma$  исходная система уравнений для расчета напряженного состояния металлического пористого тела приводится к виду:

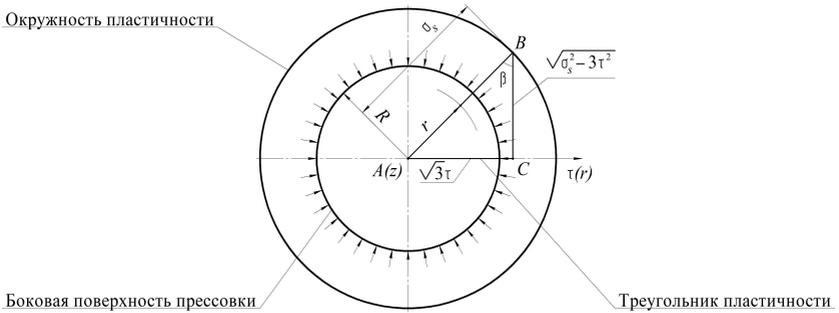
$$\xi \frac{\partial \sigma}{\partial r} - \eta \frac{\partial \tau}{\partial r} + \frac{\partial \tau}{\partial z} = 0;\tag{6}$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial r} + \frac{\partial \sigma}{\partial z} + \frac{\tau}{r} = 0;\tag{7}$$

$$\eta^2 (\sigma + \tau)^2 + 3\tau^2 = \sigma_s^2,\tag{8}$$

где  $\eta$  – пористость, определяемая по формуле:  $\eta = 1 - \xi$ .

Уравнения (6), (7) представляют собой дифференциальные уравнения равновесия Л. Эйлера, а уравнение (8) – цилиндрическое условие пластичности Губера-Мизеса. Ось симметрии предельной поверхности текучести, т. е. боковой поверхности цилиндра совпадает с координатной осью  $z$ . В плоскостях  $z$  уравнение (8) представляет собой окружность радиусом  $\sigma_s$  (рисунок 4).



**Рисунок 4 – Окружность пластичности**

В случае идеальной пластичности в условиях гидростатического сжатия уравнение (8) переходит в предельное условие пластичности Губера-Мизеса для компактных металлов:  $\xi = \delta = 1$ ,  $\eta = 0$ ,  $\tau = k = \sigma_s / \sqrt{3}$ , где  $k$  – константа пластичности. В треугольнике пластичности  $ABC$  в плоскости  $z$  величины напряжений  $\sigma$  и  $\tau$  определяются величиной угла пластического трения  $\beta$ :

$$\beta = \arcsin \frac{\sqrt{3}\tau}{\sigma_s} = \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{3}\tau}{\sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}},$$

$$\tau = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \sin \beta = k \sin \beta,$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sqrt{3}\tau}{\sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}}. \quad (9)$$

Решение осесимметричной задачи сводится к определению угла  $\beta$ .

Как следует из условия (8), между напряжениями  $\sigma$  и  $\tau$  устанавливается следующая взаимосвязь:

$$\sigma = \frac{1}{\eta} \sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2} - \tau; \quad (10)$$

$$\tau = \frac{\sqrt{(\eta^2 + 3)\sigma_s^2 - 3\eta^2\sigma^2 - \eta^2\sigma}}{\eta^2 + 3}. \quad (11)$$

Анализ этих выражений показывает, что при  $\xi \rightarrow 1$ ,  $\eta \rightarrow 0$  осевое нормальное напряжение  $\sigma \rightarrow \infty$ , при этом касательное напряжение (11) не может превысить величины константы пластичности:  $\tau = k = \sigma_s / \sqrt{3}$ .

В процессе прессования давление прессования  $p$  не изменяет своего направления и остается положительной величиной:

$$p = \sigma + \tau = \frac{1}{\eta} \sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}. \quad (12)$$

Решением системы уравнений 6–8 является уравнение деформационного уплотнения пористого тела:

$$\begin{aligned} & \frac{3\xi^2}{\eta^2 + 3\xi^2} \ln \frac{\eta}{\eta + \sqrt{3}\xi \operatorname{tg} \beta} - \frac{\sqrt{3} \left[ \eta^2 (1 + \xi) + 3\xi^2 \right]}{\eta (\eta^2 + 3\xi^2)} \beta - \\ & - \frac{\eta^2}{2(\eta^2 + 3\xi^2)} \ln (\operatorname{tg}^2 \beta + 1) + \ln \sqrt{\operatorname{tg}^2 \beta + 1} + \frac{z}{r} - \frac{h}{R} = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

где  $R$  – радиус отверстия матрицы.

