

Received: 14.02.2023

Revised: 30.03.2023

Accepted: 28.04.2023

DOI: 10.17804/2410-9908.2023.2.041-048

STUDYING THE MECHANICAL PROPERTIES OF IRON ORE CONCENTRATE BRIQUETTES

L. I. Polyansky^{1, a)}, N. A. Babailov^{2, b), *}, and Yu. N. Loginov^{3, c)}

¹Spidermash LLC, 54 Studencheskaya St., Ekaterinburg, 620912, Russia

²Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russia

³Yeltsin UrFU, 19 Mira St., Ekaterinburg, 620002, Russia

a)  info@spidermash.ru;

b)  <https://orcid.org/0000-0002-6245-2841>  n.a.babailov@urfu.ru;

c)  <https://orcid.org/0000-0002-7222-2521>  j.n.loginov@urfu.ru

*Corresponding author. E-mail: n.a.babailov@urfu.ru

Address for correspondence: ul. Komsomolskaya, 34, Ekaterinburg, 620049, Russia

Tel.: +7 (343) 374-2594

This paper studies the properties of metallurgical briquettes of iron ore concentrate with coke screenings and liquid glass as a binder. The briquettes are produced by one-sided pressing in a closed die mounted on the plates of a vertical press with a force of 100 kN. The studies were carried out in the laboratory of Spidermash LLC. The following properties of briquettes were determined: density, impact strength and compressive strength (for green and dry briquettes). The functional dependences of the mechanical properties on 4 parameters are plotted, namely on charge mixture composition (the content of iron ore concentrate and coke), binder (liquid glass) percentage in the mixture, moisture content in the mixture, and charge mixture compacting pressure. The obtained experimental data are approximated with the use of a multiplicative model, with the application of the least squares method. Various analytical models for describing the behavior of the material to be briquetted are studied. It is concluded that the multiplicative model provides a more adequate description of the mechanical properties. The quality of the multiple regression model is assessed by the adjusted coefficient of determination. The significance of the regression equation is evaluated by the Fisher criterion, and the significance of the regression coefficients is evaluated according to Student.

The mechanical properties of briquettes from iron ore concentrate with coke screenings, presented in the form of analytical dependencies, are necessary to assess the strength of the briquettes when designing the briquetting process. For example, it is necessary to take into account the change in yield during briquette transportation after briquetting. These dependences are also necessary for formulating and solving problems of pressing/briquetting of finely dispersed materials, including iron ore concentrate with coke screenings.

Keywords: briquetting, metallurgical briquette, iron ore concentrate, coke, liquid glass, data approximation, non-linear regression, least square method.

Acknowledgment

We appreciate the assistance of I. L. Polyansky, lead engineer of Spidermash LLC, who performed extensive work on testing the briquettes with the aim to determine their mechanical properties.

References

1. Ravich B.M. *Briketirovanie rud* [Briquetting of Ores]. Moscow, Nedra Publ., 1982, 183 p. (In Russian).
2. Avdokhin B.M. *Osnovy obogashcheniya poleznykh iskopaemykh* [Fundamentals of Mineral Processing]. Moscow, Izd-vo MGU Publ., 2006, 417. (In Russian).
3. Salman A.D., Hounslow M.J., Seville J.P.K., eds. *Handbook of Powder Technology*. Vol. 11. Granulation, Elsevier, 2007, 1375 p.
4. Wang Z., Xu A.-J., He D.-F. Influence factors of compressive strength of stainless-steel dust pellets by cold bonded briquetting. *Journal of Iron and Steel Research*, 2015, vol. 27 (5), pp. 25–29. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1001-0963.20140114.
5. Mohanty M.K., Mishra S., Mishra B., Sarkar S., Samal S.K. A novel technique for making cold briquettes for charging in blast furnace. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 115. DOI: 10.1088/1757-899X/115/1/012020.
6. Kuskov V., Kuskova Ya., Udovitsky V. Effective processing of the iron ores. In: *E3S Web of Conferences: The Second International Innovative Mining Symposium*, Kemerovo, 20–22 November, 2017, vol. 21, 02010, EDP Sciences Publ., 2017. DOI: 10.1051/e3sconf/20172102010.
7. Kuskov V., Kuskova Ya. Research of physical and mechanical properties of briquettes, concentrated from loose high-grade iron ores. In: *17th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2017*, Albena; Bulgaria; 29 June–5 July 2017, vol. 17: conference proceedings, STEF92 Tekhnologi Publ., 2017, pp. 1011–1016. DOI: 10.5593/sgem2017/11/S04.129.
8. Loginov Yu.N., Burkin S.P., Babailov N.A., Polyanskiy L.I. *Mekhanika valkovogo briketirovaniya sypushikh materialov* [Mechanics of Roll Briquetting of Loose Materials]. Ekaterinburg, AMB Publ., 2011, 304 p. (In Russian).
9. Babailov N.A., Polyanskii L.I., Loginov Yu.N. Briquetting metallurgical lime screenings and parameters making it possible to improve process efficiency. *Metallurgist*, 2016, vol. 60, pp. 576–580. DOI: 10.1007/s11015-016-0334-3.
10. Loginov Yu.N., Babailov N.A., Polyanskii L.I. Effect of the precompaction pressure on the density distribution in a metallurgical briquette during roller pressing. *Metallurgist*, 2018, vol. 61 (9–10), pp. 849–852. DOI: 10.1007/s11015-018-0574-5.
11. Babailov N.A., Loginov Yu.N., Polianskiy L.I. Mechanical properties of briquettes of chromic concentrates. *Obogashchenie Rud*, 2019, No. 6. DOI: 10.17580/or.2019.06.06. (In Russian).
12. *GOST 21289-75*. (In Russian).
13. *GOST 25471-82*. (In Russian).
14. Lvovskiy E.N. *Statisticheskie metody postroeniya empiricheskikh formul* [Statistical Methods for Constructing Empirical Formula]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1988. (In Russian).
15. *Specification 3821-001-50316524-2004*. (In Russian).

