



Оригинальная статья

УДК 669.162.1:539.411

DOI 10.17073/0368-0797-2021-11-785-792



ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ОБОЖЖЕННЫХ ОКАТЫШЕЙ НА ПРОЧНОСТЬ И РАЗРУШЕНИЕ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА СТАТИЧЕСКОЕ СЖАТИЕ

А. Н. Дмитриев, В. Г. Смирнова, Е. А. Вязникова,
А. В. Долматов, Г. Ю. Витькина

■ Институт металлургии УрО РАН (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

Аннотация. Обоженные окатыши должны сохранять прочность от момента схода с обжиговой машины до загрузки в доменную печь. Одним из показателей прочности обоженных окатышей является прочность на сжатие, т. е. максимальная прилагаемая нагрузка, при которой железорудный окатыш полностью разрушается. В работе изучен характер разрушения обоженных неофлюсованных железорудных титаномагнетитовых окатышей фракции 10 – 16 мм при испытании на статическое сжатие согласно ISO 4700. Показано, что при испытании основным видом разрушения является возникновение и развитие трещин плоскости, проходящих через центр магнетитового ядра, где действуют максимальные радиальные растягивающие напряжения, или в непосредственной близости от него. В отдельных случаях траектория одной из разрушающих трещин отклоняется от указанной выше плоскости и огибает магнетитовое ядро. Очевидно, это связано с наличием второй области концентрации растягивающих напряжений на границе магнетитового ядра и гематитовой оболочки, сформировавшихся при охлаждении окатышей вследствие различия их механических и теплофизических свойств. В итоге, конечная структура окатышей характеризуется наличием двух зон: периферийной гематитовой и центральной магнетитовой. Определена роль влияния относительного размера магнетитового ядра на прочность при сжатии обоженных окатышей. Установлено, что с уменьшением относительного размера магнетитового ядра прочностные характеристики окатыша возрастают. При протекании процесса полного окисления магнетита (когда весь объем окатыша состоит из гематита) максимальный уровень предельных характеристик прочности на сжатие окатышей может быть следующим: максимальное разрушающее усилие 3300 Н, энергия разрушения 0,55 Дж, массовая энергия разрушения 0,18 Дж/г.

Ключевые слова: железорудные окатыши, прочность на сжатие, диаграммы деформирования, разрушение, усилие, деформация, энергия разрушения, массовая энергия разрушения

Финансирование: Работа выполнена в рамках реализации Государственного задания ИМЕТ УрО РАН с использованием оборудования ЦКП «Урал-М».

Для цитирования: Дмитриев А.Н., Смирнова В.Г., Вязникова Е.А., Долматов А.В., Витькина Г.Ю. Влияние структуры обоженных окатышей на прочность и разрушение при испытании на статическое сжатие // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 11. С. 785–792. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-11-785-792>

Original article

INFLUENCE OF STRUCTURE OF BURNED PELLETS ON STRENGTH AND DESTRUCTION IN STATIC COMPRESSION TESTS

A. N. Dmitriev, V. G. Smirnova, E. A. Vyaznikova,
A. V. Dolmatov, G. Yu. Vit'kina

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

Abstract. The burned pellets must retain the strength from the time they come off the roasting machine until they are loaded into the blast furnace. One indicator of the strength of burned pellets is the compressive strength, i.e., the maximum applied load at which the iron-ore pellet completely collapses. The paper studies the character of destruction of burned iron-ore titanomagnetite pellets of fraction 10 – 16 mm in the static compression test according to the Russian State Standard 24765-81. It is shown that the main type of destruction during the test is the emergence and development of plane cracks passing through the center of the magnetite core, where the maximum radial tensile stresses act or in the immediate vicinity. In some cases, the trajectory of one of the destructive cracks deviates from the above plane and envelopes the magnetite core. Obviously, this is due to the presence of a second area of tensile stress concentration at the boundary of the magnetite core and the hematite shell, formed during cooling of the pellets, due to differences in their mechanical and thermophysical properties. As a result, the final structure of pellets is characterized by the presence of two zones – peripheral hematite and central magnetite. The role of the relative size of the magnetite core on the compressive strength of burned pellets has been

determined. It was established that the strength characteristics of the pellet increase with a decrease in relative size of the magnetite core. During the process of magnetite complete oxidation (when the whole volume of the pellet consists of hematite), the maximum level of the pellets compressive strength can be: the maximum destructive force – 3300 N, destructive energy – 0.55 J, mass destructive energy – 0.18 J/g.

