



УДК 669.054.83:66.094.2

DOI 10.17073/0368-0797-2024-6-671-678



Оригинальная статья

Original article

ВОЗДЕЙСТВИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ПРОЦЕССЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОКСИДОВ ЖЕЛЕЗА В ТЕХНОГЕННОМ СЫРЬЕ

М. В. Клеоновский¹, О. Ю. Шешуков^{1,2}, М. А. Михеенков^{1,2},
А. М. Михеенков¹, О. В. Матюхин¹

¹ Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Россия, 620002, Екатеринбург, бург, ул. Мира, 19)

² Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

✉ kleonovskiy@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены способы повышения эффективности восстановления оксидов железа из техногенных отходов (пылей дуговой сталеплавильной печи) с применением механохимической активации, помола и прессования. Проведен анализ химического и фазового составов образцов пылей, что позволило выявить их потенциал для переработки. Эксперименты включали исследование влияния помола и прессования при давлениях до 300 МПа на фазовый состав материалов, а также оценку эффекта добавления кокса в процессе механохимической активации. Для изучения влияния давления прессования на восстановительные процессы был проведен обжиг брикетов при температуре 1200 °С. Полученные результаты показали, что степень металлизации железа возрастает при увеличении давления прессования: содержание металлического железа достигает 19 % при давлении 300 МПа, что выше по сравнению с 17 % в исходном состоянии без прессования. Новизна работы заключается в оптимизации параметров прессования и демонстрации его влияния на процесс восстановления железа. Предложенные условия позволяют повысить эффективность переработки техногенных отходов, что может быть использовано для улучшения экологической и экономической составляющих производства.

Ключевые слова: механохимическая активация, сталеплавильные пыли, металлизация, восстановление оксидов, извлечение цинка, фазовый состав, вторичные ресурсы, переработка отходов

Для цитирования: Клеоновский М.В., Шешуков О.Ю., Михеенков М.А., Михеенков А.М., Матюхин О.В. Воздействие механической обработки на процессы восстановления оксидов железа в техногенном сырье. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2024;67(6):671–678.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-6-671-678>

EFFECT OF MECHANICAL PROCESSING ON REDUCTION OF IRON OXIDES IN MAN-MADE RAW MATERIALS

M. V. Kleonovskii¹, O. Yu. Sheshukov^{1,2}, M. A. Mikheenkova^{1,2},
A. M. Mikheenkova¹, O. V. Matyukhin¹

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russian Federation)

² Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science (101 Amundsena Str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)

✉ kleonovskiy@yandex.ru

Abstract. The study considers ways to increase the efficiency of reduction of iron oxides from man-made waste (dust from electric arc furnaces) using mechanochemical activation (MCA), grinding and pressing. The analysis of chemical and phase compositions of the dust samples was carried out, which made it possible to identify their potential for processing. The experiments included a study of the effect of grinding and pressing at pressures up to 300 MPa on the materials' phase composition, as well as an assessment of the effects of coke addition during MCA. To study the effect of pressing pressure on the reduction processes, briquettes were fired at a temperature of 1200 °C. The results showed that the degree of iron metalliza-

tion increases with an increase in pressing pressure: concentration of metallic iron reaches 19 % at a pressure of 300 MPa, which is higher compared to 17 % in the initial state without pressing. The novelty of the work lies in optimizing the pressing parameters and demonstrating its effect on the iron reduction process. The proposed conditions make it possible to increase the efficiency of processing man-made waste, which can be used to improve the environmental and economic components of production.

Keywords: mechanochemical activation, steelmaking dust, metallization, oxide reduction, zinc extraction, phase composition, secondary resources, waste recycling

For citation: Kleonovskii M.V., Sheshukov O.Yu., Mikheenkova M.A., Mikheenkova A.M., Matyukhin O.V. Effect of mechanical processing on reduction of iron oxides in man-made raw materials. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(6):671–678.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-6-671-678>

ВВЕДЕНИЕ

Переработка техногенного сырья стала одной из ключевых задач современной промышленности и экологии. Техногенное сырье включает в себя различные отходы и побочные продукты, образующиеся в результате производственных процессов. Эти материалы часто содержат ценные компоненты, такие как металлы, минералы и химические соединения, которые могут быть извлечены и повторно использованы. Увеличить эффективность переработки сырья можно с помощью помола и прессования, т. е. механохимической активации (МХА) [1; 2].