Подана в журнал: 14.02.2023

УДК 622.788

DOI: 10.17804/2410-9908.2023.2.041-048

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БРИКЕТОВ ИЗ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО КОНЦЕНТРАТА

Л. И. Полянский^{1, а)}, Н. А. Бабайлов^{2, б), *}, Ю. Н. Логинов^{3, в)}

¹ООО «Спайдермаш», ул. Студенческая, 54, г. Екатеринбург, 620912, Россия

²ФГБУН Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, 620049, Россия

³Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
ул. Мира 19, г. Екатеринбург, 620002, Россия

^{а)}  info@spidermash.ru;

^{б)}  <https://orcid.org/0000-0002-6245-2841>  n.a.babailov@urfu.ru;

^{в)}  <https://orcid.org/0000-0002-7222-2521>  j.n.loginov@urfu.ru

* Ответственный автор. E-mail: n.a.babailov@urfu.ru

Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, 620049, Россия

Tel.: +7 (343) 374-25-94

В работе изучены свойства металлургических брикетов из железорудного концентрата, отсева кокса и жидкого стекла, используемого в качестве связующего. Брикеты получены методом одностороннего прессования в закрытой матрице, которая устанавливается на плитах вертикального пресса усилием 100 кН. Исследования проведены в лаборатории промышленного предприятия ООО «Спайдермаш». Определены следующие свойства брикетов: плотность, ударная прочность и прочность на сжатие (для сырых и сухих брикетов). Построены функциональные зависимости механических свойств от 4 параметров: состава шихтовой смеси (содержания железорудного концентрата и кокса), процентного содержания связующего в смеси (жидкого стекла), влажности смеси и давления прессования шихтовой смеси. В работе полученные экспериментальные данные аппроксимированы с использованием мультипликативной модели, использован метод наименьших квадратов. Исследованы различные аналитические модели описания поведения брикетируемого материала. Сделан вывод, что мультипликативная модель дает более адекватное описание механических свойств. Выполнена оценка качества множественной регрессионной модели по скорректированному коэффициенту детерминации. Оценка значимости уравнения регрессии выполнена по критерию Фишера, а оценка значимости коэффициентов регрессии – по Стьюденту.

Механические свойства брикетов из железорудного концентрата с отсевом кокса, представленные в виде аналитических зависимостей, необходимы для оценки прочности брикетов при проектировании технологического процесса брикетирования. Например, необходимо учитывать изменение выхода годного при выполнении транспортировки брикетов после брикетирования. Эти зависимости необходимы также при постановке и решении задач прессования/брикетирования мелкодисперсных материалов, в том числе железорудного концентрата с отсевом кокса.

Ключевые слова: брикетирование, металлургический брикет, железорудный концентрат, кокс, жидкое стекло, аппроксимация данных, нелинейная регрессия, метод наименьших квадратов.