Данное уравнение является трансцендентным. Численное решение состоит в определении угла  $\beta = \beta(z, r)$ . Далее по формулам (9), (10), (3) определяются все остальные компоненты тензора напряжений по координатам точек очага деформации на любом этапе нагружения и в том числе давление, усилие и работа деформации.

Для определения локальных характеристик плотности и ее распределения по объему прессовки разработана зональная модель, основанная на определении шарового тензора напряжений по среднему напряжению в каждой зоне, равному I-му инварианту тензора напряжений.

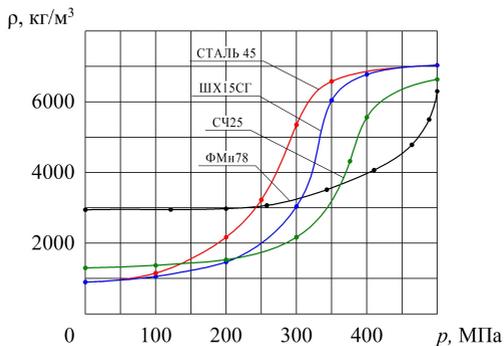
**В четвертой главе** приведены результаты экспериментального исследования процесса горячего брикетирования отходов черных металлов. Цель исследования состояла в определении режимов брикетирования (температура, энергосиловые параметры) по критериям качества брикетов и износа инструмента, а также проверке способности разработанной модели и, соответственно, созданного на ее основе метода расчета физически адекватно и точно отображать явления и закономерности процесса брикетирования. Основными критериями качества являются химический состав, плотность и прочность брикетов.

Режимы брикетирования и техническая характеристика брикетов приведены в таблице 1, где  $\rho_0$  – плотность засыпки материала в пресс-форму;  $T$  – температура нагрева;  $p_{\max}$  – максимальное давление прессования, при котором достигается заданная плотность брикета  $\rho_{бр}$ ;  $m$  – масса брикета;  $A$  – работа деформации;  $W$  – удельная работа деформации ( $W = A / m$ ).

Таблица 1 – Режимы брикетирования и техническая характеристика брикетов

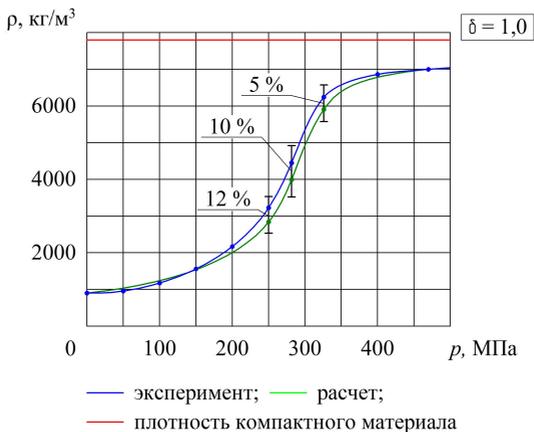
Материал	Плотность засыпки в пресс-форму, кг/м <sup>3</sup>	T, °C	Давление прессования макс., МПа	Размеры брикета, мм		Плотность брикета, кг/м <sup>3</sup>	Масса, кг	W, кДж/кг
				d	h			
Стружка стали 45 (-20 мм)	900	700	470	60	19,3	7000	0,382	157
Стружка стали 45 (-20 мм)	900	20	650	60	24,6	5500	0,382	392,5
Стружка стали ШХ15СГ (-20 мм)	900	750	480	60	19,3	7000	0,382	199
Стружка (80 %) + порошок шлама стали ШХ15СГ (20 %)	756	700	500	60	19,3	5880	0,321	163
Чугунная стружка СЧ25 (-10 мм)	1300	800	470	60	30	6500	0,551	172
Чугунная стружка СЧ25 (-10 мм)	1300	20	636	60	40	4800	0,551	396
Чугунная стружка СЧ25 (97 %) + отсев кокса (3 %)	1261	800	500	60	28	6761	0,535	182
Отсев ферромарганца ФМн78 (-10 мм)	2945	850	500	60	70	6300	1,25	71

Кривые уплотнения исследуемых материалов, производные от диаграмм прессования  $\rho(\Delta h)$ , приведены на рисунке 5.