Механохимическая активация – это процесс, при котором осуществляется механическое воздействие на твердые вещества, приводящее к изменениям их физико-химических свойств. Это воздействие может включать в себя такие операции, как измельчение, прессование, прокатывание и другие формы механического воздействия. Процесс МХА используется для повышения реакционной способности материалов [3], изменения их фазового состава [4], улучшения взаимодействия между компонентами и активации химических реакций [5], которые в обычных условиях протекают медленно или совсем не протекают.

Ниже представлены основные аспекты МХА.

• **Измельчение и разрушение кристаллической решетки.** В процессе измельчения происходит разрушение кристаллической решетки твердых веществ, что приводит к появлению дефектов и увеличению удельной поверхности. Это способствует повышению реакционной способности материала, так как дефекты могут выступать в качестве центров зарождения новых фаз и инициировать химические реакции [6 – 8].

• **Образование активных центров.** Механическое воздействие создает активные центры на поверхности частиц, которые могут быть свободными радикалами, дефектами решетки или поверхностными несоответствиями. Эти активные центры способны инициировать химические реакции, которые в нормальных условиях протекают очень медленно или требуют высоких температур и катализаторов [9; 10].

• **Изменение фазового состава.** Механохимическая активация может привести к изменению фазо-

вого состава материала. Например, возможно образование новых фаз, которых не было в исходном материале, либо существующие фазы могут преобразовываться в более устойчивые или реакционноспособные формы [11 – 13].

• **Повышение химической активности.** Механохимически активированные материалы зачастую демонстрируют повышенную химическую активность. Это может быть использовано, например, для ускорения процессов восстановления металлов из оксидов, синтеза новых соединений или разрушения стойких химических связей [14 – 16].

• **Снижение температуры реакций.** Благодаря МХА, многие химические реакции имеют возможность протекать при более низких температурах, чем это требовалось бы без активации. Это связано с накоплением механической энергии в материале, которая способствует преодолению энергетического барьера реакции [17; 18].

Таким образом, МХА является важным инструментом для управления физико-химическими свойствами материалов, открывая новые возможности для создания инновационных технологий и процессов.

При изучении условий пирометаллургического восстановления окалины было установлено, что повышение давления прессования при подготовке ее к обжигу с 0 до 300 МПа увеличивает степень металлизации при нагреве в 2 раза, а температура начала металлизации снижается более, чем на 40 °С [19]. Сделано предположение, что наблюдаемые эффекты при пирометаллургическом восстановлении окалины являются следствием МХА оксидов железа в окалине при ее прессовании. Соответственно, целью работы является подтверждение вышеизложенного предположения, а также оптимизация параметров прессования и демонстрация влияния механической обработки сырья на процессы восстановления железа.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ФРАНКЛИНИТА ПРИ МХА

Изучено влияние помола и давления прессования на фазовый состав пыли дуговой сталеплавильной печи (ДСП). Для оценки влияния МХА на фазовый состав пыли ДСП исследованные пробы пыли перемешивали

Таблица 1. Состав сырьевой смеси первой серии и режимы обработки**Table 1. Composition of raw material mixture of the first series and processing mode**

Наименование пробы	Содержание				Помол, мин	Давление прессования, МПа
	пыль ДСП		кокс			
	%	г	%	г		
1.1	100	20	0	0	0	0
1.2					2	0
1.3					2	100
1.4					2	200
1.5					2	300

Таблица 2. Состав сырьевой смеси второй серии и режимы обработки**Table 2. Composition of raw material mixture of the second series and processing mode**

Наименование пробы	Содержание				Помол, мин	Давление прессования, МПа
	пыль ДСП		кокс			
	%	г	%	г		
2.1	80	16	20	4	0	0
2.2					2	0
2.3					2	100
2.4					2	200
2.5					2	300

и на их основе готовили усредненную пробу, которую подвергали помолу в течение 2 мин и прессовали при давлении от 0 до 300 МПа. Состав сырьевой смеси первой серии и режимы обработки приведены в табл. 1.

Во второй серии к пыли добавляли кокс и сырьевую смесь подвергали МХА. Состав сырьевой смеси второй серии и режимы обработки приведены в табл. 2.

Продукты обработки подвергались количественному фазовому анализу.

