



Оригинальная статья

УДК 669.1:622.788.32

DOI 10.17073/0368-0797-2021-5-323-329



БРИКЕТИРОВАНИЕ ПОРИСТЫХ ГЛИНОЗЕМСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОРГАНИЧЕСКИХ СВЯЗУЮЩИХ

В. В. Аксенова, С. А. Алимбаев, А. В. Павлов, Р. М. Мустафин

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

Аннотация. Отходы корундового производства в виде пористых глиноземистых шламов являются перспективным материалом для обеспечения черной металлургии дешевыми глиноземсодержащими шлакообразующими материалами. Однако непосредственная подача пылеватых материалов в сталеплавильную печь, как правило, приводит к значительному выносу таких материалов с отходящими газами. В данной работе рассмотрена возможность изготовления брикетов из пористых шламов корундового производства способом холодного брикетирования на различных распространенных связующих материалах (меласса, цемент, порошок на основе полиакриламида, эмульсия на основе поливинилацетата). Произведено сравнение особенностей холодного брикетирования порошкообразных пористых материалов (шламы производства электрокорунда) и дисперсных кристаллических материалов (мелочь хромовой руды). Проведены эксперименты по определению ударной прочности брикетов на различном связующем (холодная прочность) и испытания по определению горячей прочности (методом испытания на термошок). Определен расход связующего, требующегося для получения удовлетворительных характеристик брикетов из шламов корундового производства и из мелочи хромовой руды. Разработана методика и определен механизм связывания частиц рыхлых и кристаллических материалов при брикетировании с применением порошка полиакриламида. Показано, что разрушение брикета из рыхлых материалов происходит главным образом по зернам самого пористого материала, а брикеты из кристаллических материалов разрушаются по границам склеенных связующим зерен. Для пористых материалов расход связующего увеличивается более, чем в два раза по сравнению с брикетированием на тех же связующих кристаллических тел мелкой фракции, причем связующее обязательно должно пропитывать весь объем пористого материала.

Ключевые слова: холодное брикетирование, органические и неорганические связующие, полиакриламид, глиноземсодержащие шламы, холодная прочность, горячая прочность, механизм разрушения брикета

Для цитирования: Аксенова В.В., Алимбаев С.А., Павлов А.В., Мустафин Р.М. Брикетирование пористых глиноземсодержащих материалов на органических связующих // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 5. С. 323–329.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-323-329>

Original article

BRIQUETTING OF POROUS ALUMINA-CONTAINING MATERIALS WITH ORGANIC BINDERS

V. V. Aksenova, S. A. Alimbaev, A. V. Pavlov, R. M. Mustafin

National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS) (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

Abstract. Waste from corundum production in the form of porous alumina sludge is a promising material for providing ferrous metallurgy with cheap alumina-containing slag-formers. However, the direct feeding of the pulverized materials to the steelmaking furnace generally results in a significant carryover of such materials with waste gases. This paper considers the possibility of making briquettes from porous sludge of corundum production by cold briquetting using various common binders (molasses, cement, powder based on polyacrylamide, emulsion based on polyvinyl acetate). A comparison of the features of cold briquetting of powdered porous materials (slimes from the production of electrocorundum) and dispersed crystalline materials (fines of chrome ore) was made. Experiments were carried out to determine the impact strength of briquettes on different binder (“cold” strength) and tests to determine the “hot” strength (by the “thermal shock” test method). The authors have determined the consumption of the binder required to obtain satisfactory characteristics of briquettes from corundum slimes and from chrome ore fines. A technique has been developed and a mechanism for the binding of particles of loose and crystalline materials has been determined during briquetting using polyacrylamide powder. The destruction of a briquette of loose materials occurs mainly along the grains of the most porous material, and briquettes of crystalline materials are destroyed along the boundaries of the grains glued with a binder. For porous materials, the binder consumption increases more than twice as compared to briquetting on the same binder crystalline bodies of a fine fraction, and the binder must necessarily impregnate the entire volume of the porous material.

