

Оригинальная статья

УДК 669.162.142:622.788

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-2(48)-103-116

**АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ АГРЕГАТОВ,
ВХОДЯЩИХ В СОСТАВ ШИХТЫ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ БРИКЕТОВ**

© 2024 г. В. М. Павловец, К. И. Домнин

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Проведена оценка функционального назначения порообразующих добавок, обладающих различной удельной поверхностью и пористостью. Показана их роль в формировании структуры железосодержащих брикетов. Обоснована технологическая схема получения металлургических брикетов, содержащих технологические добавки. Схема включает механическую подготовку порообразующих добавок, дозирование и первичное избирательное смешивание компонентов с получением структурных агрегатов, вторичную стадию смешивания остальной брикетируемой массы со структурными агрегатами, их вылеживание. Представлена методики проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных. Приведены результаты исследования динамики прироста массы компонентов брикетируемой шихты в составе структурных агрегатов. Проанализированы зависимости прироста массы компонентов шихты от температуры жидкого восстановителя и технологической схемы смешивания компонентов. Проведена оценка конструкции структурных агрегатов, показана их роль в прогнозировании металлургических свойств железосодержащего сырья. Представлен анализ конструкции структурных шихтовых агрегатов на основе порообразующих добавок с различной удельной поверхностью и пористостью. Проведена оценка макро- и микроструктуры рассматриваемого материала, показана их роль в прогнозировании металлургических свойств железосодержащего сырья. Специфическая структура порообразующих добавок способна повысить функциональные возможности высокопористых материалов и создать структурные агрегаты с особыми свойствами. В процессе завершающего брикетирования эти агрегаты, обладающие первичной структурной прочностью, должны ее сохранить и сформировать прогнозируемую структуру брикета. Проанализированы дополнительные показатели, характеризующие массовые соотношения между компонентами структурных агрегатов. Приведены результаты исследования динамики прироста массы структурных агрегатов, сформированных на базовых шихтовых материалах различного фракционного состава.

Ключевые слова: структурные агрегаты, прирост массы, компоненты шихты, восстановитель, порообразующие добавки, железосодержащие брикеты, технология избирательного смешивания

Для цитирования: Павловец В.М., Домнин К.И. Анализ механизма формирования структурных агрегатов, входящих в состав шихты железосодержащих брикетов. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;2(48):103–116. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2\(48\)-103-116](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2(48)-103-116)

Original article

**ANALYSIS OF THE MECHANISM OF STRUCTURAL AGGREGATES FORMATION
INCLUDED IN THE COMPOSITION OF A CHARGE OF IRON CONTAINING
BRIQUETTES**

© 2024 V. M. Pavlovets, K. I. Domnin

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. The functional purpose of pore-forming additives with different specific surface areas and porosities has been evaluated. Their role in the formation of the structure of iron-containing briquettes is shown. The technological scheme for the production of metallurgical briquettes containing technological additives is substantiated. The scheme includes the mechanical preparation of pore-forming additives, dosing and primary selective mixing of components to obtain structural aggregates, the secondary stage of mixing the rest of the briquetted mass with structural aggregates, and their storage. The methods of conducting the experiment and processing the experimental data are presented. The results of the study of the dynamics of the mass gain of the components of the briquetted charge in the composition of structural aggregates are presented. The dependence of the weight gain of the charge components on the temperature of the liquid reducing agent and the technological scheme of mixing the components are analyzed. The design of structural units has been evaluated, and their role in predicting the metallurgical properties of iron-containing raw materials has been shown. An analysis of the design of structural charge aggregates based on pore-forming additives with different specific surface areas and porosities is presented. The assessment of the macro- and microstructure of the material under consideration is carried out, and their role in predicting the metallurgical properties of iron-containing raw materials is shown. The specific structure of pore-forming additives can enhance the functionality of highly porous materials and create structural aggregates with special properties. During the final briquetting process, these aggregates, which have primary structural strength, must preserve it and form a predictable briquette structure. Additional indicators characterizing the mass ratios between the components of structural aggregates are analyzed. The results of a study of the dynamics of mass gain of structural aggregates formed on base-charge materials of various fractional compositions are presented.

Keywords: structural units, weight gain, charge components, reducing agent, pore-forming additives, iron-containing briquettes, selective mixing technology

For citation: Pavlovets V.M., Domnin K.I. Analysis of the mechanism of structural aggregates formation included in the composition of a charge of iron containing briquettes. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;2(48):103–116. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2\(48\)-103-116](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2(48)-103-116)

Введение

В классической схеме получения смесей в различных областях техники после дозирования компонентов их тщательно перемешивают, добиваясь равномерного распределения компонентов по массе [1; 2]. При этом в силу различных требований и стандартов содержание некоторых компонентов ограничивают, хотя по другим регламентам массу указанных компонентов рекомендуют увеличивать. В частности, в железосодержащую шихту (концентраты, шламы, пыли, просыпи и добавки) для производства металлургических брикетов вводят определенное количество технологических компонентов, каждый из которых выполняет конкретные задачи [3 – 5]. Обязательным атрибутом брикетируемой массы являются связующие добавки. После смешивания с железосодержащими компонентами и другими добавками связующие частицы склеивают их между собой и создают стандартную прочность брикетируемой массы, необходимую для выдерживания динамических и статических нагрузок при транспортировке и восстановлении брикетов.

Для формирования брикетов с высокой реакционной структурой необходимо создать разветвленную сеть поровых каналов между поверхностью и центром прессовки [6 – 8]. Общие принципы построения реакционной структуры –

формирование регламентированной пористости на основе крупных и слабоизвилистых пор, порничаемых для технологических газов. Принудительное формирование указанной структуры в определенной степени способно создавать порообразующие добавки (ПД), которые одновременно могут выполнять функцию нетрадиционных восстановителей. В этом случае оправдано увеличение количества ПД в составе брикетов, но пропорционально этому падает прочность прессовок. Снижение прочности обусловлено слабыми адгезионными связями между порообразующими добавками и частицами железосодержащего материала. Компромиссных путей для решения проблемы несколько: снижать содержание ПД до минимума; использовать ПД, не уменьшающие прочность брикетов; применять адгезивы (пропиточные составы), усиливающие связи между разнородными материалами. Адгезивы широко применяют в некоторых отраслях промышленности для усиления связи между сыпучим наполнителем и упрочняющим каркасом [9; 10].