Количественный рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре STADI-P (STOE, Germany). Съемка проводилась в CuK_α -излучении (40 кВ, 30 мА), графитовый монохроматор, в диапазоне углов рассеяния $2\theta = 10 \div 70^\circ$ с шагом $0,02^\circ$ и выдержкой 2 с. Анализ результатов выполняли с использованием базы данных PDF-2 (Release 2008 RDB 2.0804).

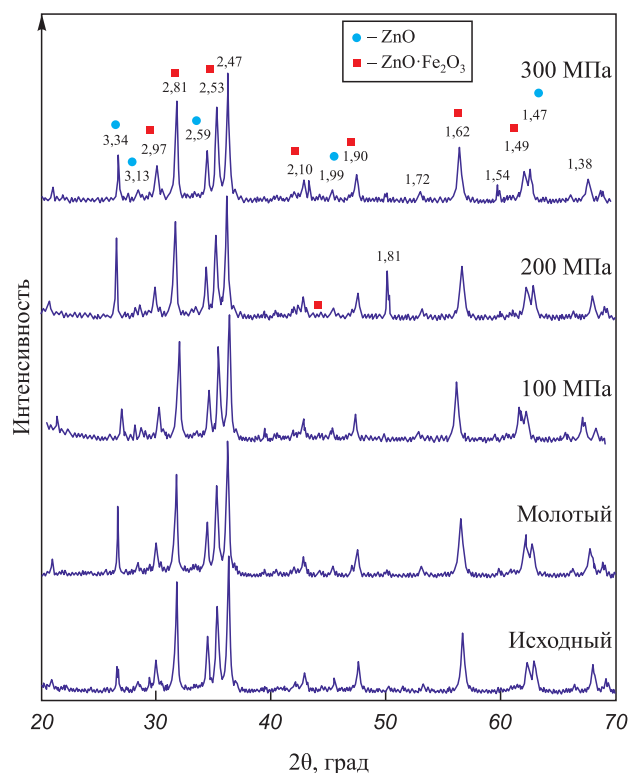
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МХА НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ пыли ДСП

Результаты фазового анализа проб 1.1 – 1.5 без кокса приведены на рис. 1.

Результаты фазового анализа молотых и прессованных проб свидетельствуют, что интенсивность всего

рентгеновского спектра в зависимости от давления прессования изменяется циклически. В табл. 3 и на рис. 1 приведено изменение содержания фаз в пробах в зависимости от режимов обработки.

Результаты испытаний указывают на то, что содержание соединений изменяется в противофазе. С увеличением давления прессования до 150 МПа содержание ZnO в пробе увеличивается, а франклинита $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ снижается. При дальнейшем повышении давления прессования до 300 МПа содержание франклинита $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ увеличивается, а содержание ZnO уменьшается. Соответственно, необходимо контролировать

**Рис. 1.** Результаты фазового анализа проб 1.1 – 1.5**Fig. 1.** Results of phase analysis of the samples 1.1 – 1.5**Таблица 3. Содержания фаз в пробах в зависимости от режимов обработки****Table 3. Phase composition in the samples depending on processing modes**

Наименование пробы	Давление прессования, МПа	Содержание, мас. %	
		ZnO	$\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$
1.1	0	34,9	44,6
1.2	50*	36,1	43,0
1.3	100	42,6	37,3
1.4	200	38,0	39,1
1.5	300	34,9	44,5

* – условное обозначение помола.

и поддерживать оптимальное давление прессования в зависимости от желаемых содержаний соединений в конечном продукте.

Результаты фазового анализа проб 2.1 – 2.5 с коксом приведены на рис. 2.

Результаты фазового анализа молотых и прессованных проб свидетельствует, что интенсивность всего рентгеновского спектра, так же, как и в образцах без кокса, изменяется циклически в зависимости от давления прессования. В табл. 4 и на рис. 2 приведено изменение содержания фаз в пробах в зависимости от режимов обработки.