1. Введение

Валковое брикетирование как способ окускования мелкодисперсных материалов в черной и цветной металлургии успешно используется для подготовки сырья к дальнейшему переделу, а также для утилизации отходов производства [1–3]. Общеизвестно, что валковое брикетирование отсевов материалов, используемых в металлургическом производстве, повышает экономическую эффективность их использования [4–8].

Авторы имеют опыт брикетирования техногенных отходов и отсевов рудного сырья, брикеты из которых используются в металлургическом (в т. ч. сталеплавильном) производстве. Изучены процессы брикетирования отсевов (мелких фракций), например: кокса и кокса с окалиной [9], ферросплавов и железорудного концентрата, металлургической извести [10], а также других техногенных отходов черной металлургии и рудных материалов (с использованием различных связующих или без них).

Ранее авторами были получены аналитические зависимости механических свойств от различных параметров брикетирования для хромовых концентратов [11]. Построены функции зависимости механических свойств получаемых брикетов от содержания металлургической пыли (например, пыли газоочисток, снятой с фильтров и циклонов), жидкого стекла в качестве связующего, влажности брикетируемой шихты и давления прессования подготовленной смеси.

Цель работы – изучение механических свойств металлургических брикетов из железорудного концентрата с отсевом кокса, а также построение аналитических зависимостей плотности и прочности брикетов от технологических параметров брикетирования материала.

2. Материал и методика

Изучаемый в работе железорудный концентрат получен обогащением руды с месторождений близ г. Жезказган (Республика Казахстан) по комбинированной магнитно-флотационной схеме. Химический состав железорудного концентрата приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав железорудного концентрата

Материал	Содержание, %							
	Fe _{общ.}	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	S _{общ.}	MnO	MgO	CaO
Железорудный концентрат	66,0	3,0	1,5	0,116	0,035	0,018	0,11	0,15

Гранулометрический состав железорудного концентрата и кокса определен методом ситового анализа. Фракционный состав концентрата – менее 0,1 мм, фракция для отсева кокса – менее 5 мм.

Способ изготовления брикетов и методика проведения исследований механических свойств аналогичны описанным авторами в работе [11]. Работы выполнены в исследовательской лаборатории ООО «Спайдермаш».

1. Подготовку шихтовых смесей перед прессованием осуществляли в лабораторном смесителе гравитационного типа («пьяная бочка»). Прессование выполняли без подогрева шихтовых смесей или инструмента. Влажность брикетируемой смеси и брикетов определялась с помощью анализатора влажности ЭВЛАС-2М с точностью измерения не более $\pm 0,2$ %.

2. Прессование цилиндрических брикетов выполнено методом одностороннего прессования в закрытой матрице на вертикальном гидравлическом прессе с номинальным усилием 100 кН.

Матрица для брикетирования состоит из трех основных элементов (рис. 1 а): цилиндрическая пресс-форма с диаметром внутреннего отверстия 36 мм, шток с вогнутым основанием и основание вогнутое. Внутренняя поверхность пресс-формы шлифованная.

Форма брикета – «подушка» (рис. 1 б). Данная форма в большей мере приближена к форме брикета промышленного производства (например, при валковом брикетировании), следовательно, она позволяет получать максимально точные показатели в дальнейших исследованиях.



Рис. 1. Матрица для брикетирования (а) и форма получаемого брикета «подушка» (б)

3. Масса брикетов составляла 45÷60 г, и определялась на электронных весах Ohaus Explorer Pro с точностью измерения 0,1 мг.

4. Значения факторов для исследования механических свойств брикетируемых смесей при получении брикетов из железорудного концентрата приведены в табл. 2. Определены следующие механические свойства полученных брикетов: плотность ρ , ударная прочность $\sigma_{уд}$ (или прочность на сбрасывание) и прочность на сжатие σ_p . Определение прочностных характеристик выполнено по ГОСТ 21289-75 и ГОСТ 25471-82 [12, 13].

5. Изучены два типа полученных брикетов: так называемые сырые и сухие брикеты. Сырые брикеты исследуются сразу после прессования (без сушки или вылеживания на воздухе); сухие брикеты исследуются после проведения операции сушки (приняты следующие режимы сушки сырых брикетов в сушильной печи: температура сушки – 100 °С, время сушки – 15 мин).

3. Результаты и обсуждение

Массив исходных данных составил 240 позиций. Было проведено по 3 опыта на каждую точку измерения, далее значения полученных данных усреднялись. Значения факторов при исследовании прессования брикетов из железорудного концентрата приведены в табл. 2.