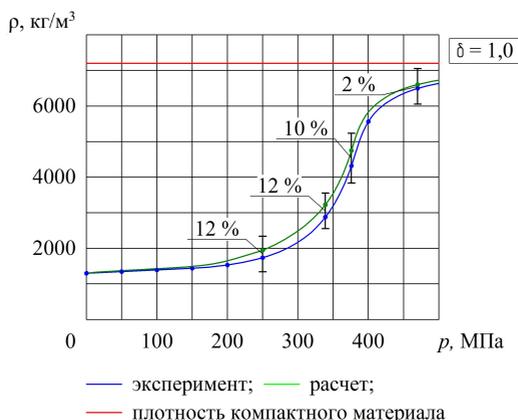


**Рисунок 5 – Кривые уплотнения исследуемых материалов**

Экспериментальные диаграммы прессования в сравнении с диаграммами, построенными расчетным путем, показаны на рисунке 6 и 7. Погрешность расчетов не превышала 12 %. Структурно-реологические характеристики шихтовых материалов определялись с помощью разработанного экспериментально-аналитического метода, согласно которому предел текучести ( $\sigma_s$ ) и относительное сжатие прессовки ( $\epsilon$ ) находится непосредственно из эксперимента, а показатель степени объемной деформации ( $m$ ) – путем последовательных приближений расчетных диаграмм прессования  $\delta(p)$  к экспериментальной с максимально возможной степенью ее конформного отображения.



**Рисунок 6 – Зависимость плотности прессовки от давления прессования для стружки стали 45**



**Рисунок 7 – Зависимость плотности прессовки от давления прессования для стружки серого чугуна СЧ25**

Установлено, что характер деформационного уплотнения и уровень сопротивления деформированию зависят от исходного состояния материала: чем больше начальная плотность и предел текучести металла, тем интенсивнее нарастает давление прессования; чем выше пластичность металла, тем больше боковое давление. Мелкофракционные наполнители металлического или неметаллического происхождения заполняют пустоты между более крупными фракциями стружки и таким образом повышают начальную плотность прессовки и градиент роста давления по мере увеличения плотности.

Процесс уплотнения прессовки в основном происходит под воздействием сил нормального давления и нормальных напряжений. Это приводит к более равномерному распределению плотности по объему брикета по сравнению с брикетированием в неподвижной матрице и к меньшему значению остаточной пористости в центре брикета. В результате увеличиваются как плотность, так и прочность брикетов.

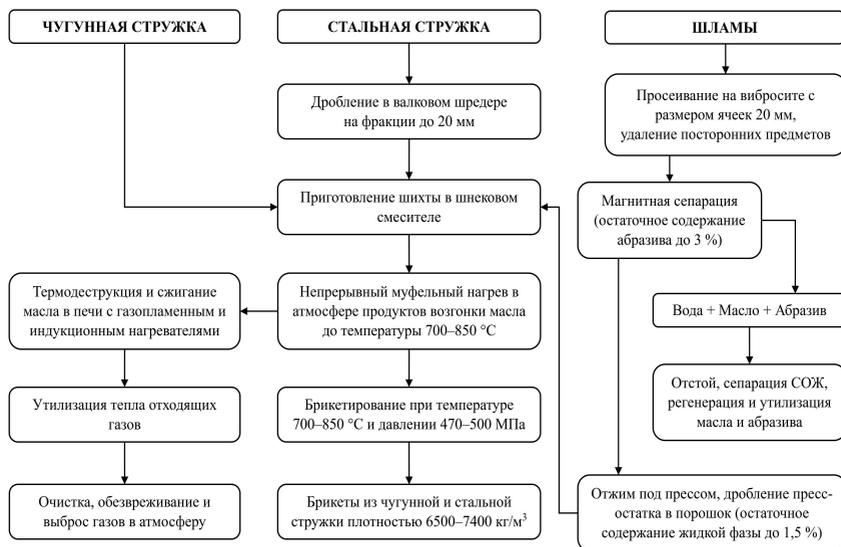
Силы бокового контактного трения в подвижной матрице при незначительном относительном сдвиге поверхностей трения ничтожно малы. В результате снижаются энергосиловые параметры процесса брикетирования и износ рабочих деталей пресс-формы. Установлено, что для черных металлов давление прессования в температурном диапазоне нагрева шихты 700–850 °С составляет 470–500 МПа, среднее значение относительной плотности брикетов достигает 90–95 %. Снижение давления и усилия прессования стружки пластичных низко- и среднеуглеродистых сталей доходит до 45 %; высокоуглеродистых мало пластичных и трудно деформируемых – до 35 %; чугунной стружки – до 25 %. По сравнению с холодным брикетированием удельная работа деформации снижается в 2,3–2,5 раза, по сравнению с брикетированием в неподвижной матрице – на 15–20 %.