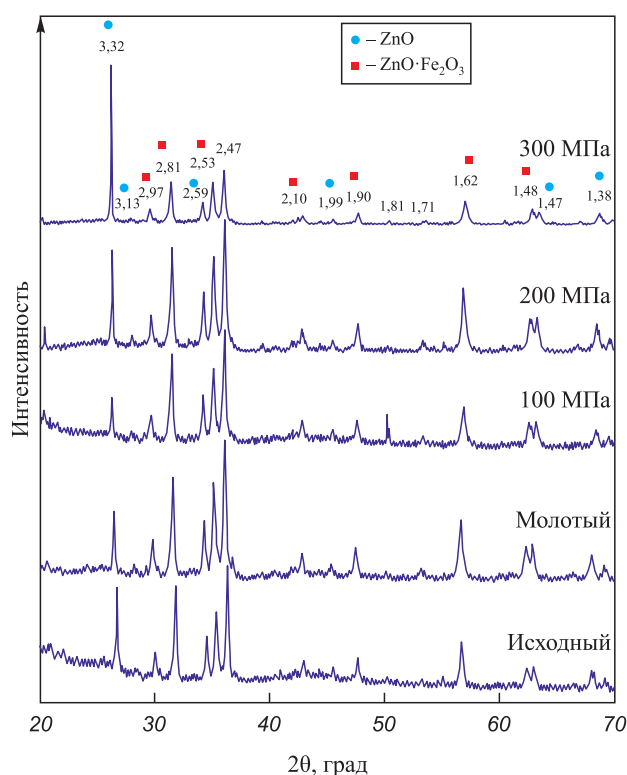


Рис. 2. Результаты фазового анализа проб 2.1 – 2.5

Fig. 2. Results of phase analysis of the samples 2.1 – 2.5

Таблица 4. Содержания фаз в пробах 2.1 – 2.5 в зависимости от режимов обработки

Table 4. Phase composition in the samples 2.1 – 2.5 depending on processing modes

Наименование пробы	Давление прессования, МПа	Содержание, мас. %	
		ZnO	ZnO·Fe ₂ O ₃
2.1	0	37,4	40,7
2.2	50*	34,1	43,3
2.3	100	32,1	43,4
2.4	200	35,6	41,5
2.5	300	46,6	31,6

* – условное обозначение помола.

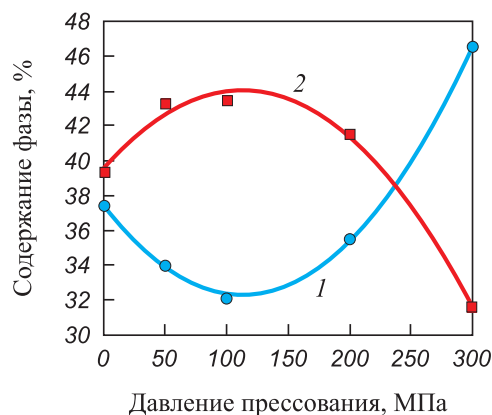
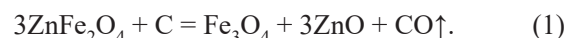


Рис. 3. Содержания фаз в пробах 2.1 – 2.5 в зависимости от режимов обработки: 1 – ZnO; 2 – ZnO·Fe₂O₃

Fig. 3. Phase composition in the samples 2.1 – 2.5 depending on processing modes: 1 – ZnO; 2 – ZnO·Fe₂O₃

Результаты испытаний показывают, что с повышением давления прессования содержание свободного ZnO сначала уменьшается, а потом резко увеличивается. Если в исходной пробе соотношение рассматриваемых фаз ZnO/ZnO·Fe₂O₃ составляет 37,4/40,7, то после полной МХА соотношение данных фаз равно 46,6/31,6. Вероятнее всего, изменение количества фаз происходит за счет взаимодействия с коксом по реакции



На рис. 3 приведен график зависимости изменения содержания фаз ZnO и ZnO·Fe₂O₃ от давления.

ОБЖИГ ПРЕССОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ

Для оценки влияния давления прессования на фазовый состав продуктов обжига готовили сырьевую смесь на основе пыли ДСП, кокса и сухого компонента связки при его содержании 10 %. Составляющие сырьевой смеси подвергали совместному помолу. После помола в сырьевую смесь добавляли жидкий компонент связки и брикетировали при давлениях 0, 100, 200 и 300 МПа. Состав связки приведен в патенте [20], а состав сырьевой смеси для обжига и режимы ее обработки приведены в табл. 5.