Keywords: cold briquetting, organic binders, nonorganic binders, polyacrylamide, alumina-containing sludge, cold crushing strength, hot strength, briquette destruction mechanism

For citation: Aksenova V.V., Alimbaev S.A., Pavlov A.V., Mustafin R.M. Briquetting of porous alumina-containing materials with organic binders. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 5, pp. 323–329. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-323-329>

ВВЕДЕНИЕ

Холодное брикетирование является одним из распространенных способов окускования мелкодисперсных материалов для дальнейшего металлургического передела. Изготавливают брикеты из мелкой руды, угольной и коксовой пыли, флюсов, отходов металлургического производства и т. п. [1 – 5]. Подача материалов в компактном виде в металлургический агрегат предотвращает его вынос с отходящими газами, а в случае восстановительной плавки обеспечивает газопроницаемость столба шихтовых материалов. Кроме того, брикетирование сокращает потери материала при транспортировке.

Холоднобрикетированные материалы должны обладать достаточными величинами холодной и горячей прочности [6 – 10], обеспечивающими целостность брикета на всех этапах металлургического передела. Это решается правильным подбором связующего вещества, а также способом брикетирования.

Для каждой группы материалов существуют свои технологические особенности изготовления брикетов, а также определенные связующие материалы. В свою очередь, при использовании того или иного вида связующего материала нужно учитывать особенности брикетирования в зависимости от модификации твердых тел.

ХАРАКТЕРИСТИКА ИСПОЛЗУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

В данной работе рассмотрена возможность изготовления брикетов из пористых шламов корундового производства. Данные шламы могут послужить сырьем для производства известково-глиноземистых шлаков и кальция углеродистого, которые широко используются для выпечки стали и раскисления. Замена высококачественного глинозема на отходы корундового производства в черной металлургии является экономически целесообразным. Однако особенностью глиноземистых шламов является невысокая прочность самих частиц шлама, что затрудняет получение необходимой прочности готового брикета.

В качестве материала для сравнения была использована мелочь хромовой руды, имеющая кристаллическое строение. Мелкая хромовая руда брикетируется и применяется при выплавке ферросплавов хрома [11 – 13].

Изученные шламы корундового производства и хромовая руда имели фракцию меньше 1 мм. Химические составы материалов представлены в табл. 1.

К связующим материалам предъявляется ряд требований. Во первых, связующее при брикетировании должно обеспечивать необходимые прочностные свойства брикета как в холодном состоянии, так и при температуре металлургического процесса. Одновременно связующий материал не должен вносить вредных и балластных примесей в материал.

Если до недавнего времени в черной металлургии широко использовались неорганические связующие типа цемента или бентонита, то в настоящее время набирают популярность полимерные органические связующие, которые могут частично или полностью заменить неорганические [14 – 17]. Как правило, полимерные связующие разлагаются при высоких температурах без выделения опасных продуктов распада и полностью улетучиваются.

В качестве рассматриваемых связующих были выбраны четыре материала: неорганическое – цемент марки М500, органическое растительного происхождения – раствор сахара в воде (аналог меласса), два органических синтетического происхождения – порошок на основе полиакриламида (ПАА) и эмульсия на основе поливинилацетата (ПВВ) (табл. 2).

ОПИСАНИЕ МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение прочностных свойств брикетов проводили в два этапа: холодное испытание брикетов на ударную прочность и горячее испытание на термошок.

Брикетирование материалов. Брикетирование производилось методом ударно-вибрационного прессования в пресс-форме с внутренним диаметром 25 мм. В случае, когда связующее было в виде порошка, проводили предварительное смешивание его с сухой шихтой для равномерного распределения компонентов. В случае, если связующее было в виде эмульсии, его добавляли в заранее увлажненную шихту. Расход связующего материала выбирался в соответствии с инструкцией по применению, а также на основе литературных и экспериментальных данных [18 – 21]. Расход меласса на брикетирование составил 1 – 6 % массы материала (или 0,4 – 2,4 % в пересчете на сухое вещество), цемента – 4 – 12 %, порошка полиакриламида –

Таблица 1

Химический состав исходных материалов, %

Table 1. Chemical composition of the raw materials, %

Шламы корундового производства						Мелочь хромовой руды							
Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	S	Cr ₂ O ₃	FeO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	CaO	S	P
68,4	11,1	15,9	0,05	4,3	0,13	52,3	12,9	7,7	19,5	7,1	0,5	0,02	0,002