Keywords: iron-ore pellets, compressive strength, deformation diagrams, destruction, force, deformation, destructive energy, mass destructive energy

Funding: The work was performed within the framework of the State Assignment of the Institute of Metallurgy, UB RAS with the use of equipment from the Ural-M Center for Collective Use.

For citation: Dmitriev A.N., Smirnova V.G., Vyaznikova E.A., Dolmatov A.V., Vit'kina G.Yu. Influence of structure of burned pellets on strength and destruction in static compression tests. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 11, pp. 785–792. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-11-785-792>

ВВЕДЕНИЕ

Железорудные окатыши являются важным сырьем при выплавке чугуна в доменных печах. На предприятиях России и в зарубежных странах окатыши из различных концентратов подвергают обжигу с целью достижения необходимых металлургических характеристик [1], таких как прочность на сжатие, удар, истирание и прочность при восстановлении. Одной из важных металлургических характеристик окатышей является прочность на сжатие. В соответствии с ГОСТ 24765–91 на горно-обогатительных комбинатах, производящих окатыши, результаты испытаний на сжатие используют для оценки качества продукции. Прочность на сжатие обожженных окатышей у разных производителей изменяется в пределах 150 – 300 кг/окатыш [2 – 4].

Проблема целостности окатышей при механическом воздействии привлекает внимание многих исследователей, которые для прогнозирования разрушения используют аналитические, численные и экспериментальные подходы к исследованию. Например, в работе [5] представлена модель железорудных окатышей при динамическом нагружении, в соответствии с которой прочность окатышей зависит от скорости деформации, что подтверждено результатами экспериментальных исследований. В работе [6] для моделирования разрушения окатышей используется метод многочастичных конечных элементов. Для определения параметров упруго-пластической модели деформации и разрушения материала окатышей авторами работы [7] были проведены лабораторные испытания.

Поскольку в процессе испытания на сжатие происходит значительное изменение площади контакта деформируемого окатыша и инструмента, разрушающее нормальное контактное напряжение не является представительной характеристикой прочности, как это существует при испытаниях на сжатие цилиндрических образцов. Тем более, что в соответствии с результатами математического моделирования [5, 6] наиболее неблагоприятное напряженное состояние при сжатии сферической формы окатышей возникает в центре за счет действия интенсивных растягивающих радиальных напряжений. Поэтому в качестве меры для оценки прочности окатышей обычно используют величину разрушающего усилия при испытаниях на сжатие.

Однако ряд авторов (например, [8]) считают, что более представительной характеристикой прочности окатышей является энергия разрушения при сжатии, так как энергетические критерии прочности, в отличие от силовых, позволяют учесть диссипацию энергии при пластической деформации материала.

В исходном необоженном состоянии окатыш состоит из железорудного магнетитового концентрата и связующего (бентонит). При обжиге происходит окисление магнетита и образующийся гематит является активной фазой. В результате спекания зерен гематита повышаются прочностные характеристики [9]. Если процесс окисления магнетита прошел полностью по всему сечению окатышей, то они имеют однородную гематитовую структуру.