Перед брикетированием вводилась связка, состоящая из шлака агрегата ковш-печь (АКП), жидкого стекла и кремнефтористоводородной кислоты. В составе шлака АКП содержится около 40 % двухкальциевого силиката (2CaOSiO₂), который, вступая в реакцию с жидким стеклом, вызывает его отверждение примерно через 30 мин после смешения с образованием водостойких тоберморитоподобных кальций-натриевых гидросиликатов. Этого времени достаточно для осуществления брикетирования. После брикети-

Таблица 5. Состав сырьевой смеси для обжига и режимы ее обработки

Table 5. Composition of the raw mixture for firing and its processing mode

Наименование пробы	Содержание										Давление прессования, МПа
	пыль ДСП		шлак АКП		кокс, сверх 100 %		ЖСМ-3,0 γ-1,2		КФВК γ-1,08		
	%	г	%	г	%	г	%	мл	%	мл	
3.1	90	18	10	2	20,0	4	7,5	1,5	3,75	0,75	0
3.2	90	18	10	2	20,0	4	7,5	1,5	3,75	0,75	100
3.3	90	18	10	2	20,0	4	7,5	1,5	3,75	0,75	200
3.4	90	18	10	2	20,0	4	7,5	1,5	3,75	0,75	300

рования и полного отверждения брикеты приобретают высокую прочность. Кремнефтористоводородная кислота тоже вступает в реакцию с жидким стеклом, вызывая его твердение [21]. Однако кислота еще играет роль флюсообразующей добавки. Она, вступая в реакцию с оксидом кальция шлака, образует флюорит (плавиковый шпат), являющийся сильным флюсом.

В работе [22] показано, что при содержании связки менее 10 % реализуется бездиффузионный режим восстановления оксидов железа. В этом режиме степень металлизации сильно зависит от давления прессования. При содержании связки 10 % появляется жидкая фаза и реализуется диффузионный режим восстановления оксидного железа. В этом режиме степень металлизации не зависит от давления прессования, она во всем диапазоне давлений примерно одинакова.

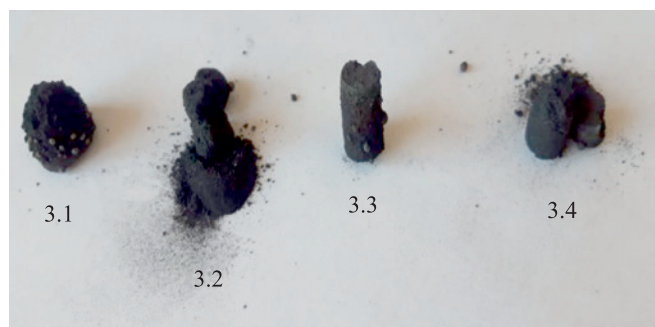


Рис. 4. Общий вид обожженных образцов

Fig. 4. General view of the fired samples

Таблица 6. Содержание фаз в исследованных пробах

Table 6. Phase composition in the studied samples

Наименование пробы	Содержание фазы, мас. %	
	Fe _{мет}	2CaO·SiO ₂ , 3CaO·SiO ₂
3.1	17,1	82,9
3.2	16,3	83,7
3.3	17,4	82,6
3.4	19,0	80,8

Содержание кокса соответствует стехиометрии оксидного железа и углерода плюс 15 % сверх стехиометрии с учетом зольности кокса.

Сухие брикеты обжигали до 1200 °С в течение 1 ч. Температура обжига соответствовала завершению металлизации [22]. Изотермическая выдержка при температуре 1200 °С составляла 30 мин. На рис. 4 приведен общий вид обожженных образцов.

На обожженных образцах, приведенных на рис. 4, хорошо видны капли металлического железа.

Продукты обжига подвергались фазовому анализу. Содержание фаз в исследованных пробах приведено в табл. 6.

Результаты испытаний свидетельствуют, что с повышением давления прессования содержание металлического железа сначала снижается, но потом увеличивается и при 300 МПа достигает 19 % относительно 17 % в исходном состоянии без прессования. Исходя из этого, целесообразно поддерживать давление прессования на уровне 300 МПа, так как меньшее давление прессования может оказывать отрицательный эффект на степень металлизации.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования показали значительное влияние давления прессования на фазовый состав и процессы восстановления оксидов железа в пыли ДСП. В первой серии экспериментов, где использовались образцы без добавления кокса, наблюдалось циклическое изменение содержания фаз в зависимости от давления прессования (табл. 3). При давлениях до 150 МПа содержание ZnO увеличивалось, а содержание франклинита ZnO·Fe₂O₃ снижалось. Однако при дальнейшем повышении давления до 300 МПа отмечалось обратное явление: содержание ZnO уменьшалось, а франклинита возрастало. Это свидетельствует о необходимости контроля давления прессования для достижения требуемого соотношения фаз в конечном продукте.