Остаточная пористость в центре брикета равна 8,7–13,0 % при ее отклонении от среднего значения 3,0–3,7 %. Способность брикетов противостоять ударным нагрузкам в 1,5–1,7 раз выше, чем у горячепрессованных брикетов, полученных в пресс-

формах с неподвижной матрицей, и в 4,8 раза превышает нормы СТБ 2026-2010. Металлургические композиты при тех же условиях способны удерживать в себе до 20 % мелкофракционных наполнителей металлического или неметаллического происхождения.

**В пятой главе** дано описание и показаны преимущества технологии и оборудования горячего брикетирования отходов черных металлов в пресс-формах с подвижной матрицей. Технологическая схема горячего брикетирования представлена на рисунке 8. Технологический процесс включает сокращенное количество подготовительных операций. Отсутствует операция центрифугирования стружки. Масляная компонента СОЖ в стружке используется в полной мере для создания защитной атмосферы при нагреве стружки, формирования защитного углеродного покрытия на поверхности частиц металла. Высокая теплотворная способность масла обеспечивает значительную экономию природного газа.

Гидравлический пресс с автономным выталкивателем и собственной системой охлаждения обладает повышенной производительностью, работает с наименьшими потерями тепла брикетируемых материалов. К конструктивным особенностям пресса относятся наличие пресс-формы с подвижной матрицей, отсутствие трамбовок для подпрессовки стружки при загрузке в пресс-форму. Слой стружки в загрузочном бункере обладает достаточной плотностью для обеспечения стабильных размеров и массы брикетов.



**Рисунок 8 – Технологическая схема горячего брикетирования вторичных черных металлов**

Согласно технологической схеме стружка подвергается дроблению на фракции до 20 мм в валковом шредере. От размера металлических частиц зависят насыпная плотность шихты и в конечном итоге плотность, размеры и масса готового брикета. Для чугунной стружки, отсевов ферросплавов, отработанной стальной и чугунной дробы операция дробления не требуется. Приготовление шихты смешением компонентов производится в шнековом смесителе. Весовые соотношения различных компонентов устанавливаются, исходя из условий металлургического процесса плавки и заданного химического состава выплавляемого слитка. Стружка нагревается в проходной муфельной печи вертикального исполнения и брикетуется на гидравлическом прессе в пресс-форме с подвижной матрицей. Брикетирование стружки и стружко-порошковых смесей осуществляется при температуре 700–850 °С и давлении 470–500 МПа. Плотность чугунных брикетов достигает значений 6500–6800 кг/м<sup>3</sup>, стальных – 7000–7400 кг/м<sup>3</sup>. Горячепрессованные брикеты и металлургические композиты равноценны по своим свойствам габаритному кусковому лому, чушковому чугуну, литейно-шихтовым слиткам.

Практическая реализация результатов работы связана с внедрением технологии горячего брикетирования в ЗАО «СИПрСОП» и ОАО «МТЗ». По предварительным расчетам экономический эффект на ОАО «МТЗ» составит 670 тыс. дол. США в год. Экономический эффект достигается за счет сокращения количества операций и производственных единиц технологического оборудования (вместо шести прессов – две установки горячего брикетирования), сокращения расхода природного газа и электроэнергии, повышения производительности и КПД нагревательной печи, а также выхода годного металла.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. На основе разработанной физико-математической модели процесса брикетирования отходов черных металлов с различными структурно-реологическими свойствами в виде замкнутой системы уравнений, полученной методом совместного решения дифференциальных уравнений равновесия металлического пористого тела (прессовки) и условия пластичности с учетом условий нагружения в пресс-формах с подвижной матрицей (вид шихты, ее исходные структурно-реологические характеристики, начальная плотность, температура, трение и другие факторы) установлено, что для достижения требуемого значения плотности готовых брикетов 90–95 % (один из основных критериев качества современного металлургического производства, при котором брикеты полностью погружены в расплав, не всплывают на поверхность металлической ванны и не окисляются) давление прессования в температурном диапазоне нагрева шихты 700–850 °С должно быть доведено до уровня 470–500 МПа, энергетические затраты при этом составляют 157–199 кДж/кг [1–5; 7; 8; 10].