Таблица 2

Характеристика связующих материалов

Table 2. Characteristics of the binders

Показатель	Вид связующего материала			
	цемент	меласса	ПАА	ПВА
Форма	порошок	эмульсия	порошок	эмульсия
Массовая доля сухого вещества, %	100	40	100	50
Тип	неорганическое	органическое	органическое	органическое

0,2 – 0,6 %, эмульсии поливинилацетата – 1,2 – 2,8 % (или 0,6 – 1,4 % в пересчете на сухое вещество).

Готовые влажные брикеты подвергали сушке на воздухе в течение 120 мин при температуре 100 °С. Влажность материалов при брикетировании должна находиться в определенных пределах. Опытным путем определено, что для глиноземистых шламов этот показатель находится в пределах 16 – 19 %, а для рудной хромовой мелочи он в два раза меньше – 8 – 9 %.

Испытания на холодную прочность. Испытания проводили путем сбрасывания брикета с высоты 1,8 м на стальную плиту. Далее измеряли массу самого большого не разрушившегося куска. Сбрасывания повторяли до тех пор, пока потеря массы не превышала 40 % исходной.

В ходе испытаний на холодную прочность определено, что только полимерные связующие обеспечивают минимально необходимую ударную прочность для брикетов из алюминийсодержащих шламов – от 2 до 4 сбрасываний на стальную плиту. При брикетировании на мелассе и цементе брикеты из шлама при первом ударе о стальную плиту рассыпались в пыль. Брикеты из мелочи хромовой руды, брикетированные на поли-

акриламиде, выдерживают до 22 сбрасываний. Для брикетов из мелочи хромовой руды некоторую ударную прочность обеспечивают также цемент (1 сбрасывание) и меласса (1 – 3 сбрасываний), но в больших количествах (более 12 и 6 % соответственно).

Испытания на горячую прочность. Брикеты на всех четырех видах связующих были испытаны на горячую прочность (в том числе и брикеты на воде). Суть испытания на термошок – сброс брикета, находящегося при комнатной температуре, в разогретое до 1600 °С пространство печи. Испытание проводили в лабораторной электропечи сопротивления с графитовым нагревателем. Брикет помещали в шлюз-дозатор и разогревали печь до заданной температуры. По достижению указанной температуры брикет сбрасывали в алундовый тигель. Время выдержки брикета в печи составляло 10 мин. Данные об изменении температуры в пространстве печи фиксировались с помощью тепловизора модели Pyrovision M9000. По истечению заданного времени брикет извлекали из печи и оценивали степень разрушения и наличие внешних дефектов после спекания. По итогу проведенных экспериментов следует подчеркнуть, что испытания на термошок выдержали брикеты как из шлама, так и из мелкой хромовой руды на всех видах связующих, в том числе на воде.

При проведении некоторых серий испытаний на термошок наблюдали задымленность в пространстве печи. В эти моменты была затруднена работа тепловизора и на графиках (рис. 1), которые автоматически пишутся с тепловизора, можно увидеть горизонтальную площадку. И чем больше связующего в брикете, которое вызывает дымление, тем она длиннее. По величине данной площадки можно качественно определить, насколько применим тот или иной вид связующего в металлургических процессах.

В проведенных «горячих» экспериментах хорошо себя показали цемент и порошок полиакриламида,