При исследовании второй серии образцов с добавлением кокса (табл. 4) результаты фазового анализа также продемонстрировали циклическое изменение содержа-

ния фаз ZnO и $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ в зависимости от давления прессования. Существенное увеличение содержания свободного ZnO при давлении 300 МПа свидетельствует о протекании реакции восстановления франклинита (ZnFe_2O_4) с участием углерода. Взаимодействие по уравнению (1) приводит к образованию магнетита (Fe_3O_4), оксида цинка и угарного газа (CO), что подтверждает влияние МХА на разрушение франклинита и восстановление оксидов железа.

Результаты оценки влияния давления прессования на процессы обжига (табл. 6) показали, что при повышении давления с 0 до 300 МПа содержание металлического железа сначала снижается, а затем возрастает, достигая максимума 19 % при давлении 300 МПа. Это свидетельствует о том, что оптимальное давление прессования должно составлять 300 МПа для достижения максимальной степени металлизации железа. Более низкие значения давления могут негативно сказываться на процессе восстановления железа, снижая его долю в конечном продукте.

Таким образом, результаты исследований подтверждают, что МХА, происходящая при прессовании пыли ДСП, способствует улучшению процессов восстановления оксидов железа. Оптимизация параметров прессования, в частности давление 300 МПа, позволяет достичь наибольшей эффективности металлизации. Это открывает перспективы для повышения производительности и экологической эффективности пирометаллургической переработки отходов.

Выводы

Показано, что МХА оказывает значительное влияние на фазовый состав пыли ДСП как с добавлением кокса, так и без него. В пробах без кокса обнаружено, что фазовый состав изменяется циклически с изменением давления прессования. При давлении до 150 МПа содержание оксида цинка (ZnO) увеличивается, в то время как содержание франклинита ($\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) снижается. При дальнейшем повышении давления до 300 МПа содержание франклинита возрастает, а количество свободного ZnO уменьшается, что указывает на необходимость точного контроля давления для достижения желаемого фазового состава.

В пробах с добавлением кокса также наблюдается циклическое изменение фазового состава в зависимости от давления. При повышении давления сначала уменьшается содержание свободного ZnO , а затем оно резко возрастает. Эти изменения, вероятно, обусловлены реакцией взаимодействия франклинита с коксом, в результате которой образуются магнетит (Fe_3O_4), ZnO и угарный газ.

При обжиге прессованных образцов выявлено, что с повышением давления прессования содержание металлического железа сначала снижается, но затем

увеличивается и достигает максимума при 300 МПа. Это свидетельствует о том, что давление прессования 300 МПа является оптимальным для достижения высокой степени металлизации, тогда как более низкое давление может отрицательно сказаться на качестве конечного продукта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Saedi A., Jamshidi-Zanjani A., Mohseni M., Darban A., Nejati H. Mechanical activation of lead–zinc mine tailings as a substitution for cement in concrete construction. *Construction and Building Materials*. 2023;364:129973. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129973>
2. Yuan W., Wu Z., Song Q., Huang Q., Zhang C., Crittenden J. Lead recovery from waste CRT funnel glass by mechanochemical reaction with reductive Al powder. *Waste Management*. 2023;172:43–50. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.09.008>
3. Mañosa J., Alvarez-Coscojuela A., Marco-Gibert J., Maldonado-Alameda A., Chimenos J.M. Enhancing reactivity in muscovitic clays: Mechanical activation as a sustainable alternative to thermal activation for cement production. *Applied Clay Science*. 2024;250:107266. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2024.107266>
4. Penczner S., Kumar P., Patel M., Bouchard L., Iacopino D., Patel R. Innovations in mechanochemical synthesis: Luminescent materials and their applications. *Materials Today Chemistry*. 2024;38:102177. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2024.102177>
5. Baki V.A., Ke X., Heath A., Calabria-Holley J., Terzi C., Sirin M. The impact of mechanochemical activation on the physicochemical properties and pozzolanic reactivity of kaolinite, muscovite and montmorillonite. *Cement and Concrete Research*. 2022;162:106962. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106962>
6. Kohobhange S.P., Manoratne C.H., Pitawala H.M., Rajapaksa R.M. The effect of prolonged milling time on comminution of quartz. *Powder Technology*. 2018;330:266–274. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.02.033>
7. Yang X., Liu J., Chen G., Wu F., Liu J., Jiang X. Synergistic effects of mechanochemical activation and selective O-alkylation on the chemical structure and gaseous products evolution during coal flash pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2024;180:106553. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106553>
8. Abed F.H., Zareei S.A., Kurdi N.H., Emami A. Enhancing geopolymer binder reactivity and performance via mechanochemical activation: A comprehensive study of rheological, mechanical, and microstructural properties. *Construction and Building Materials*. 2024;430:136456. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136456>
9. Yang C., Li Y., Tian Z., Qin W., Liu X., Wang X. Enhanced chalcopryrite leaching by mechanical activation: New insights from microstructure. *Minerals Engineering*. 2024; 212:108719. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108719>
10. Hosseini S., Brake N.A., Nikookar M., Günaydın-Şen Ö., Snyder H.A. Enhanced strength and microstructure of dredged clay sediment-fly ash geopolymer by mechano-