2. На основе разработанного экспериментально-аналитического метода определения структурно-реологических характеристик шихтовых материалов, брикетируемых в пресс-формах с подвижной матрицей (предел текучести  $\sigma_s$ , относительное сжатие  $\epsilon$  и показатель степени объемной деформации  $m$ ), составляющих основу численных расчетов феноменологической модели, согласно которому первые две характеристики определяются непосредственно из эксперимента при построении экспериментальной диаграммы прессования, а третья характеристика определяется и

корректируется путем последовательных приближений расчетных диаграмм прессы к экспериментальной с максимально возможной степенью ее конформного отображения установлены значения указанных характеристик: для пластичных низко- и среднеуглеродистых сталей –  $\sigma_s = 340\text{--}400$  МПа,  $\varepsilon = 0,5\text{--}0,8$ ,  $m = 2,5\text{--}3,5$ ; для углеродистых трудно деформируемых сталей –  $\sigma_s = 360\text{--}400$  МПа,  $\varepsilon = 0,3\text{--}0,5$ ,  $m = 2,0\text{--}2,5$ ; для мало пластичных чугунов –  $\sigma_s = 380\text{--}410$  МПа,  $\varepsilon = 0,3\text{--}0,5$ ,  $m = 1,15\text{--}1,5$ . Сравнительный анализ экспериментальных и теоретических данных с использованием установленных значений структурно-реологических характеристик исследованных материалов показал, что погрешность расчетов процесса горячего брикетирования отходов черных металлов не превышает 12 % [1–4; 8].

3. В результате теоретического и экспериментального исследования влияния величины и направления действия сил контактного трения на напряженно-деформированное состояние прессовки и сопротивление деформированию в условиях всестороннего неравномерного сжатия в пресс-формах с подвижной матрицей установлено, что силы контактного трения на боковой поверхности и у основания прессовки играют незначительную роль (практически отсутствуют) и таким образом процесс брикетирования в основном происходит под воздействием сил нормального давления и нормальных непрерывно возрастающих напряжений. Осевое и боковое давление прессования в конце процесса достигает величин 470–500 МПа и 170–300 МПа, соответственно, при непрерывно уменьшающемся соотношении между ними. Так, осевое давление при горячем брикетировании стружки из пластичной стали 45 в начале процесса в 27–32 раза больше бокового давления и всего лишь в 2–3 раза – по окончании процесса, у мало пластичной чугуновой стружки СЧ25 и ферросплава ФМн78 это соотношение изменяется в пределах 13–2 раза. Нивелирование влияния сил контактного трения на процесс горячего брикетирования применением пресс-форм с подвижной матрицей привело к снижению давления и усилия прессования на 25–45 % и практически свело к минимуму износ деталей пресс-формы. По сравнению с холодным брикетированием удельная работа деформации снизилась в 2,0–2,5 раза, по сравнению с брикетированием в неподвижной матрице – на 15–20 % [1–4; 8; 9; 11].

4. В результате теоретического и экспериментального исследования влияния напряженно-деформированного состояния прессовки на величину и распределение плотности по объему под воздействием распределенной поверхностной нагрузки со стороны прессующего пуансона и подвижной матрицы в направлении усилия прессования, установлено, что формирование фронта уплотнения прессовки при минимальном относительном сдвиге контактирующих с матрицей поверхностей приводит к увеличению плотности стальных брикетов на 3,0–3,2 %, чугуновых – на 7,6–8,8 % по сравнению с плотностью брикетов, полученных в пресс-формах с неподвижной матрицей. Остаточная пористость в центре брикетов уменьшилась на 19–24 % [1–4; 8; 9; 11].