В промышленных условиях обжиг окатышей ведут при температурах 1250 – 1350 °С, скорость нагрева обычно достигает 100 °С/мин и выше. При таких параметрах обжига полного окисления магнетита не происходит, и окатыши, как правило, имеют зональное строение [10 – 16], магнетитовое ядро и гематитовую оболочку, т. е. ярко выраженное двухфазное строение. Разница в температурах перехода магнетитовых и гематитовых зон зонального окатыша из пластического состояния в упругое сопровождается интенсивной усадкой и различным изменением их размеров, что приводит к возникновению внутренних напряжений на границе магнетитовых и гематитовых зон [17].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки прочности на сжатие были взяты обожженные неофлюсованные железорудные титаномагнетитовые окатыши фракции 10 – 16 мм, обработанные по базовому температурно-временному режиму обжига АО «ЕВРАЗ Качканарский горно-обогатительный комбинат». Химический состав исследуемых окатышей представлен в табл. 1.

Для идентификации фаз в окатышах использовали рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD-7000, оснащенный рентгеновской трубкой в $\text{Cu K}\alpha$ излучении на воздухе в диапазоне углов 2θ от 10 до 85°. При расшифровке дифрактограмм использовали базы данных ICDD PDF-2 (International Centre For Diffraction Data). Согласно результатам рентгенофазового анализа, ока-

Таблица 1

Химический состав исследуемых
железорудных окатышей, % (по массе)

Table 1. Chemical composition of the investigated
iron-ore pellets, % (mass.)

Fe _{общ}	FeO	CaO	SiO ₂	MgO	TiO ₂	V ₂ O ₅
60,90	3,02	1,00	3,89	2,59	2,73	0,58

тыши на 90,6 % состоят из гематита (Fe₂O₃) и на 9,4 % из магнетита (Fe₃O₄).

Испытания на сжатие проводили в соответствии с требованиями ISO 4700 [18] на универсальной машине BT1-FR050THW.A1K (Zwick GmbH, Германия). Скорость перемещения составила 10 мм/мин с записью диаграммы деформирования. Окатыши взвешивались индивидуально перед испытанием на сжатие для определения массы на электронных весах ATL-220d4-1 фирмы ACCULAB с погрешностью ±0,0003.

При расчете энергии разрушения каждого окатыша операцию интегрирования заменяли операцией суммирования с использования записанного массива данных как площадь под диаграммой деформирования по формуле

$$A_f = \sum_{i=1}^{n_f} \left[\frac{F_i + F_{i-1}}{2} (h_i - h_{i-1}) \right], \quad (1)$$

где A_f – энергия разрушения, Дж; n_f – число записей в массиве данных до момента разрушения окатыша; $i = 1 \dots n_f$ – порядковый номер записи массива данных; F_i, F_{i-1} – значение усилия и изменения при i и $i-1$ записи, Н; h_i, h_{i-1} – перемещение деформирующего инструмента при i и $i-1$ записи, мм.

Массовую энергию разрушения рассчитывали по формуле

$$A_m = \frac{A_f}{m}, \quad (2)$$

где A_m – массовая энергия разрушения, Дж/г; m – масса окатыша до испытания, г.

Макросъемку разрушенных окатышей осуществляли с помощью цифровой 64-bit камеры при увеличении 10 крат. Диаметр магнетитового ядра измеряли на стереоскопическом микроскопе МБС-9 с ценой деления 0,17 мм. Относительный размер магнетитового ядра рассчитывали по формуле

$$D^* = \frac{D_m}{D}, \quad (3)$$

где D^* – относительный размер магнетитового ядра, доли единиц; D – диаметр окатыша после испытания, мм; D_m – диаметр магнетитового ядра, мм.

Значения D и D_m находили как среднее из результатов измерений в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для иллюстрации различий в поведении окатышей при нагружении на рис. 1 приведены диаграммы деформирования. Для одних диаграмм характерно наличие одного пикового усилия деформирования, при котором возникает магистральная трещина и окатыш разрушается. В других имеется несколько локальных пиков усилия деформирования. Это свидетельствует о стадийном характере разрушения, связанного с последовательным возникновением трещин, торможением данного процесса и дальнейшим развитием или возникновением новых трещин.