В работе были исследованы различные аналитические модели описания поведения материала. На основе обработки данных по брикетированию железорудного концентрата сделан вывод, что более точной для исследуемых зависимостей механических свойств от параметров брикетирования можно считать мультипликативную модель вида [14], которая была использованная также при обработке результатов брикетирования хромовых концентратов [11]:

$$y = b_0 x_1^{b_1} x_2^{b_2} x_3^{b_3} x_4^{b_4}, \tag{1}$$

где b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 – коэффициенты регрессии, представленные в табл. 3.

Для определения коэффициентов регрессии линеаризованного уравнения (1) использован метод наименьших квадратов. Коэффициент детерминации для разных составов брикетируемых шихт и условий прессования находится в интервале $R^2 = 0,9 \div 0,99$ (данные приведены в табл. 3).

Таблица 2

Значения факторов при исследовании прессования брикетов из железорудного концентрата с отсевом кокса

Факторы		Значения параметров прессования шихты				
x_1	Содержание связующего (жидкое стекло), %	0	1	3	5	7
x_2	Состав шихты (содержание отсева кокса), %	0	10	15	–	–
x_3	Влажность шихты, %	2	4	6	8	–
x_4	Давление прессования шихтовой смеси, МПа	25	50	100	150	–

Таблица 3

Коэффициенты регрессии уравнения (1) и коэффициенты детерминации

Свойства железорудного концентрата	Параметры уравнения регрессии (1)						
	\hat{b}_0	\hat{b}_1	\hat{b}_2	\hat{b}_3	\hat{b}_4	R^2	$A_{cp}, \%$
Плотность ρ , г/см ³ (сырой брикет)	1,8811	0,0235	0,003	0,067	0,061	0,999	1,822
Ударная прочность $\sigma_{уд}$, % (сырой брикет)	3,633	0,257	0,098	0,491	0,353	0,990	3,079
Ударная прочность $\sigma_{уд}$, % (сухой брикет)	22,364	0,458	0,045	0,091	0,092	0,987	7,134
Прочность на сжатие σ_p , Н/бр. (сухой брикет)	3,913	0,997	0,102	0,053	0,296	0,970	13,364

Для оценки качества аппроксимации полученных экспериментальных данных по уравнению (1) на рис. 2 приведены графические зависимости плотности сырых брикетов

из железорудного концентрата с 10 % кокса и 3 % жидкого стекла (рис. 2 а) и прочности на сбрасывание сырых брикетов из железорудного концентрата с 15 % кокса и 5 % жидкого стекла (рис. 2 б). Сплошными линиями показаны расчетные значения параметров для соответствующих параметров брикетирования по аппроксимирующей формуле (1).

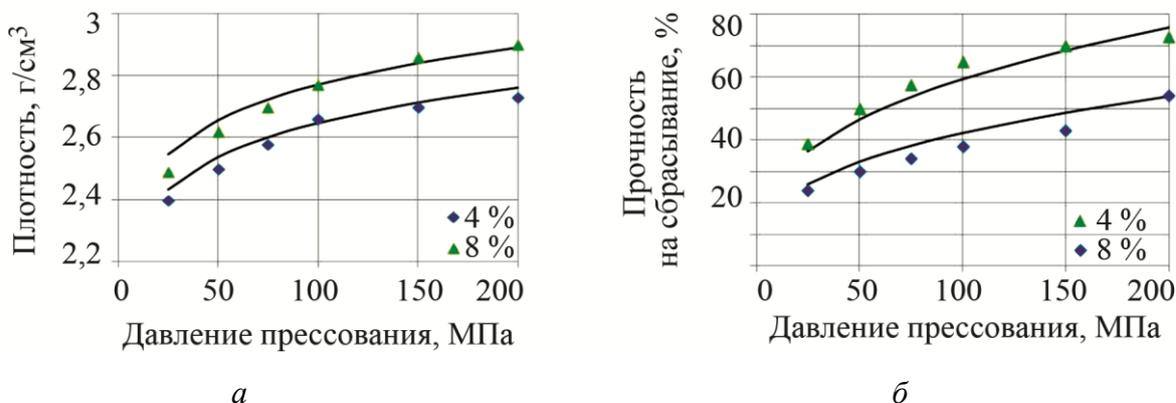


Рис. 2. Зависимость плотности брикетов из железорудного концентрата (10 % кокса + 3 % жидкого стекла) (а) и прочности на сбрасывание брикетов из железорудного концентрата с 15 % кокса и 5 % жидкого стекла (б) от удельного давления прессования и влажности брикетируемой смеси перед прессованием

Для оценки качества множественной регрессионной модели определен скорректированный коэффициент детерминации. Значимость уравнения регрессии определена по критерию Фишера. Сделан вывод, что представленные модели значимы. Также выполнена оценка значимости коэффициентов регрессии по *t*-статистике Стьюдента. Коэффициенты регрессии значимы.