Для получения самовосстанавливающихся металлизированных брикетов и протекания первичного периода восстановления в шихту брикетов и других окускованных материалов вводят восстановители (углеводородные добавки, которые при слабоокислительном или восстанови-

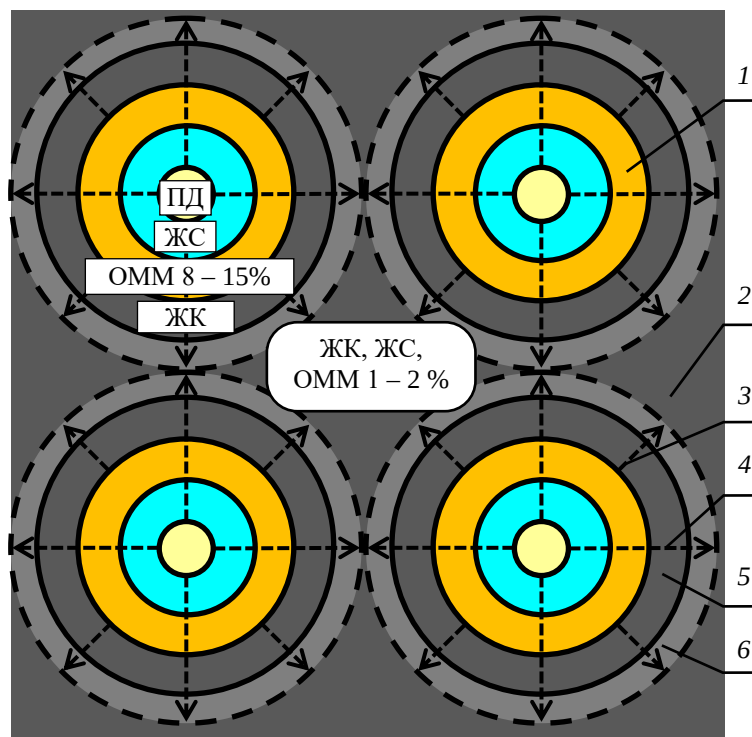


Рис. 1. Схема формирования активных зон в структуре брикетов:

1 – СА; 2 – окружающая шихта; 3 – поток восстановительных газов от ОММ; 4 – поток восстановительных газов от ПД; 5 и 6 – зона активного и ускоренного восстановления

Fig. 1. Scheme of active zones formation in the structure:

1 – structural aggregates; 2 – surrounding charge; 3 – flow of reducing gases from used mineral oil; 4 – flow of reducing gases from the pore-forming additives; 5 and 6 – zone of active and accelerated recovery

тельном обжиге железосодержащего сырья генерируют восстановительные газы) [11; 12]. Получение и использование самовосстанавливающихся металлургических брикетов из железо- и углеродсодержащих материалов широко изучается в мировой литературе [13 – 17]. Частицы восстановителя должны плотно контактировать с железосодержащими частицами, обеспечивая максимальную скорость восстановления оксидов железа. Содержание таких материалов достаточно велико и должно обеспечивать стехиометрию восстановления, а сами материалы должны обладать связующими свойствами. Последнее требование обеспечить практически невозможно. Это относится к нетрадиционному восстановителю (отработанному минеральному маслу (ОММ), являющемуся перспективным техногенным отходом и обладающему рядом технологических преимуществ в производстве окучкованного железосодержащего сырья) [3]. В некоторых типах окучкованного сырья в состав шихты дополнительно вводят флюсующие известняковые (ИД) и угольные (УД) добавки.

Наиболее оптимальным решением, учитывающим в максимальной степени вышеуказанные требования, является создание в структуре брикетов многочисленных активных зон, в которых содержится повышенное количество ПД и восстановителя, обеспечивая высокую реакцион-

ную способность и восстановимость окучкованного сырья (рис. 1). В работах [18 – 22] рассмотрены методы использования разнообразных отходов промышленного производства.

В процессе восстановления в этих зонах образуются высококонцентрированные восстановительные газы, которые под давлением диффундируют в окружающий массив шихты и насыщают его технологическими газами. На первом этапе восстановления в процессе металлизации железосодержащего концентрата (ЖК) участвуют восстановительные газы, сформированные ОММ (содержание ОММ примерно 15 %). На втором этапе восстановления работают восстановительные газы, сформированные ПД (до 10 %). Эти два потока высококонцентрированных восстановительных газов работают в зоне активного восстановления ЖК, содержание которого достигает 20 % от массы брикета. Активность процесса обусловлена высокой пористостью этого слоя ЖК (до 30 – 40 %). На последующем этапе восстановления эти газы под давлением диффундируют в окружающее пространство, где находится основная масса (до 80 %) ЖК и ОММ (до 1 – 2 %), располагающиеся в более прочном и плотном пространстве (пористость брикета 20 – 25 %). Эти активные зоны формируются с помощью структурных агрегатов (СА), входящих в состав шихты для производства металлургических брикетов [3 – 5].

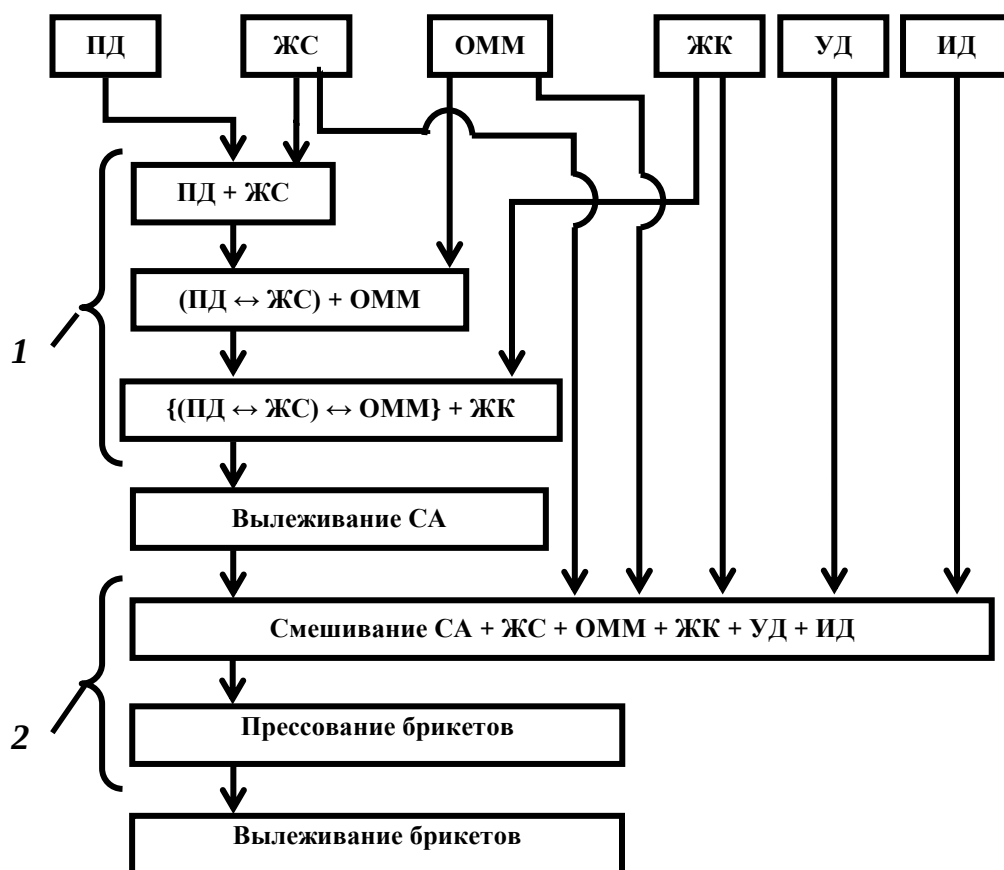


Рис. 2. Технологическая схема получения металлургических брикетов:

1 – первичная стадия избирательного смешивания компонентов шихты с получением СА;

2 – вторичная стадия смешивания компонентов брикетируемой массы

Fig. 2. Technological scheme for producing metallurgical briquettes:

1 – primary stage of selective mixing of charge components to produce structural aggregates;

2 – subsidiary stage of mixing the components of the briquetted mass

Ранее была обоснована конструкция структурных агрегатов (СА) на основе ПД, на поверхности которых сформирована оболочка из основных шихтовых материалов (ЖС, ОММ и ЖК) [5]. В этой конструкции порообразующие добавки являются структурной матрицей для формирования СА. Последовательность формирования оболочки на поверхности ПД позволяет в максимальной степени интегрировать структурный агрегат в основной состав брикетируемой массы на заключительной стадии технологии прессования. Структурный агрегат – это искусственно созданная и затвердевшая капсула из шихтовых материалов, генерирующая при нагреве высококонцентрированную восстановительную среду в ограниченном объеме брикета. В этой капсуле взаимодействие между ПД и окружающим ЖК значительно усилено, а физические свойства ее поверхности близки свойствам окружающего материала. Конструкция СА признана объектом интеллектуальной собственности в технологии подготовки сырья к металлургической плавке [5].