- chemical activation. *Construction and Building Materials*. 2021;301:123984.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123984>
11. Singh A., Bhadauria S., Thakare A., Kumar A., Mudgal M., Chaudhary S. Durability assessment of mechanochemically activated geopolymer concrete with a low molarity alkali solution. *Case Studies in Construction Materials*. 2024;20:e02715.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02715>
 12. Zhihan Z., Zhi W., Dong W., Yong L., Wanhai X., Chenghao L., Yang L., Jian W., Guobiao L. A green process for selective REEs recovery from Rare earth waste through mechanochemical activation. *Separation and Purification Technology*. 2023;315:123654.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123654>
 13. Zhang Y., Liu B., Gu X., Nehdi M.L., Zhang L.V. Mechanochemical activation of iron ore tailing-based ternary supplementary cementitious materials. *Construction and Building Materials*. 2022;346:128420.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128420>
 14. Odebiyi O.S., Guo Y., Hao Du, Liu B., Wang S. Effect of mechanochemical activation parameters on vanadium recovery from vanadium-bearing steel slag: Critical speed derivation for wet-ball milling. *Materials Chemistry and Physics*. 2024;324:129697.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129697>
 15. Yu Y., Cui L., Zhang L., Wang Y. Efficient mechanochemical leaching of zinc from zinc oxide ores. *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*. 2024;34:1976–1993.
[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(24\)66520-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(24)66520-9)
 16. Meng X., Hao J., Cao H., Lin X., Ning P., Zheng X., Chang J., Zhang X., Wang B., Sun Z. Recycling of $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ cathode materials from spent lithium-ion batteries using mechanochemical activation and solid-state sintering. *Waste Management*. 2019;84:54–63.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.034>
 17. Kriskova L., Pontikes Y., Cizer Ö., Mertens G., Veuleman W., Geysen D., Jones P.T., Vandewalle L., Van Balen K., Blanpain B. Effect of mechanical activation on the hydraulic properties of stainless steel slags. *Cement and Concrete Research*. 2012;42(6):778–788.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.02.016>
 18. Gao P., Wu X., Zhang D., Sun X., Zhang G., Chen F. Mechanochemical activation of aryl diazonium salts: Synthesis of polycyclic (hetero)aromatics. *Journal of Organic Chemistry*. 2024;89(17):12197–12203.
<https://doi.org/10.1021/acs.joc.4c01107>
 19. Шешуков О.Ю., Михеенков М.А., Некрасов И.В., Егизарьян Д.В., Ведмидь Л.Б. Влияние давления прессования на процесс восстановления оксидов железа техногенного происхождения. *Труды научно-практической конференции с международным участием и элементами школы молодых ученых: 65-летию ИМЕТ УрО РАН посвящается*. 2020:472–474.
Sheshukov O.Yu., Mikheenkova M.A., Nekrasov I.V., Egizaryan D.V., Vedmid' L.B. Influence of pressing pressure on reduction of iron oxides of technogenic origin. In: *Proceedings of the Sci. and Pract. Conf. with Int. Part. and Elements of the School of Young Scientists: Dedicated to the 65th Anniversary of IMET UB RAS*. 2020:472–474. (In Russ.).
 20. Пат. 2705483 RU. Способ брикетирования железосодержащих отходов в виде окалина / Ведмидь Л.Б. Михеенков М.А., Шешуков О.Ю., Некрасов И.В.; заявл. 28.01.2019, опубл. 07.11.2019.
 21. Борсук П.А., Лясс А.М. Жидкие самотвердеющие смеси. Москва: Машиностроение; 1979:255.
 22. Sheshukov O., Mikheenkova M., Vedmid L., Nekrasov I., Egizaryan D. Mechanism of ion-diffusion solid-phase reduction of iron oxides of technogenic origin in the presence of the liquid phase and without it. *Metals*. 2020;10(12):1564.
<https://doi.org/10.3390/met10121564>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Михаил Витальевич Клеоновский, инженер 1-й категории кафедры «Металлургия железа и сплавов», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