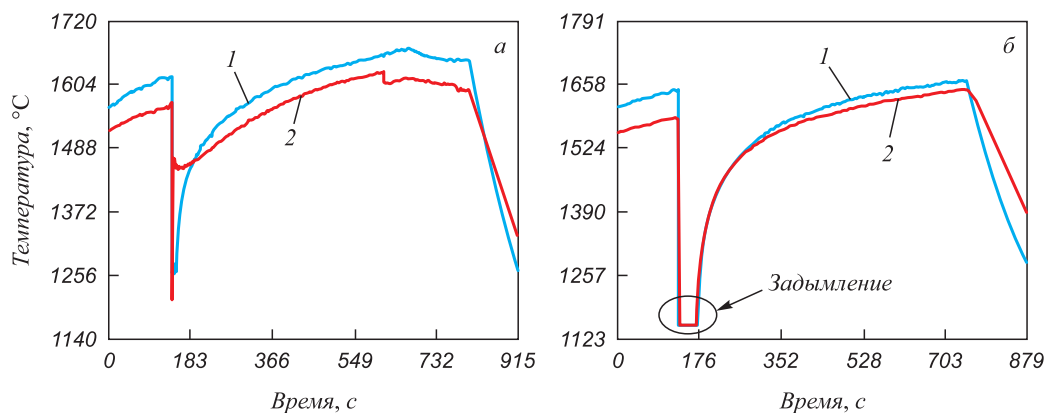


Рис. 1. Температурные графики с тепловизора:
1 – температура тигля; 2 – температура поверхности брикета

Temperature graphs from a thermal imager:
1 – crucible temperature; 2 – briquette surface temperature

а при брикетировании на мелассе и эмульсии на основе поливинилацетата наблюдалось сильное задымление.

Для двух разновидностей брикетов определено содержание кристаллогидратной влаги. Потери массы после проведения горячих испытаний для глиноземистых шламов варьировались в пределах 9,5 – 12 %, а для брикетов из мелочи хромовой руды – 4,4 – 7,2 % независимо от типа связующего. Объем брикета после спекания в случае со шламами уменьшился в среднем на 15 %, а для мелочи хромовой руды – на 2 %.

Помимо того, что связующее не должно вносить вредных и балластных примесей, оно может выступать либо в качестве флюса, либо в качестве восстановителя. Поскольку в органических связующих находится углерод в связанном виде, то он может выступать в качестве восстановителя. Степень металлизации

брикетов с органическим связующим определяли с помощью оптического микроскопа. На рис. 2 показана явная зависимость количества металлических включений от увеличения массы порошка полиакриламида в брикете.

После проведенных экспериментов было определено, что наиболее предпочтительным для брикетирования алюминийсодержащих шламов является порошок на основе полиакриламида, так как он обеспечивает как необходимую холодную, так и горячую прочность при весьма низком расходе вплоть до 0,4 % массы брикета. Кроме того, он не вносит вредных и балластных примесей, важность чего отмечалась ранее. Также данный набор характеристик обеспечивает эмульсия на основе поливинилацетата, но при использовании ее вдвое большем количестве по сравнению с полиакриламидом (в пересчете на сухое вещество).

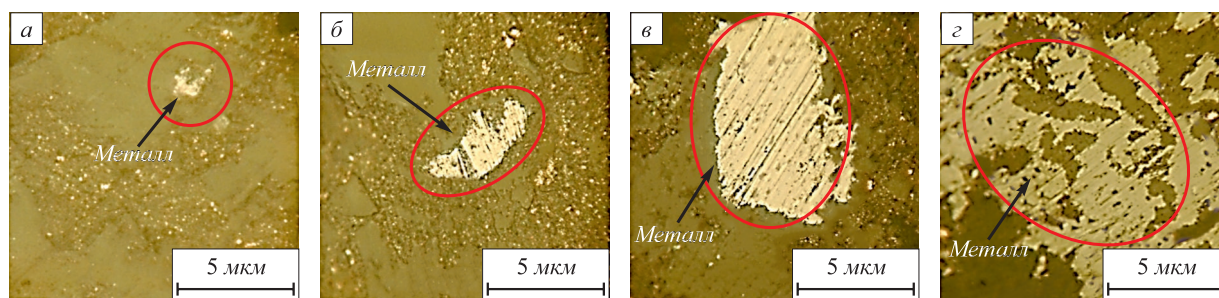


Рис. 2. Металлические включения в обожженных брикетах, содержание ПАА, %:
а – 0,2; б – 0,4; в – 0,6; з – 1,4

Fig. 2. Metallic inclusions in the burned briquettes, polyacrylamide content, %:
а – 0.2; б – 0.4; в – 0.6; з – 1.4