Технологическая схема получения металлургических брикетов (рис. 2) включает механиче-

скую подготовку ПД, дозирование и первичное избирательное смешивание компонентов с получением СА, вторичную стадию смешивания остальной брикетируемой массы с СА, вылеживание СА и готовых брикетов.

Техника брикетирования железосодержащих материалов во многом близка технологии прессования тонкодисперсного керамического сырья в различных отраслях промышленности, где разработаны известные относительно малочисленные режимы для смешивания прессуемой массы [6]. В некоторых технологиях указывается, что режим смешивания компонентов существенно влияет на физические свойства армированных прессовок, особенно, если они подвергаются термической обработке [9; 10]. Наличие нескольких видов технологических добавок различного агрегатного состояния позволяет отказаться от традиционного процесса смешивания, при котором все добавки смешиваются одновременно, и организовать последовательное смешивание компонентов с получением шихтовых структурных агрегатов на основе ПД, из которых формируется прочная структура брикета.

Целью настоящей работы является исследование влияния типа порообразующих добавок, обладающих разной удельной поверхностью и пористостью, на динамику прироста массы шихтовых структурных агрегатов в процессе последовательного смешивания компонентов шихтовой массы при производстве железосодержащих металлургических брикетов.

Методы и принципы исследования

Компонентами шихты для получения СА были ПД, ОММ и ЖК, УД и ИД. На первом этапе работы было подобрано семь типов порообразующих добавок по их принадлежности к производственным и эксплуатационным отходам, которые отличались общей пористостью, рельефом поверхности, удельной поверхностью и некоторыми другими физическими характеристиками. Удельную (габаритную) поверхность $S_{\text{пд}}$, $\text{м}^2/\text{кг}$, порообразующих добавок рассчитывали по выражению

$$S_{\text{пд}} = K(F/M),$$

где M – масса ПД, кг; K – поправочный коэффициент; F – площадь поверхности ПД, м^2 .

При расчете F учитывали микрорельеф поверхности некоторых ПД, обладающих повышенной волнистостью и шероховатостью. Поэтому расчетное значение F для них увеличивалось поправочным коэффициентом K . Для трубчатых частиц растительного происхождения приняли $K = 1,1$; для швейной текстильной нити $K = 1,2$; для пенькового льняного жгута $K = 1,4$. В расчетах условно принимали, что ПД имели правильную цилиндрическую форму или ленточную структуру с сечением в форме прямоугольника, основные геометрические размеры, для которых определяли с помощью микрометра и стереоскопического микроскопа Микромед МС-5-ZOOM LED в Центр «Геоэкология» Сибирского государственного индустриального университета (СибГИУ). Некоторые физические характеристики и расчетные данные ПД представлены в табл. 1.

Для брикетирования использовали железорудный концентрат (ЖК) Тейского месторождения ($\text{Fe}_{\text{общ}} = 3,4\%$; средний размер частиц $d_{\text{ч}} = 0,068$ мм). В качестве упрочняющей связки применяли 50 %-ый раствор жидкого стекла (ЖС), обеспечивающий необходимую схватываемость массы в процессе технологических операций [3; 4]. Восстановителем являлось отработанное моторное масло ДВС, которое подогревали до температуры 20, 50 и 90 °С в лабораторной электропечи. Режим последовательного смешивания был следующим: ПД – ЖС – ОММ – ЖК (УД, ИД) (рис. 2). Его эффективность была обоснована в работах [3 – 5]. Фрагментированные частицы ПД были основой для формирова-

ния шихтовых структурных агрегатов. Для удобства экспериментов и процесса смешивания ПД были нарезаны на фрагменты длиной от 4 – 6 до 8 – 10 мм. Толщина и диаметр ПД были существенно меньше (0,5 – 2,5 мм). В начале экспериментов ПД взвешивали на электронных весах типа VIBRA HT (Shinko Denshi НТР-220СЕ), обеспечивающих точность до 0,0001 г. Затем их помещали в раствор жидкого стекла и перемешивали. На поверхности ПД формировался слой нового материала и его с этим слоем повторно взвешивали. После взвешивания ПД с первым материалом помещали в ОММ и перемешивали, формируя на ПД второй слой, далее взвешивали. На заключительном этапе ПД со слоем технологических жидкостей смешивали с железорудным концентратом. В конце экспериментов были сформированы СА, в центре которых располагались порообразующие добавки, на поверхности которых была сформирована оболочка, состоящая из трех слоев шихтовых материалов, наложенных друг на друга в заданной последовательности. Порядок обработки и представления результатов экспериментов подробно описан в работах [3; 4]. После вылеживания и затвердевания СА визуально оценивали их макроструктуру и анализировали микроструктуру СА на стереоскопическом микроскопе Микромед МС-5-ZOOM LED в Центр «Геоэкология» СибГИУ. Массу $\Theta_{\text{м}}$ СА и относительный прирост массы $\Delta\Theta_{\text{м}}$ компонентов СА рассчитывали по выражениям, приведенным в работах [3; 4].

На основе результатов экспериментов были рассчитаны показатели C_1 , C_2 , C_3 , характеризующие массовые соотношения между компонентами СА, построенные на различных ПД:

$$C_1 = M_{\text{ЖК}}/M_{\text{ОММ}};$$

$$C_2 = M_{\text{ЖК}}/M_{\text{ЖС}};$$

$$C_3 = M_{\text{ЖС}}/M_{\text{ОММ}},$$

где $M_{\text{ЖК}}$, $M_{\text{ОММ}}$, $M_{\text{ЖС}}$ – массы ЖК, ОММ, ЖС, находящиеся в составе структурных агрегатов, кг.

Также было рассчитано массовое содержание шихтовых компонентов в составе СА.

Основные результаты

Внешний вид ПД и затвердевших СА показан на рис. 3. Результаты экспериментов представлены в табл. 1 – 3 и на рис. 4, 5.

Динамика прироста относительной массы $\Delta\Theta_{\text{м}}$ компонентов СА для всех ПД приведена на рис. 4.

Значения C_1 , C_2 , C_3 представлены в табл. 2. Массовое содержание шихтовых компонентов в составе СА приведено в табл. 3.