ORCID: 0000-0002-8874-9061

E-mail: kleonovskiy@yandex.ru

Олег Юрьевич Шешуков, д.т.н., профессор, директор Института новых материалов и технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; главный научный сотрудник лаборатории порошковых, композиционных и нано-материалов, Институт металлургии Уральского отделения РАН

ORCID: 0000-0002-2452-826X

E-mail: o.j.sheshukov@urfu.ru

Михаил Аркадьевич Михеенков, д.т.н., профессор, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; старший научный сотрудник лаборатории пирометаллургии черных металлов, Институт металлургии УрО РАН

ORCID: 0000-0002-7908-2955

E-mail: silast@mail.ru

Александр Михайлович Михеенков, аспирант кафедры «Металлургия железа и сплавов», Уральский федеральный университет им. Первого Президента Б.Н. Ельцина

E-mail: ma@osk66.ru

Mikhail V. Kleonovskii, Engineer of the Chair “Metallurgy of Iron and Alloys”, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

ORCID: 0000-0002-8874-9061

E-mail: kleonovskiy@yandex.ru

Oleg Yu. Sheshukov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Institute of New Materials and Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; Chief Researcher of the Laboratory of Powder, Composite and Nano-Materials, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0002-2452-826X

E-mail: o.j.sheshukov@urfu.ru

Mikhail A. Mikheenkova, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; Senior Researcher of the Laboratory “Pyrometallurgy of Ferrous Metals”, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0002-7908-2955

E-mail: silast@mail.ru

Aleksandr M. Mikheenkova, Postgraduate of the Chair “Metallurgy of Iron and Alloys”, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

E-mail: ma@osk66.ru

Олег Владимирович Матюхин, к.т.н., доцент кафедры теплофизики и информатики в металлургии, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
E-mail: o.v.matiukhin@urfu.ru

Oleg V. Matyukhin, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy", Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
E-mail: o.v.matiukhin@urfu.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

М. В. Клеоновский – разработка концепции исследования и постановка задач, проведение экспериментальной части работы, помол и прессование проб при различных давлениях, анализ химического и фазового состава пылей ДСП, а также их изменения в процессе механохимической активации.

О. Ю. Шешуков – научное руководство, разработка методов брикетирования образцов, их обжиг с последующим анализом фазового состава.

М. А. Михеенков – анализ воздействия механохимической активации на фазовый состав пыли ДСП, изучение влияния помола и давления прессования на процессы восстановления оксидов железа, интерпретация данных, полученных в результате рентгенофазового анализа проб и при исследовании взаимодействия компонентов сырьевой смеси.

А. М. Михеенков – теоретическое обоснование исследования, анализ литературных источников, обоснование важности механохимической активации для повышения реакционной способности материалов.

О. В. Матюхин – обработка и визуализация экспериментальных данных, построение графиков зависимости фазового состава от давления и температуры, анализ результатов исследований, формулировка выводов, обсуждение результатов.

M. V. Kleonovskii – development of the research concept and tasks, conducting the experiments, grinding and pressing of the studied samples at various pressures, analysis of the chemical and phase composition of EAF dusts and their changes during mechanochemical activation.

O. Yu. Sheshukov – scientific guidance, development of the methods for samples briquetting, firing them with subsequent analysis of the phase composition.

M. A. Mikheenkoy – analysis of the effect of mechanochemical activation on the phase composition of EAF dust, study of the effect of grinding and pressing pressure on reduction of iron oxides, interpretation of the data obtained as a result of X-ray phase analysis of samples, study of interaction of the raw mixture components.

A. M. Mikheenkoy – theoretical substantiation of the study, literary analysis, justification of importance of mechanochemical activation to increase the materials reactivity.

O. V. Matyukhin – processing and visualization of experimental data, plotting the dependence of phase composition on pressure and temperature, analysis of the research results, writing the conclusions, discussion of the results.

Поступила в редакцию 04.09.2024
После доработки 23.09.2024
Принята к публикации 23.10.2024

Received 04.09.2024
Revised 23.09.2024
Accepted 23.10.2024