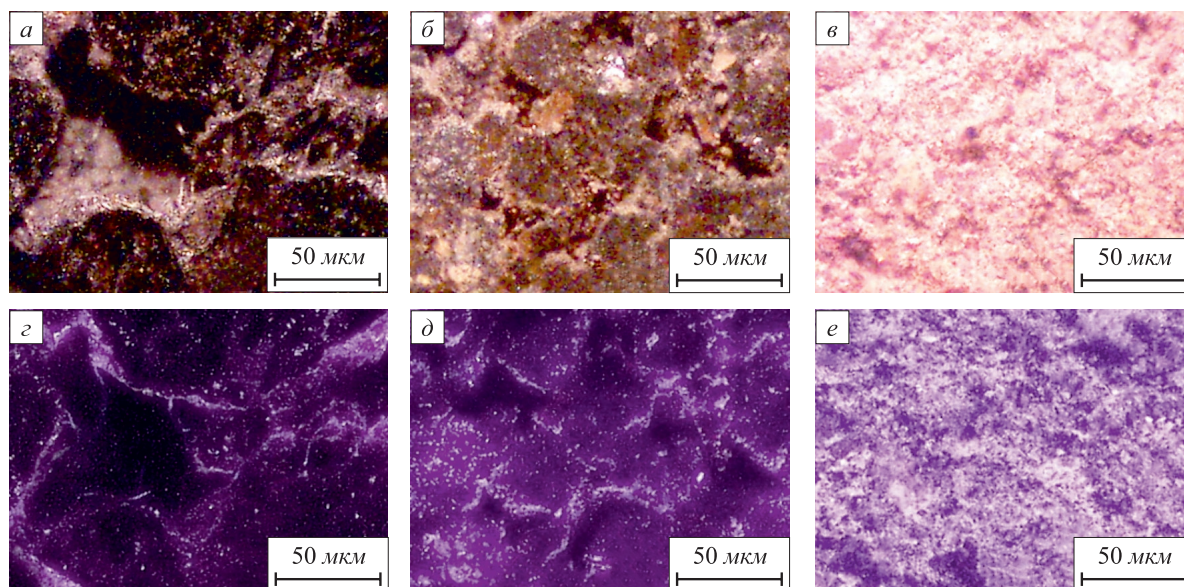


Рис. 3. Микрофотография поверхности брикета при естественном свете: а – электрокорунд; б – хромовая руда; в – шлам (Al_2O_3) и при УФ-свете: з – электрокорунд; д – хромовая руда; е – шлам (Al_2O_3)

Fig. 3. Micrograph of the briquette surface in natural light: а – electrocorundum; б – chrome ore; в – sludge (Al_2O_3); and in UV light: з – electrocorundum; д – chrome ore; е – sludge (Al_2O_3)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЗМА СВЯЗЫВАНИЯ ЧАСТИЦ

Для порошка на основе полиакриламида, как для связующего, показавшего наилучшие результаты при брикетировании шламов, был изучен механизм связывания твердых частиц при брикетировании.

Механизм связывания изучали с помощью окрашивания порошка полиакриламида флуоресцентной водорастворимой краской. Подобный краситель применяется для обнаружения протечек в водных системах при активации свечения в ультрафиолетовом свете.

Порошок полиакриламида растворяли в воде, в которой он превращался в прозрачную гелеобразную эмульсию. Эмульсию окрашивали водным раствором флуоресцентного красителя. На рис. 3 представлена микрофотография отшлифованных поверхностей брикетов, изготовленных на окрашенном связующем, при естественном и ультрафиолетовом освещении.

Производили также брикетирование на окрашенном полиакриламидном связующем и крупных кристаллов нормального электрокорунда. В случае с кристаллами электрокорунда и хромовой руды связующее располагается пленкой на поверхности зерен, тем самым создавая тонкую клеящую поверхность.

В случае глиноземсодержащего шлама его частицы впитывают вовнутрь эмульсию полиакриламида, что проявляется в сплошном свечении всего объема материала в ультрафиолетовых лучах, а не только границы склеенных зерен.

Соответственно при брикетировании пористых материалов расход связующего, необходимый для получения требуемых прочностных характеристик, всегда будет значительно выше, чем для кристаллических частиц.