Обсуждение

Результаты экспериментов (рис. 4) показывают, что вид ПД и их поверхностные свойства существенно

Физические характеристики поробразующих добавок, формирующих структурные агрегаты в шихте брикетируемой массы
Table 1. Physical characteristics of pore-forming additives that form structural aggregates in the charge of the briquetted mass

№	Порообразующая добавка	Физические параметры поробразующих добавок					
		Геометрические размеры частиц ПД, мм	Исходная масса ПД, г	Удельная поверхность, м ² /кг	Общая пористость, %	Температуры размягчения/воспламенения, °С	Содержание углерода/водорода, %
1	Пластиковая упаковочная лента	(8 ÷ 10)×(2,0 ÷ 2,5) ×(0,5 ÷ 1,0)	0,0100 – 0,0105	7,21	1 – 5	(95 – 117)/(350 – 450)	(90 – 95)/–
2	Швейная текстильная нить	(8 ÷ 10)×(0,5 ÷ 0,6)	0,0050 – 0,0055	9,91	5 – 10	–/(170 – 210)	(95 – 99)/–
3	Древесные игольчатые частицы	(8 ÷ 10)×(1,5 ÷ 2,0)	0,0110 – 0,0115	19,74	20 – 40	–/(300 – 330)	(45 – 55)/(5 – 6)
4	Трубчатые частицы растительного происхождения	(8 ÷ 10)×(2,0 ÷ 2,5)	0,0120 – 0,0145	37,23	25 – 50	–/(200 – 250)	(40 – 52)/(6 – 7)
5	Пеньковый льняной жгут	(8 ÷ 10)×(1,5 ÷ 2,0)	0,0105 – 0,0130	40,29	30 – 60	–/(230 – 250)	(95 – 99)/–
6	Синтетическая нить	(8 ÷ 10)×(0,5 ÷ 0,6)	0,0020 – 0,0025	53,32	35 – 65	(95 – 117)/(350 – 650)	(90 – 95)/–
7	Упаковочный поролон	(4 ÷ 6)×(1,5 ÷ 2,0)	0,0020 – 0,0025	75,54	80 – 90	(100 – 150)/(250 – 255)	(90 – 95)/–

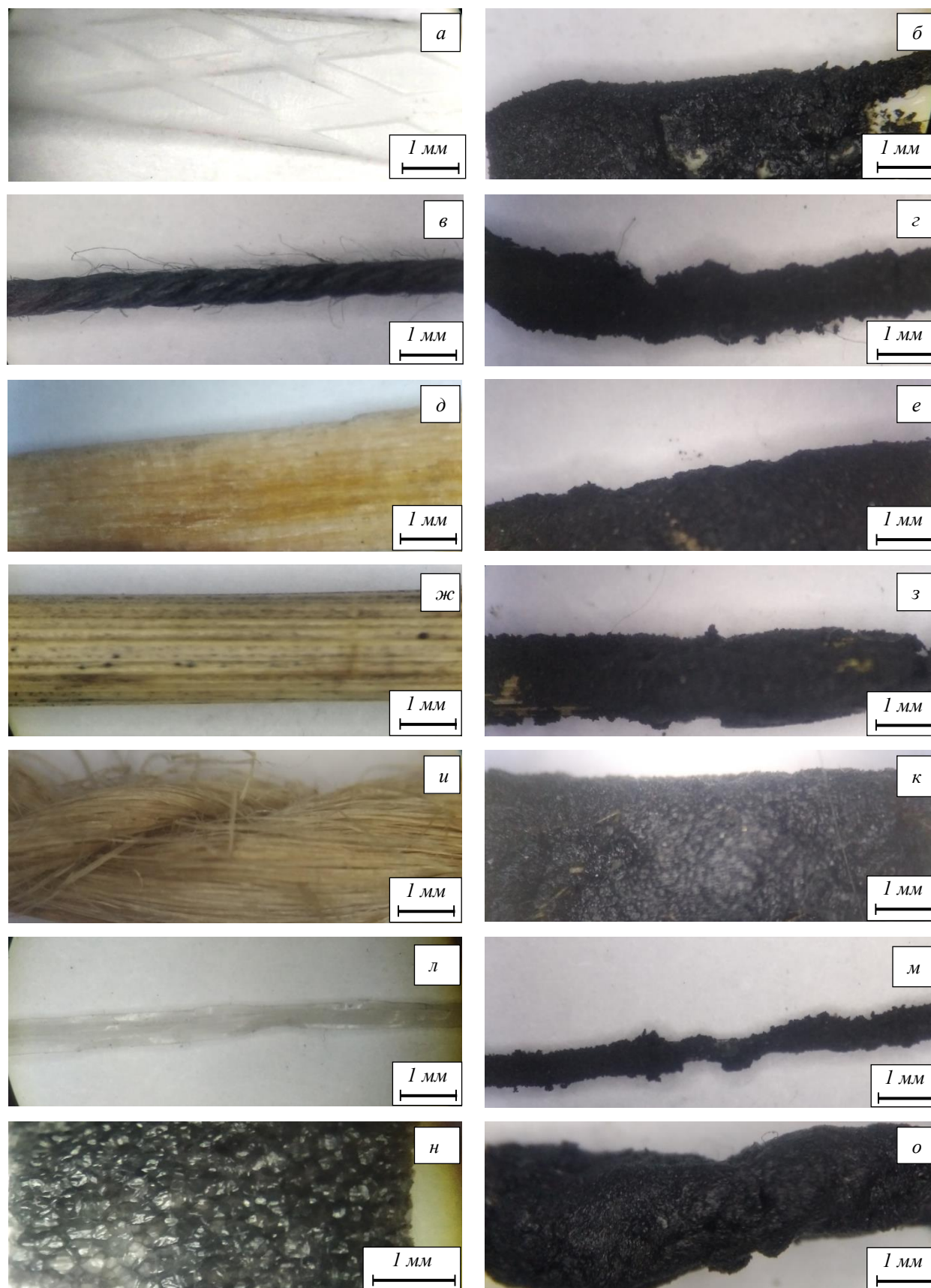


Рис. 3. Внешний вид ПА (а, в, д, ж, и, л, н) и СА (б, г, е, з, к, м, о)
 Fig. 3. Appearance of pore-forming additives (а, в, д, ж, и, л, н) and structural aggregates (б, г, е, з, к, м, о)

Значения C_1 , C_2 , C_3
Table 2. Values of indicators C_1 , C_2 , C_3

Показатель СА	Значение показателя при температуре $t_{\text{ОММ}}$ 20/50/90 °С для ПД (номером из табл. 1)						
	1	2	3	4	5	6	7
C_1	11,97 / 13,16 / 14,72	4,96 / 3,81 / 6,24	7,26 / 3,68 / 7,91	6,89 / 7,12 / 9,81	13,38 / 12,76 / 6,30	6,04 / 2,99 / 5,38	8,68 / 6,50 / 7,71
C_2	1,80 / 3,05 / 2,34	2,21 / 1,63 / 2,27	2,45 / 2,76 / 1,72	2,78 / 2,87 / 2,93	1,57 / 2,02 / 1,61	2,14 / 2,32 / 3,02	1,65 / 1,75 / 1,69
C_3	2,17 / 4,39 / 4,53	2,25 / 2,34 / 2,76	2,97 / 1,33 / 4,59	2,48 / 2,48 / 3,35	8,53 / 6,33 / 3,90	2,83 / 1,29 / 1,78	5,26 / 3,72 / 4,57

влияют на прирост массы шихтовых компонентов СА и его массу. В расчетах (рис. 2) значение Θ_m для ПД составляло 100 %. Наиболее массивные СА формируются на частицах, вырезанных из упаковочного поролон (ПД 7, $t_{\text{ОММ}} = 20$ °С, $\Theta_m = 8151$ %). Затем в этом сравнительном ряду идут синтетическая нить (ПД 6, $\Theta_m = 3174$ %) и пеньковый жгут (ПД 5, $\Theta_m = 3174$ %). Остальные ПД формируют СА существенно меньшей массы (Θ_m менее 1000 %). По величине $\Delta\Theta_m$ максимальный прирост массы дает ЖК (свыше 5000 % для ПД 7), затем ЖС (около 3000 % для ПД 7), минимальный прирост массы наблюдается у ОММ (менее 1000 % для ПД 7). Относительная масса СА после избирательного смешивания компонентов способна возрасти от 100 до 5453 % (ПД 7 при $t_{\text{ОММ}} = 90$ °С), то есть более чем в 50 раз (рис. 4). Увеличение температуры ОММ позволяет повысить прирост массы на 10 – 15 % (рис. 4). Объяснить указанную закономерность можно тер-

мическим активированием раскрытия пор ПД и более эффективным наполнением пустот ПД менее вязким ОММ.