5. В результате сравнительного анализа прочностных характеристик брикетов, полученных горячим брикетированием в пресс-формах с подвижной и неподвижной матрицами, установлено, что брикеты, полученные в пресс-формах с подвижной матрицей, не истираются и не разрушаются в процессе транспортировки и при сбрасывании с большой высоты вплоть до загрузки в плавильные агрегаты, способность противостоять ударным нагрузкам в 1,5–1,7 раз выше, чем у брикетов, полученных

в пресс-формах с неподвижной матрицей, и в 4,8 раз превышает нормы СТБ 2026-2010. Металлургические композиты полученные по разработанной технологии при тех же условиях способны удерживать в себе до 20 % мелкофракционных наполнителей металлического или неметаллического происхождения [1–4; 8, 9; 11].

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

Разработанная технология горячего брикетирования отходов черных металлов обеспечивает снижение энергосиловых параметров, износа инструмента, повышение качества брикетов. Согласно акту проведенных промышленных испытаний и плавков горячепрессованных брикетов на ОАО «МТЗ» технико-экономические показатели плавков сопоставимы с параметрами плавков габаритного кускового лома по штатной технологии на всех видах плавильных агрегатов.

В соответствии с техническим заданием БНТУ в ЗАО «СИПРСОП» создается опытная установка горячего брикетирования стальной и чугунной стружки. Предполагается переплав брикетов в индукционных печах с целью получения крупногабаритных отливок корпусных деталей. По результатам промышленных испытаний данной установки и технико-экономического обоснования предполагается создание участка горячего брикетирования стальной и чугунной стружки на ОАО «МТЗ» производительностью 12,5 тыс. т брикетов в год. Годовой экономический эффект от внедрения составит 670 тыс. дол. США при сроке окупаемости 2,5 года.

Технологический процесс горячего брикетирования отходов черных металлов в пресс-формах с подвижной матрицей рекомендуется к внедрению на предприятиях «Вторчермет», а также на машиностроительных, подшипниковых и металлургических заводах, перерабатывающих привозные и собственные отходы металлообработки. Техническая и экономическая целесообразность внедрения состоит в необходимости сокращения использования в составе шихты покупного чушкового чугуна и стального лома, решения экологической проблемы выбросов вредных дымовых газов, снижения себестоимости и повышения выхода годного литья. Возможность корректировки расплава введением в состав брикетов углеродосодержащих, шлакообразующих и легирующих элементов является чрезвычайно важным и практически необходимым достоинством новой технологии. Новизна разработанной технологии и устройств для ее осуществления подтверждена 3 заявками на изобретения Республики Беларусь [1–13].



## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

**Статьи в научных изданиях в соответствии с п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь**

1. Марукович, Е. И. Получение высококачественного металлургического сырья из отходов металлообрабатывающего производства / Е. И. Марукович, Ф. И. Пантелеенко, О. М. Дьяконов, А. А. Литвинко, В. Ю. Серeda // Металлургия машиностроения. – 2020. – № 2. – С. 31–39.

2. Литвинко, А. А. Технология горячего брикетирования отходов черных металлов в пресс-формах с подвижной матрицей / А. А. Литвинко // Наука и техника. – 2023. – Т. 22, № 5. – С. 367–375.

3. Дьяконов, О. М. Задача осесимметричного прессования дискретных металлических материалов / О. М. Дьяконов, А. А. Литвинко // Наука и техника. – 2024. – Т. 23, № 1. – С. 21–32.

**Статьи в других научных изданиях, включенных в перечень ВАК**

4. Дьяконов, О. М. Оценка качества горячепрессованных брикетов как вида шихтовых материалов / О. М. Дьяконов, А. А. Литвинко, В. Ю. Серeda // Литье и металлургия. – 2020. – № 3. – С. 48–55.

5. Дьяконов, О. М. Моделирование процесса нагрева стружко-порошковых дисперсий черных металлов в проходной муфельной печи горячего брикетирования. Сообщение 1 / О. М. Дьяконов, А. А. Литвинко, В. Ю. Серeda // Литье и металлургия. – 2022. – № 2. – С. 59–67.

6. Дьяконов, О. М. Моделирование процесса нагрева стружко-порошковых дисперсий черных металлов в проходной муфельной печи горячего брикетирования. Сообщение 2 / О. М. Дьяконов, А. А. Литвинко, В. Ю. Серeda // Литье и металлургия. – 2022. – № 3. – С. 70–82.

7. Дьяконов, О. М. Моделирование процесса нагрева стружко-порошковых дисперсий черных металлов в проходной муфельной печи горячего брикетирования. Сообщение 3 / О. М. Дьяконов, А. А. Литвинко, В. Ю. Серeda // Литье и металлургия. – 2023. – № 2. – С. 84–93.