Выводы

При брикетировании различных материалов необходимо учитывать модификацию твердых тел. Для изготовления брикетов из шламов корундового производства, лишь органические связующие могут обеспечить требуемый набор характеристик для дальнейшего металлургического передела данного материала. Отличительной особенностью является то, что для пористых материалов расход связующего увеличивается более, чем в два раза по сравнению с брикетированием на тех же связующих кристаллических тел мелкой фракции (в данном случае хромовой руды).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Равич Б.М. Брикетирование в цветной и черной металлургии. М.: Металлургия, 1975. 232 с.
2. Назимко Е.И. Окускование материалов как метод использования различных отходов. В кн.: Актуальные проблемы биоразнообразия и природопользования: Материалы II Национальной научно-практической конференции, посвященной 20-летию кафедры экологии моря ФГБОУ «КГМТУ». 15–17 мая 2019, Керчь. Симферополь: Ариал, 2019. С. 367–373.
3. Diez M.A., Alvarez R., Cimadevilla J.L.G. Briquetting of carbon-containing wastes from steelmaking for metallurgical coke production // *Fuel*. 2013. Vol. 114. P. 216–223. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.04.018>
4. Brozova S., Pustejovska P., Bilik J., Jursova S., Zbrankova M., Havranek J. Innovated technologies of recycling of metallic wastes—modification of existing industrial processes // *New Trends in Production Engineering*. 2019. Vol. 2. No. 2. P. 361–367. <https://doi.org/10.2478/ntpe-2019-0100>
5. Murthy Y.R., Kapure G.U., Tripathy S.K., Sahu G.P. Recycling of ferromanganese gas cleaning plant (GCP) sludge by novel agglomeration // *Waste Management*. 2018. Vol. 80. P. 457–465. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.023>
6. Ожогин В.В., Томаш А.А., Ковалевский И.А. и др. Брикетирование как полноправный метод окускования металлургического сырья // *Металлургические процессы и оборудование*. 2005. № 2. С. 54–58.
7. Shaik A.A., Pal S., Jha R. Briquetting: A new approach to recycle the waste iron-bearing materials generated in steel plants // *Journal of Metallurgy and Materials Science*. 2005. Vol. 47. No. 4. P. 199–206.
8. Taulbee D., Patil D.P., Honaker R.Q., Parekh B.K. Briquetting of coal fines and sawdust Part I: Binder and briquetting-parameters evaluations // *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2009. Vol. 29. No. 1. P. 1–22. <https://doi.org/10.1080/19392690802628705>
9. Zhang G., Sun Y., Xu Y. Review of briquette binders and briquetting mechanism // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 82. P. 477–487. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.072>
1. Ravich B.M. *Briquetting in Non-Ferrous and Ferrous Metallurgy*. Moscow: Metallurgiya, 1975, 232 p. (In Russ.)
2. Nazimko E.I. Materials sintering as a method of using various waste. In: *Actual Problems of Biodiversity and Nature Management. Materials of the II Nation. Sci. and Pract. Conf. dedicated to the 20th Anniversary of the Department of Marine Ecology FSBEI "KSMTU"* May 15–17, 2019, Kerch. Simferopol: Arial, 2019, pp. 367–373. (In Russ.)
3. Diez M.A., Alvarez R., Cimadevilla J.L.G. Briquetting of carbon-containing wastes from steelmaking for metallurgical coke production. *Fuel*. 2013, vol. 114, pp. 216–223. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.04.018>
4. Brozova S., Pustejovska P., Bilik J., Jursova S., Zbrankova M., Havranek J. Innovated technologies of recycling of metallic wastes—modification of existing industrial processes. *New Trends in Production Engineering*. 2019, vol. 2, no. 2, pp. 361–367. <https://doi.org/10.2478/ntpe-2019-0100>
5. Murthy Y.R., Kapure G.U., Tripathy S.K., Sahu G.P. Recycling of ferromanganese gas cleaning plant (GCP) sludge by novel agglomeration. *Waste Management*. 2018, vol. 80, pp. 457–465. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.023>
6. Ozhogin V.V., Tomash A.A., Kovalevskii I.A., etc. Briquetting as a full-fledged method of agglomeration of metallurgical raw materials. *Metallurgicheskie protsessy i oborudovanie*. 2005, no. 2, pp. 54–58. (In Russ.)
7. Shaik A.A., Pal S., Jha R. Briquetting: A new approach to recycle the waste iron-bearing materials generated in steel plants. *Journal of Metallurgy and Materials Science*. 2005, vol. 47, no. 4, pp. 199–206.
8. Taulbee D., Patil D.P., Honaker R.Q., Parekh B.K. Briquetting of coal fines and sawdust Part I: Binder and briquetting-parameters evaluations. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2009, vol. 29, no. 1, pp. 1–22. <https://doi.org/10.1080/19392690802628705>
9. Zhang G., Sun Y., Xu Y. Review of briquette binders and briquetting mechanism. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018, vol. 82, pp. 477–487. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.072>