Специфическая структура ПД способна повысить функциональные возможности высокопористых материалов на пути создания структурных агрегатов с особыми свойствами. В процессе завершающего брикетирования эти агрегаты, обладающие первичной структурной прочностью, должны ее сохранить и сформировать прогнозируемую структуру брикета.

Содержание ОММ в составе СА имеет некоторое пороговое значение, обусловленное силами вязкости и поверхностного натяжения ЖС. Поэтому избыток ОММ способен стечь с поверхности ЖС, если не принять дополнительных действий (принудительное смешивание смеси в ограниченном объеме, использование температурного и вре-

Массовое содержание шихтовых компонентов в составе СА
Table 3. Mass content of charge components in the structural aggregates composition

№	Массовое содержание шихтовых компонентов в составе СА, %, при температуре $t_{\text{ОММ}}$ 20/50/90 °С для материалов			
	ПД	ЖС	ОММ	ЖК
1	9,7 / 10,0 / 10,4	31,3 / 21,3 / 26,6	2,6 / 4,9 / 7,6	56,5 / 63,9 / 62,3
2	8,7 / 7,1 / 6,9	25,0 / 30,4 / 25,6	11,1 / 11,2 / 9,3	55,2 / 51,6 / 58,1
3	9,1 / 8,9 / 8,8	24,1 / 20,2 / 29,0	8,1 / 10,1 / 6,3	58,8 / 60,7 / 49,9
4	8,2 / 7,2 / 8,7	22,2 / 21,7 / 21,6	8,9 / 8,8 / 6,4	61,1 / 62,3 / 63,3
5	4,5 / 4,4 / 4,3	35,6 / 30,1 / 33,3	4,2 / 4,8 / 8,5	55,8 / 60,7 / 53,8
6	3,1 / 2,5 / 2,0	27,8 / 23,8 / 21,4	9,8 / 12,5 / 12,0	59,3 / 61,2 / 64,6
7	1,2 / 1,1 / 1,1	34,8 / 32,8 / 34,0	6,6 / 8,8 / 7,4	57,4 / 57,3 / 57,4

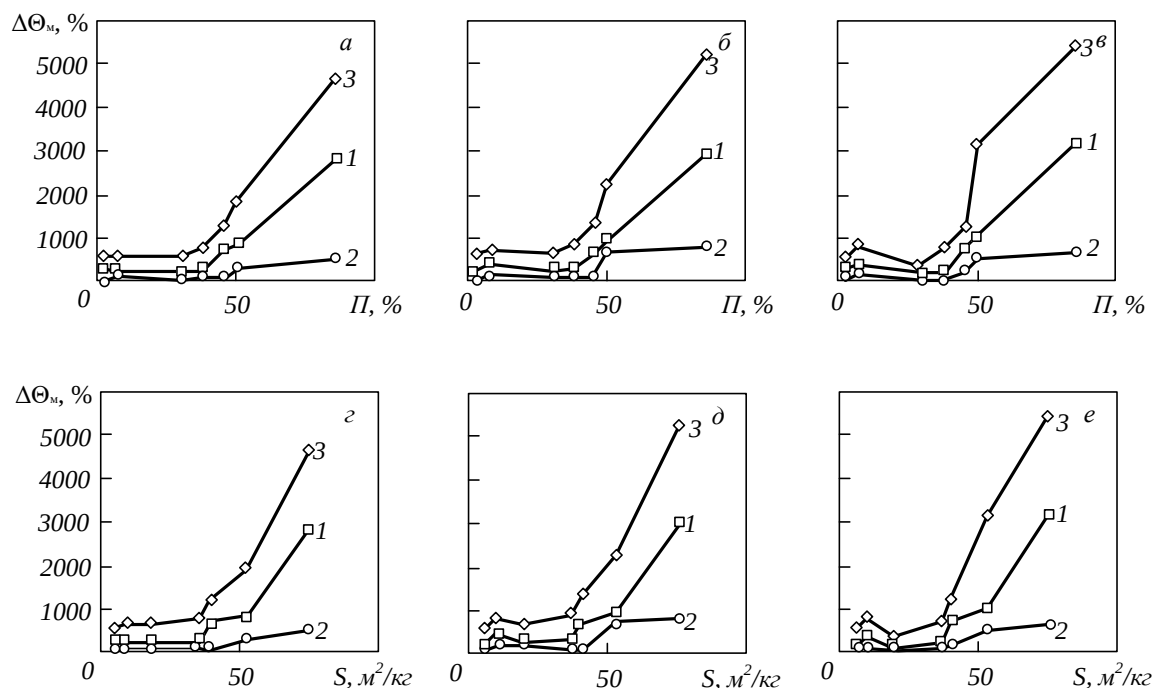


Рис. 4. Зависимость прироста массы ЖС (1), ОММ (2), ЖК (3) от пористости и удельной поверхности порообразующих добавок при температуре t_{OMM} 20 (а, г), 50 (б, д) и 90 °С (в, е)

Fig. 4. Dependence of the weight gain of sodium silicate (1), used mineral oil (2), iron concentrate (3) on the porosity and specific surface area of pore-forming additives t_{OMM} 20 (a, g), 50 (b, d) and 90 °C (v, e)

менного факторов). Следует отметить, что чем выше содержание связки на поверхности ПД, тем выше прирост массы ОММ. После смешивания всех ПД, смоченных ЖС, ОММ довольно прочно удерживается в структуре СА, хотя его массовое содержание ниже, чем содержание ЖС (оптимальное соотношение ЖС и ОММ) [3; 4]. Оно предполагает более высокое (на 30 – 50 %) содержание ЖС в смеси с ОММ, которое позволяет обеспечить устойчивое затвердевание вязкой массы, содержащей более 50 % ЖК. Это условие в первом приближении позволяют обеспечить ПД 5 – 7. Что касается остальных ПД, то для реализации этого со-

отношения, следует предварительно готовить смесь заданного состава на основе ЖС и ОММ или сменить последовательность смешивания компонентов. Особенностью СА, сформированных на всех ПД, и особенно гибких, является необходимость их упрочнения, которое требуется для того, чтобы при вторичном смешивании оболочка СА не отслоилась, а сам СА не разрушился. Поэтому, наряду с металлургическими свойствами СА, следует учитывать фактор прочности СА и отдавать предпочтение ПД с прочной малодеформируемой структурой.