**Материалы конференций, тезисы докладов**

8. Марукович, Е. И. Получение высококачественного металлургического сырья из отходов металлообрабатывающего производства / Е. И. Марукович, Ф. И. Пантелеенко, О. М. Дьяконов, А. А. Литвинко, В. Ю. Серeda // Труды 27-й международной научно-технической конференции «Литейное производство и металлургия 2019. Беларусь», г. Жлобин, 16–17 окт. 2019 г. – Минск : БНТУ, 2019. – С. 70–79.

9. Дьяконов, О. М. Совершенствование технологии рециклинга отходов черных металлов в процессах их подготовки к металлургическому переплаву / О. М. Дьяконов, А. А. Литвинко, В. Ю. Серeda // Труды 28-й международной технической конференции «Литейное производство и металлургия 2020. Беларусь», г. Минск, 25–27 нояб. 2020. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 45–52.

10. Litvinko, A. A. Production of briquettes and metallurgical composites from metal-working waste / A. A. Litvinko // Advanced High Entropy Materials : Abstracts of the IV

International Conference and School of Young Scientists, Chernogolovka, 26–30 sept. 2020. – Belgorod : ISMAN, 2022. – P. 78.

**Авторские свидетельства, патенты**

11. Пресс-форма для прессования металлических порошков и других сыпучих материалов : заявка № а20220266 / О. М. Дьяконов, А. А. Литвинко – Оpubл. 30.10.2023.

12. Способ нагрева металлической стружки и устройство для его осуществления в процессах горячего брикетирования : заявка № а20220268 / О. М. Дьяконов, А. А. Литвинко, В. Ю. Серeda. – Оpubл. 30.10.2023.

13. Пресс для горячего брикетирования металлической стружки и других отходов металлообработки : заявка № а20220267. / О. М. Дьяконов, А. А. Литвинко. – Оpubл. 30.10.2023.

## РЭЗІЮМЭ

Ліцвінка Арцём Анатольевіч

### Тэхналогія гарачага брыкетавання адходаў чорных металаў у прэс-формах з рухомай матрыцай

**Ключавыя словы:** адходы чорных металаў, металічная стружка, шламы, адсевы ферасплаваў, гарачае брыкетаванне, рухомая матрыца, металургічныя брыкеты

**Мэта працы:** распрацоўка тэхналогіі гарачага брыкетавання адходаў чорных металаў у прэс-формах з рухомай матрыцай.

**Метады даследавання і выкарыстаная апаратура:** метады паэтапнага дэфармавання, эксперыментальна-аналітычны метады вызначэння структурна-рэалагічных характарыстык шыхтавых матэрыялаў, вызначэнне порыстасці брыкетаў метадамі сякучых, вызначэнне кампанентнага і хімічнага складаў, рэнтгенаструктурны аналіз, аптычная і сканавальная электронная мікраскапія, камп'ютарнае мадэляванне.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** На падставе аналізу і навуковага абагульнення заканамернасцяў фарміравання структуры і ўласцівасцяў металургічных брыкетаў, вызначэння рэжымаў брыкетавання распрацавана новая тэхналогія гарачага брыкетавання адходаў чорных металаў у прэс-формах з рухомай матрыцай, якая забяспечвае зніжэнне энергасілавых параметраў працэсу, зносу інструмента, павышэнне якасці брыкетаў. Адрэзнай асаблівасцю новай тэхналогіі з'яўляецца зніжэнне сіл бакавога кантактнага трэння ва ўмовах ўсебаковага нераўнамернага сціску прасоўкі пад пераважным уздзеяннем сіл нармальнага ціску і нармальнага напружанняў, у выніку чаго дасягнута раўнамернае размеркаванне шчыльнасці па аб'ёме прасоўкі, якое забяспечвае высокую якасць гарачапрацаваных брыкетаў.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні.** Распрацаваны тэхналагічны працэс гарачага брыкетавання адходаў чорных металаў і ўстаноўка гарачага брыкетавання прызначаны для ўкаранення на прадпрыемствах «ДРУГЧОРМЕТ», а таксама на машынабудавальніцкіх, падшпіннікавых і металургічных заводах, якія перапрацоўваюць прывазныя і ўласныя адходы металапрацоўкі. Эканамічны эффект ад укаранення новай тэхналогіі на Мінскім трактарным заводзе будзе складаць каля 670 тыс. дол. ЗША ў год.