10. Kuskov V., Kuskova Y., Udovitsky V. Effective processing of the iron ores // *E3S Web of Conferences*. – EDP Sciences. 2017. Vol. 21. Article 02010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172102010>
11. Алимбаев С.А., Алмагамбетов М.С., Нургали Н.З., Павлов А.В. Применение экструзионных брикетов для выплавки углеродистого феррохрома // *Черные металлы*. 2020. № 5. С. 4–8.
12. Kurunov I., Bizhanov A. *Stiff Extrusion Briquetting in Metallurgy*. Springer International Publishing, 2018.
13. Steele R.B., Bizhanov A. Stiff extrusion agglomeration of arc furnace dust and ore fines for recovery at a ferroalloy smelter // *Proc. 32nd Biennial Conf.* 2011. P. 41–53.
14. Юленков Н.С., Муравский А.А., Литосов Г.Э. и др. Свойства композиций полиакриламида и пентанпентаола. В кн.: *Наука сегодня: задачи и пути их решения: Материалы Международной научно-практической конференции*. 29 мая 2019 г., Вологда. Вологда: Маркер, 2019. С. 52–53.
15. Хадыев Я.А., Антонова М.В. Влияние состава связующего на свойства композиционного материала. В кн.: *Молодежь и XXI век – 2020: Материалы X Международной молодежной научной конференции*. 19–20 февраля 2020 г., Курск. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. С. 411–413.
16. Zhang G., Sun Y., Xu Y. Review of briquette binders and briquetting mechanism // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 82. P. 477–487. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.072>
17. Sunde M. Organic binder as a substitute for bentonite in ilmenite pelletization: *Cand Tech. Sci. Diss.* Norway, 2012. 104 p.
18. Шабанов Е.Ж., Избембетов Д.Д., Байсанов С.О. и др. Технология производства высокоуглеродистого феррохрома с использованием моношихтовых брикетов // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2018. Т. 61. № 9. С. 702–707. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-9-702-707>
19. Бижанов А.М., Стил Б.Р., Подгородецкий Г.С., Курунов И.Ф., Дашевский В.Я., Коровушкин В.В. Брикетизация (браксы) для производства ферросплавов // *Металлург*. 2012. Т. 67. № 12. С. 52–57.
20. Kosturkiewicz B. The use of cement as a binder in the process of industrial waste briquetting // *Przemysl Chemiczny*. 2019. Vol. 98. No. 9. P. 1420–1422. <https://doi.org/10.15199/62.2019.9.13>
21. Manyuchi M.M., Mbohwa C., Muzenda E. Value addition of coal fines and sawdust to briquettes using molasses as a binder // *South African Journal of Chemical Engineering*. 2018. Vol. 26. P. 70–73. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2018.09.004>
10. Kuskov V., Kuskova Y., Udovitsky V. Effective processing of the iron ores. *E3S Web of Conferences*. – EDP Sciences. 2017, vol. 21, article 02010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172102010>
11. Alimbaev S.A., Almagambetov M.S., Nurgali N.Z., Pavlov A.V. The use of extrusion briquettes for smelting carbon ferrochrome. *Chernye metalli*. 2020, no. 5, pp. 4–8. (In Russ.)
12. Kurunov I., Bizhanov A. *Stiff Extrusion Briquetting in Metallurgy*. Springer International Publishing, 2018.
13. Steele R.B., Bizhanov A. Stiff extrusion agglomeration of arc furnace dust and ore fines for recovery at a ferroalloy smelter. *Proc. 32nd Biennial Conf.* 2011, pp. 41–53.
14. Yulenkova N.S., Muravskii A.A., Litosov G.E., etc. Properties of polyacrylamide and pentanpentaol compositions. In: *Science Today: Problems and Ways to Solve Them: Materials of the Int. Sci. and Pract. Conf.*, May 29, 2019, Vologda. Vologda: Marker, 2019, pp. 52–53. (In Russ.)
15. Khadyev Ya.A., Antonova M.V. Influence of binder composition on properties of composite material. In: *Youth and the XXI century-2020: Materials of the X Int. Youth Sci. Conf.*, February 19-20, 2020, Kursk. Kursk: Southwest State University, 2020, pp. 411–413. (In Russ.)
16. Zhang G., Sun Y., Xu Y. Review of briquette binders and briquetting mechanism. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018, vol. 82, pp. 477–487. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.072>
17. Sunde M. *Organic binder as a substitute for bentonite in ilmenite pelletization: Cand. Tech. Sci. Diss.* Norway, 2012, 104 p.
18. Shabanov E.Zh., Izbembetov D.D., Baisanov S.O., Shadiev M.F. Technology for the production of high-carbon ferrochromium using mono-briquettes. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 9, pp. 702–707. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-9-702-707>
19. Bizhanov A.M., Steele R.B., Podgorodetskyi G.S., Kurunov I.F., Dashevskiy V.Ya., Korovushkin V.V. Extruded briquettes (bricks) for ferroalloy production. *Metallurgist*. 2013, vol. 56, no. 11–12, pp. 925–932. <https://doi.org/10.1007/s11015-013-9676-2>
20. Kosturkiewicz B. The use of cement as a binder in the process of industrial waste briquetting. *Przemysl Chemiczny*. 2019, vol. 98, no. 9, pp. 1420–1422. <https://doi.org/10.15199/62.2019.9.13>
21. Manyuchi M. M., Mbohwa C., Muzenda E. Value addition of coal fines and sawdust to briquettes using molasses as a binder. *South African Journal of Chemical Engineering*. 2018, vol. 26, pp. 70–73. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2018.09.004>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Виктория Владимировна Аксенова, аспирант кафедры металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