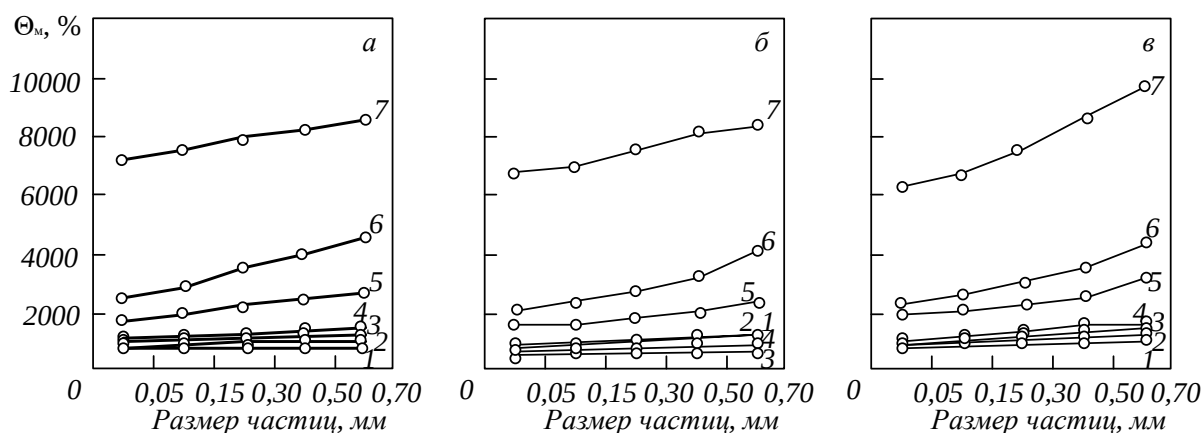


Рис. 5. Зависимость относительной массы СА от размера частиц железорудного концентрата (а), угольной (б) и известковой (в) добавок и от типа ПД при температуре $t_{OMM} = 20$ °С (цифры у кривых соответствуют нумерации в табл. 1.)

Fig. 5. Dependence of the relative mass of structural aggregates on the particle size of iron ore concentrate (a), coal (b) and lime additive (v) and on the type of pore-forming additives $t_{OMM} = 20$ °C (the numbers on the curves correspond to the numbering in Table 1.)

Предметом анализа были прочностные характеристики, гибкость, ломкость и макроструктура СА (рис. 3). Прочность (G , МПа) определяли как частное от деления статической нагрузки (P , Н) на опорную площадь (S , m^2) структурного агрегата. Эти показатели необходимо учитывать, поскольку подобные нагрузки могут возникнуть в процессе вторичного смешивания и прессования брикетированной массы. Численное значение гибкости и ломкости СА было затруднено в силу оригинальности исследований. После суточного вылеживания СА (при температуре 25 °С) было установлено, что оболочка достаточно прочно удерживается на поверхности всех ПД, а жесткость и прочность всей конструкции СА существенно увеличивается. При этом для некоторых СА выявлено незначительное количество отслоившихся частиц (менее 5 – 8 %), которые освобождают поверхность ПД от налипшего материала и облегчают анализ макроструктуры. После вылеживания и упрочнения СА значения G находятся в достаточно узком интервале (1,2 – 2,8 МПа). Уровень прочности СА можно считать сравнительно высоким, поскольку СА были сформованы без приложения внешней нагрузки. Для ПД 1 (упаковочная лента) (рис. 3, б) отслоившегося материала в процессе вылеживания не зафиксировано, но ввиду низкой пористости ПД 1 поглощения ОММ оболочкой не произошло. Поэтому часть жидкости вытекла из структуры СА. При подобном обсуждении результатов предполагали, что ЖС в процессе вылеживания затвердевает, а вытекает только ОММ. Для этой ПД характерна собственная высокая прочность (более 50 МПа на разрыв), но оболочка СА закреплена с меньшей прочностью ($G = 1,2$ МПа). Швейная текстильная нить (ПД 2) в большей степени поглощает ЖС и ОММ, ее структура обеспечивает минимальное вытекание жидкостей. Оболочка СА закреплена на ПД с большей прочностью ($G = 1,7$ МПа). При изгибе СА оболочка не разрушается, но по длине конструкции она ломается в узких перешейках на несколько фрагментов (рис. 3, з). Древесные частицы (ПД 3) обладают собственной прочностью (5 МПа на сжатие поперек волокон) и отсутствием деформации. Прочность оболочки СА соизмерима ($G = 1,5$ МПа) с прочностью ПД 3. Оболочка СА равномерно покрывает поверхность ПД и прочно удерживается микродефектами поверхности. При изломе СА на два фрагмента длиной 5 – 6 мм шихтовая оболочка не отслаивается от основы (рис. 3, е). Растительные частицы (ПД 4) обладают менее высокой собственной прочностью, но при изломе СА часть ОММ вытекает из трубчатого пространства ПД наружу (рис. 3, з). Прочность СА сравнительно высока ($G = 1,3$ МПа), но трубчатая структура ПД при указанной нагрузке деформируется. Пенниковый льняной жгут (ПД 5) после вылеживания показывает луч-

шие результаты: он существенно упрочняется технологическими жидкостями и почти полностью теряет гибкость, а СА приобретает повышенную жесткость (рис. 3, к). На этой ПД массивная оболочка прочно удерживается волосками и нитями, а ОММ полностью поглощается высокопористой структурой жгута. Прочность СА достаточно высокая ($G = 2,1$ МПа) и, благодаря волосовитой структуре ПД 5, при указанной нагрузке он деформируется с минимальным (до 5 – 10 %) отслоением оболочки. Хорошие результаты показывает синтетическая нить (ПД 6): она не теряет гибкость и прочно удерживает массивную оболочку микроволосками и нитями на своей поверхности. Из структурного агрегата этого типа ОММ вытекает в минимальной степени (рис. 3, м). Прочность СА в ряду исследованных ПД наиболее высока ($G = 2,8$ МПа) и структура ПД 6 при указанной нагрузке деформируется в минимальной степени с небольшим (до 5 – 8 %) отслоением оболочки. Структурный агрегат на основе упаковочного поролон (ПД 7) после вылеживания приобретает повышенную жесткость и твердость (рис. 3, о). Установлено, что технологические жидкости полностью поглощаются высокопористой структурой поролон и масса быстро затвердевает при взаимодействии с ЖС, поскольку соотношение масс ЖС и ОММ превышает 1,2 – 1,5. Прочность СА в ряду исследованных ПД одна из самых низких ($G = 1,3$ МПа), поскольку эластичная структура ПД 7 при указанной нагрузке начинает деформироваться с потерей массы оболочки до 20 – 30 %, что является недостатком рассматриваемого типа эластичной добавки.

Результаты экспериментов и расчетов (табл. 3) показывают, что показатели C_1 , C_2 , C_3 существенно отличаются друг от друга (C_1 имеет максимальное значение, а показатель C_2 имеет минимальную величину). При этом самым стабильным показателем является C_2 . Он меняется в пределах 1,57 – 2,45. Показатель C_3 отличается стабильностью ($C_3 = 2,25 - 8,53$) и входит в область соотношения, обеспечивающего ускоренное твердение массы ($C_3 \geq 1,2 - 1,5$). Показатель C_1 более изменчивый ($C_1 = 4,96 - 21,97$) и позволяет подобрать ПД, обеспечивающую оптимальное соотношение ЖК в составе СА. Несмотря на то, что абсолютные массовые характеристики СА существенно отличаются друг от друга на различных ПД [6; 8], показатели C_1 , C_2 , C_3 характеризуются относительной стабильностью.