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

## РЕЗЮМЕ

Литвинко Артём Анатольевич

### Технология горячего брикетирования отходов черных металлов в пресс-формах с подвижной матрицей

**Ключевые слова:** отходы черных металлов, металлическая стружка, шламы, отсеvy ферросплавов, горячее брикетирование, подвижная матрица, металлургические брикеты

**Цель работы:** разработка технологии горячего брикетирования отходов черных металлов в пресс-формах с подвижной матрицей.

**Методы исследования и использованная аппаратура:** метод поэтапного деформирования, экспериментально-аналитический метод определения структурно-реологических характеристик шихтовых материалов, определение пористости брикетов методом секущих, определение компонентного и химического составов, рентгеноструктурный анализ, оптическая и сканирующая электронная микроскопия, компьютерное моделирование.

**Полученные результаты и их новизна.** На основании анализа и научного обобщения закономерностей формирования структуры и свойств металлургических брикетов, определения режимов брикетирования разработана новая технология горячего брикетирования отходов черных металлов в пресс-формах с подвижной матрицей, обеспечивающая снижение энергосиловых параметров процесса, износа инструмента, повышение качества брикетов. Отличительной особенностью новой технологии является снижение сил бокового контактного трения в условиях всестороннего неравномерного сжатия прессовки под преобладающим воздействием сил нормального давления и нормальных напряжений, в результате чего достигнуто равномерное распределение плотности по объему прессовки, обеспечивающее высокое качество горячепрессованных брикетов.

**Рекомендации по использованию.** Разработанный технологический процесс горячего брикетирования отходов черных металлов и установка горячего брикетирования предназначены к внедрению на предприятиях «ВТОРЧЕРМЕТ», а также на машиностроительных, подшипниковых и металлургических заводах, перерабатывающих привозные и собственные отходы металлообработки. Экономический эффект от внедрения новой технологии на Минском тракторном заводе составит порядка 670 тыс. дол. США в год.

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

## SUMMARY

**Litvinko Artyom Anatolievich**

### **Hot briquetting technology for ferrous metal waste in molds with a movable matrix**

**Key words:** ferrous metal waste, metal shavings, sludge, ferroalloy screenings, hot briquetting, movable matrix, metallurgical briquettes.

**The purpose of the research:** to develop the technology for hot briquetting of ferrous metal waste in molds with a movable matrix.

**Research methods and equipment used:** step-by-step deformation method, experimental-analytical method for determining the structural and rheological characteristics of charge materials, determination of briquette porosity using the secant method, determination of component and chemical compositions, X-ray diffraction analysis, optical and scanning electron microscopy, computer modeling.

**The results obtained and their novelty.** Based on the analysis and scientific generalization of the structure formation patterns and metallurgical briquette properties, optimization of briquetting modes, a new technology for hot briquetting of waste ferrous metals in molds with a movable matrix has been developed, ensuring a reduction in the energy-power parameters of the process, tool wear, and improved quality of the briquettes. A distinctive feature of the new technology is the reduction of lateral contact friction forces under conditions of all-round uneven compression of the compact under the predominant influence of normal pressure forces and normal stresses, resulting in a uniform density distribution throughout the volume of the compact, ensuring high quality hot-pressed briquettes.

**Recommendations for use.** The developed technological process for hot briquetting of ferrous metal waste and a hot briquetting installation are intended for implementation at the enterprises of «VTORCHERMET», as well as at machine-tool enterprises, bearing and metallurgical plants that process imported and own metalworking waste. The economic effect from the introduction of new technology at Minsk Tractor Plant will be about 670 thousand US dollars per year.

**The field of application:** mechanical engineering, foundry and metallurgical production.

Научное издание

**ЛИТВИНКО**  
**Артём Анатольевич**

**ТЕХНОЛОГИЯ ГОРЯЧЕГО БРИКЕТИРОВАНИЯ  
ОТХОДОВ ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ В ПРЕСС-ФОРМАХ  
С ПОДВИЖНОЙ МАТРИЦЕЙ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.02.09 – технологии и машины обработки давлением

Подписано в печать 14.10.2024. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Цифровая печать.  
Усл. печ. л. 1,34. Уч.-изд. л. 1,4. Тираж 60. Заказ 700.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.