E-mail: axenovaviki@gmail.com

Сабыржан Алимбаевич Алимбаев, аспирант кафедры металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

E-mail: alim407@mail.com

Александр Васильевич Павлов, д.т.н., профессор кафедры металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

E-mail: pav-gnts@isis.ru

Руслан Миниярович Мустафин, к.т.н., доцент кафедры металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

E-mail: rus17@mail.ru

Viktoriia V. Aksenova, Postgraduate of the Chair of Metallurgy of Steel, New Production Technologies and Metal Protection, National University of Science and Technology “MISIS”

E-mail: axenovaviki@gmail.com

Sabyrzhan A. Alimbaev, Postgraduate of the Chair of Metallurgy of Steel, New Production Technologies and Metal Protection, National University of Science and Technology “MISIS”

E-mail: alim407@mail.com

Aleksandr V. Pavlov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Metallurgy of Steel, New Production Technologies and Metal Protection, National University of Science and Technology “MISIS”

E-mail: pav-gnts@isis.ru

Ruslan M. Mustafin, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Metallurgy of Steel, New Production Technologies and Metal Protection, National University of Science and Technology “MISIS”

E-mail: rus17@mail.ru

ВКЛАД АВТОРОВ:

В.В. Аксенова – формирование основной концепции, цели и задачи исследования, написание текста рукописи, получение и анализ данных.

С.А. Алимбаев – обзор публикаций по теме статьи, получение данных для анализа.

А.В. Павлов – научное руководство, получение данных для анализа, доработка текста.

Р.М. Мустафин – получение данных для анализа, визуализация результатов исследований.

Поступила в редакцию 06.02.2021

Received 06.02.2021

После доработки 14.04.2021

Revised 14.04.2021

Принята к публикации 16.04.2021

Accepted 16.04.2021