Указанные выводы во многом повторяют данные табл. 4. Они показывают, что содержание ПД в составе СА может достигать 10,4 %. При том, что в обычной технологии брикетирования содержание, например, древесных ПД не может превышать 0,5 – 1,5 % [2 – 4]. Содержание ЖС также повышено до 20 – 30 % и превышает содержание связки по обычной технологии (8 – 10 %). Содержание ОММ

в шихте обычной технологии брикетирования специалисты рекомендуют не превышать 6 – 8 % [5]. Некоторые ПД (2, 4, 6) позволяют превысить это значение (8,9 – 12,5 %), но часть ПД удерживают в своей структуре менее 8 % ОММ, что требует режима корректировки технологии. Содержание ЖК практически стабильное и находится в относительно узких пределах (55,8 – 63,9 %).

Одним из факторов влияния на массовые характеристики СА могут быть размеры частиц основных шихтовых материалов (ЖК, УД и ИД). Влияние размеров частиц шихтовых материалов в зависимости от типа ПД на массу СА проявляется неоднозначно (рис. 5).

Для некоторых ПД (1 – 4) значение Θ_m практически не зависит от размеров частиц. Для других ПД (5 – 7) зафиксировано повышение массы СА с ростом размеров частиц примерно на 10 – 15 %. Во всех случаях играет роль не только масса слоя ОММ, но и толщина этого слоя, с ростом которой поглощательная способность жидкости увеличивается. У порообразующих добавок с сильно развитой поверхностью и пористостью (ПД 5 – 7) толщина слоя ОММ соизмерима с размерами крупных частиц шихтовых материалов. Поэтому им легче внедриться в слой ОММ на большую глубину и удержаться на поверхности этих добавок, формируя повышенную массу СА. Если слой ОММ на микрочастицах ПД имеет небольшую толщину, то частицы шихтовых материалов труднее поглощаются тонким слоем ОММ и легко осыпаются при перемешивании компонентов. Максимальная масса СА зафиксирована при использовании ПД 7 (поролон) и известковых добавок. Минимальное значение Θ_m (меньше на 5 – 8 % от максимального) зафиксировано с применением угольной мелочи. Это объясняется пониженной адгезией ОММ к углеродсодержащей поверхности и отсутствием развитого микрорельефа поверхности угольных частиц.

Выводы

В процессе экспериментов установили принципиальную возможность получения прочных шихтовых структурных агрегатов из сложной компонентной базы, являющейся минеральной основой для брикетирования железосодержащих материалов. Получены экспериментальные данные по изменению относительной массы структурных агрегатов и массы компонентов бригетируемой шихты на ПД в зависимости от размеров частиц шихтовых материалов. Установлены закономерности формирования макро- и микро-структуры агрегатов в зависимости от режима избирательного смешивания. Поровая структура бригетируемой массы на основе шихтовых структурных агрегатов, полученных по технологии избирательного смешивания, позволяет про-

гнозировать повышение скорости восстановления железосодержащего сырья. Результаты исследований позволяют выбрать рациональный тип ПД и оптимальную конструкцию СА с учетом прогнозируемых металлургических свойств брикетов и факторов технологии, которые могут возникнуть в процессе смешивания и прессования бригетируемой массы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павловец В.М. *Развитие техники и технологии окомкования железорудного сырья в металлургии*. Москва: Вологда: Инфра-Инженерия. 2022:336. EDN: EBYWIW.
2. Павловец В.М. *Окатыши в технологии экстракции металлов из руд*. Москва: Вологда: Инфра-Инженерия. 2022:284.
3. Павловец В.М., Домнин К.И. Исследование процесса брикетирования железорудных материалов, содержащих в качестве нетрадиционного восстановителя отработанное минеральное масло. В кн.: *Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Сборник трудов Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием*. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2022:225–231. EDN:PPJNAD.
4. Павловец В.М., Домнин К.И. Использование техногенных отходов производства в технологии брикетирования железосодержащих материалов. В кн.: *Металлургия: технологии, инновации, качество. Сборник трудов XXII Международной научно-практической конференции*. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2021:159–183. EDN:QEFUWP.
5. Пат. 2814587 РФ. Способ получения железосодержащих брикетов / В.М. Павловец, К.И. Домнин; заявл. 22.03.2023, опубл. 01.03.2024, Бюл. № 7.
6. Ожогин В.В. *Основы теории и технологии брикетирования измельченного металлургического сырья*. Мариуполь: ПГТУ, 2010:442. EDN:QNAFUP.
7. Сараатанбазар Б., Ли Г.-Х. Влияние модифицированной гуминовой кислоты (МНА) как связующей добавки на обжиг брикетированного монгольского железорудного концентрата «Tumurtei». *Известия вузов. Черная металлургия*. 2020;63(6):419–427. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-6-419-427>
8. Курунов И. Ф., Бижанов А. М. Брэксы – новый этап в окусковании сырья для доменных печей. *Металлург*. 2014;3:49–53. EDN SAXQUR.

9. Касперович А.В., Шашок Ж.С., Каюшников С.Н. *Основные процессы шинного производства*. Минск: БГТУ. 2013:115. EDN:VADNUJ.
10. Мырхалыков Ж.У., Тюребекова Г.З., Сагитова Г.Ф., Сакибаева С.А. Возможности повышения адгезии резины к текстильному корду из искусственных волокон. *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2015;355(1):49–53.
11. Аникин А.Е., Галевский Г.В., Руднева В.В. Исследование технологических режимов эффективной металлизации оксиджелезосодержащих отходов металлургического производства. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2020;63(5):335–343.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-335-343>
12. Бут Е.А., Павлов А.В. Изучение твердожидкофазного карботермического восстановления никеля из рудодоугольных брикетов. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2018;61(2):120–127.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-2-120-127>
13. Mombelli D., Gonçalves D. L., Mapelli C., Barella S., Gruttadauria, A. Processing and Characterization of Self-Reducing Briquettes Made of Jarosite and Blast Furnace Sludges. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2021;7(4):1603–1626.
<https://doi.org/10.1007/s40831-021-00419-2>
14. Tenório Vinhal J., Húngaro Costa R., Luís Coleti J., Espinosa D. C. Iron recovery from zinc mine tailings by magnetic separation followed by carbothermal reduction of self-reducing briquettes. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2021;99(1):166–177.
<https://doi.org/10.1002/cjce.23845>
15. Abdelrahim A., Aula M., Iljana M., Willms T., Echterhof T., Steinlechner S., Mombelli D., Mapelli C., Omran M., Preiss S., Fabritius T. Suitability of Self-Reducing and Slag-Forming Briquettes for Electric Arc Furnace Use Based on Laboratory Tests. *Steel research international*. 2022;93(2):2100472.
<https://doi.org/10.1002/srin.202100472>
16. Wu S., Chang F., Zhang J., Lu H. Kinetics and Reduction Behavior of Self-reducing Briquettes Containing Blast Furnace Dust. In: *8th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing*. Cham: Springer. 2017:591–601.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-51340-9_58
17. Vitikka O., Iljana, M., Heikkilä A., Tkalenko I., Koriuchev. N., Shehovsov D., Malkki A., Fabritius T. Suitability of auger pressing briquettes for blast furnace use based on laboratory Tests. *Minerals*. 2022;12(7):868.
<https://doi.org/10.3390/min12070868>
18. Wu S., Chang F., Zhang J., Lu H., Kou M. Cold strength and high temperature behaviors of self-reducing briquette containing electric arc furnace dust and anthracite. *ISIJ International*. 2017;58(8):1364–1373.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-013>
19. Coleti J.L., Manfredi G.V.P., Vinhal J.T., Junca E., Espinosa D.C.R., Tenório J.A.S. Kinetic investigation of self-reduction basic oxygen furnace dust briquettes using charcoals from different biomass. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(6):13282–13293.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.061>
20. Bagatini M.C., Fernandes T., Silva R., Galvao D.F., Flores I.V. Mill scale and flue dust briquettes as alternative burden to low height blast furnaces. *Journal of Cleaner Production*. 2020;276:124332.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124332>
21. Bagatini M.C., Zymła V., Osório E., Vilela A.C.F. Scale recycling through self-reducing briquettes to use in EAF. *ISIJ International*. 2017;57(12):2081–2090.
<http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-242>
22. Coleti J.L., Manfredi G.V.P., Junca E., Grillo F.F., de Oliveira J.R., Espinosa D.C.R., Tenório J.A.S. Kinetic Investigation of Self-reducing Briquettes of Electric Arc Furnace Dust Produced with Charcoals. *JOM*. 2022;74:1–10.
<https://doi.org/10.1007/s11837-022-05222-2>