Полученные данные могут быть использованы для разработки технологических процессов брикетирования и определения характеристик валковых брикетных прессов, например для их проектирования [15].

4. Заключение

С использованием нелинейного регрессионного анализа получены аналитические уравнения механических свойств для рудотопливных брикетов из железорудного концентрата с отсевом кокса в зависимости от различных параметров брикетирования. Используя полученную модель, можно оценивать уровень получаемых свойств брикетов из шихтовой смеси, состоящей из железорудного концентрата, отсева кокса и жидкого стекла, применяемого в качестве связующего. Используя полученные уравнения регрессии, возможно, реализовать процесс проектирования технологии получения металлургических брикетов с различным содержанием компонентов в шихтовой смеси.

Благодарность

Авторы выражают благодарность ведущему инженеру ООО «Спайдермаш» Полянскому И. Л. за проведение большого объема испытаний брикетов с целью определения их механических свойств.

Литература

1. Равич Б. М. Брикетирование руд. – М. : Недра, 1982. – 183 с.
2. Авдохин В. М. Основы обогащения полезных ископаемых. – М. : Изд-во МГУ, 2006. – 417 с.
3. Handbook of Powder Technology / ed. by A. D. Salman, M. J. Hounslow, J. P. K. Seville. – Elsevier, 2007. – Vol. 11. – 1375 p.
4. Wang Z., Xu A.-J., He D.-F. Influence factors of compressive strength of stainless-steel dust pellets by cold bonded briquetting // Journal of Iron and Steel Research. – 2015. – Vol. 27 (5). – P. 25–29. – DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1001-0963.20140114.
5. Novel technique for making cold briquettes for charging in blast furnace / M. K. Mohanty, S. Mishra, B. Mishra, S. Sarkar, S. K. A. Samal // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 115. – DOI: 10.1088/1757-899X/115/1/012020.
6. Kuskov V., Kuskova Ya., Udovitsky V. Effective processing of the iron ores // E3S Web of Conferences. 2017, The Second International Innovative Mining Symposium. Section “Environment Problems in Mining Regions”, Kemerovo, 20–22 November, 2017. – EDP Sciences Publ., 2017. – DOI: 10.1051/e3sconf/20172102010. – Vol. 21.
7. Kuskov V., Kuskova Ya. Research of physical and mechanical properties of briquettes, concentrated from loose high-grade iron ores // 17th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2017, Albena, Bulgaria, 29 June–5 July 2017. – STEF92 Tekhnologi Publ., 2017. – DOI: 10.5593/sgem2017/11/S04.129. – Vol. 17, iss. 11. – P. 1011–1016.
8. Механика валкового брикетирования сыпучих материалов / Ю. Н. Логинов, С. П. Буркин, Н. А. Бабайлов., Л. И. Полянский. – Екатеринбург : АМБ, 2011. – 304 с.
9. Babailov N. A., Polyanskiy L. I., Loginov Yu. N. Briquetting metallurgical lime screenings and parameters making it possible to improve process efficiency // Metallurgist. – 2016. – Vol. 60. – P. 576–580. – DOI: 10.1007/s11015-016-0334-3.
10. Loginov Yu. N., Babailov N. A., Polyanskii L. I. Effect of the precompaction pressure on the density distribution in a metallurgical briquette during roller pressing // Metallurgist. – 2018. – Vol. 61. – P. 849–852. – DOI: 10.1007/s11015-018-0574-5.
11. Бабайлов Н. А., Логинов Ю. Н., Полянский Л. И. Изучение механических свойств брикетов из хромовых концентратов // Обогащение руд. – 2019. – № 6. – С. 30–34. – DOI: 10.17580/or.2019.06.06.
12. ГОСТ 21289–75. Брикеты угольные. Методы определения механической прочности.
13. ГОСТ 25471–82. Руды железные, агломераты и окатыши. Метод определения прочности на сбрасывание.
14. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул. – М. : Высшая школа, 1988. – 239 с.
15. ТУ 3821-001-50316524–2004. Прессы брикетировочные валковые серии ПБВ.