REFERENCES

1. Pavlovets V.M. *Development of equipment and technology for pelletizing iron ore raw materials in metallurgy*. Moscow: Vologda: Infra-Inzheneriya. 2022:336. EDN: EBYWIW. (In Russ.).
2. Pavlovets V.M. *Pellets in the technology of extraction of metals from ores*. Moscow: Vologda: Infra-Inzheneriya. 2022:284. (In Russ.).
3. Pavlovets V.M., Domnin K.I. Investigation of the briquetting process of iron ore materials containing spent mineral oil as an unconventional reducing agent. In: *Science and Youth: problems, searches, solutions. Proceedings of the All-Russian Scientific Conference of students, postgraduates and young scientists with international participation*. Novokuznetsk: ITs SibGIU. 2022:225–231. EDN:PPJNAD. (In Russ.).
4. Pavlovets V.M., Domnin K.I. The use of man-made industrial waste in the technology of briquetting iron-containing materials. In: *Metallurgy: technologies, innovations, quality. Proceedings of the XI International Scientific and Practical Con-*

- ference. Novokuznetsk: ITs SibGIU. 2021:159–183. EDN:QEFUWP. (In Russ.).
5. Pavlovets V.M., Domnin K.I. A method for producing iron-containing briquettes. Pat. 2814587 RF. *Byulletin' izobretenii*. 2024;7. (In Russ.).
6. Ozhogin V.V. *Fundamentals of the theory and technology of briquetting crushed metallurgical raw materials*. Mariupol: PG TU. 2010:442. EDN:QNAFUP. (In Russ.).
7. Saraatanbazar B., Li G. Effect of modified humic acid binder on roasting behavior of mongolian “Tumurtei” iron ore concentrate briquettes. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020;63(6):419–427. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-6-419-427>
8. Kurunov I.F., Bizhanov A.M. Braces are a new stage in the pelletizing of raw materials for blast furnaces. *Metallurg*. 2014;3:49–53. EDN SAXQUR. (In Russ.).
9. Kasperovich A.V., Shashok Zh.S., Kayushnikov S.N. *The main processes of tire production*. Minsk: BGTU. 2013:115. EDN:VADNUJ. (In Russ.).
10. Myrkhalykov Zh.U., Turebekova G.Z., Sagitova G.F., Sakibaeva S.A. The possibilities of increasing the adhesion of rubber to textile cord made of artificial fibers. *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti*. 2015;355(1):49–53. (In Russ.).
11. Anikin A.E., Galevskii G.V., Rudneva V.V. Technological modes of efficient metallization of iron-oxide-containing waste from metallurgical production. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020;63(5):335–343. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-335-343>
12. But E.A., Pavlov A.V. Solid-liquid-phase carbothermal reduction of nickel from ore-coal briquettes. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018;61(2):120–127. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-2-120-127>
13. Mombelli D., Gonçalves D.L., Mapelli C., Barella S., Gruttadauria, A. Processing and Characterization of Self-Reducing Briquettes Made of Jarosite and Blast Furnace Sludges. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2021;7(4):1603–1626. <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00419-2>
14. Tenório Vinhal J., Húngaro Costa R., Luís Coleti J., Espinosa D. C. Iron recovery from zinc mine tailings by magnetic separation followed by carbothermal reduction of self-reducing briquettes. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2021;99(1):166–177. <https://doi.org/10.1002/cjce.23845>
15. Abdelrahim A., Aula M., Iljana M., Willms T., Echterhof T., Steinlechner S., Mombelli D., Mapelli C., Omran M., Preiss S., Fabritius T. Suitability of self-reducing and slag-forming briquettes for electric arc furnace use based on laboratory tests. *Steel research international*. 2022;93(2):2100472. <https://doi.org/10.1002/srin.202100472>
16. Wu S., Chang F., Zhang J., Lu H. Kinetics and Reduction Behavior of Self-reducing Briquettes Containing Blast Furnace Dust. In: *8th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing*. Cham: Springer. 2017:591–601. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51340-9_58
17. Vitikka O., Iljana, M., Heikkilä A., Tkalenko I., Koriuchev. N., Shehovsov D., Malkki A., Fabritius T. Suitability of Auger Pressing Briquettes for Blast Furnace Use Based on Laboratory Tests. *Minerals*. 2022;12(7):868. <https://doi.org/10.3390/min12070868>
18. Wu S., Chang F., Zhang J., Lu H., Kou M. Cold strength and high temperature behaviors of self-reducing briquette containing electric arc furnace dust and anthracite. *ISIJ International*. 2017;58(8):1364–1373. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJIN T-2017-013>
19. Coleti J.L., Manfredi G.V.P., Vinhal J.T., Junca E., Espinosa D.C.R., Tenório J.A.S. Kinetic investigation of self-reduction basic oxygen furnace dust briquettes using charcoals from different biomass. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(6):13282–13293. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.061>
20. Bagatini M.C., Fernandes T., Silva R., Galvao D.F., Flores I.V. Mill scale and flue dust briquettes as alternative burden to low height blast furnaces. *Journal of Cleaner Production*. 2020;276:124332. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124332>
21. Bagatini M.C., Zymła V., Osório E., Vilela A.C.F. Scale recycling through self-reducing briquettes to use in EAF. *ISIJ International*. 2017;57(12):2081–2090. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJIN T-2017-242>
22. Coleti J.L., Manfredi G.V.P., Junca E., Grillo F.F., de Oliveira J.R., Espinosa D.C.R., Tenório J.A.S. Kinetic Investigation of Self-reducing Briquettes of Electric Arc Furnace Dust Produced with Charcoals. *JOM*. 2022;74:1–10. <https://doi.org/10.1007/s11837-022-05222-2>

Сведения об авторах

Виктор Михайлович Павловец, к.т.н., доцент, доцент кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: pawlowets.victor@yandex.ru
SPIN-код: 8380-9354

Константин Игоревич Домнин, ведущий инженер кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: domnin_k_i@mail.ru
ORCID: 0009-0003-2257-091X
SPIN-код: 8658-4960

Information about the authors:

Viktor M. Pavlovets, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University
E-mail: pawlowets.victor@yandex.ru
SPIN-код: 8380-9354

Konstantin I. Domnin, Senior Engineer of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University
E-mail: domnin_k_i@mail.ru
ORCID: 0009-0003-2257-091X
SPIN-код: 8658-4960

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 18.03.2024

После доработки 22.05.2024

Принята к публикации 27.05.2024

Received 18.03.2024

Revised 22.05.2024

Accepted 27.05.2024