Отсутствие плавного снижения усилия деформирования после образования разрушающих трещин для обоих типов диаграмм свидетельствует о хрупком характере разрушения. Наличие пилообразных диаграмм деформирования и значительного разброса предельных характеристик окатышей при сжатии отмечается и в работах [19, 20].

В зависимости от технологических особенностей процессов формирования структуры и обжига ока-

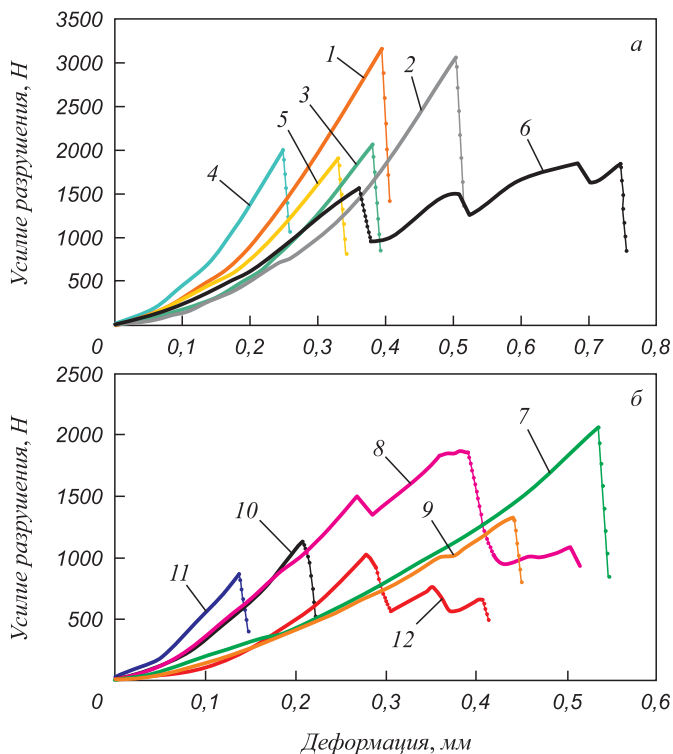


Рис. 1. Диаграммы деформирования железорудных окатышей
фракции 10 – 12 (а) и 14 – 16 мм (б)
(1 – 12 – номера образцов, см. табл. 2)

Fig. 1. Deformation diagrams of iron-ore pellets
fractions 10 – 12 (a) and 14 – 16 mm (b)
(1 – 12 – numbers of the samples from Table 2)

Результаты исследования обожженных окатышей

Table 2. Results of burned pellets investigation

Номер образца	Размер фракций, мм	Диаметр окатыша, мм	Диаметр магнетитового ядра, мм	Относительный размер магнетитового ядра, доли ед.	Усилие разрушения, Н/окатыш	Энергия разрушения, Дж	Массовая энергия разрушения, Дж/г
1	10 – 12	10,87	1,2	0,11	3160	0,45	0,156
2		10,51	1,8	0,18	3060	0,50	0,184
3		10,78	2,7	0,26	2060	0,26	0,084
4		11,18	7,6	0,69	2010	0,18	0,061
5		11,13	7,2	0,67	1910	0,23	0,080
6		11,80	7,2	0,65	1560	0,23	0,076
7	14 – 16	14,29	6,3	0,46	2060	0,45	0,081
8		13,81	7,2	0,54	1880	0,35	0,052
9		13,77	9,0	0,68	1330	0,24	0,041
10		14,39	10,4	0,73	1140	0,09	0,014
11		14,23	12,2	0,87	870	0,05	0,007
12		13,17	9,0	0,69	700	0,05	0,010

тышей окисление магнетита происходит по-разному. Наиболее существенное влияние на окисление оказывают скорость нагрева, температура обжига, состав газовой фазы и пористость окатышей. Влияние температуры и скорости нагрева окатышей на процесс их окисления является отражением энергетического и временного факторов данного процесса. В свою очередь, увеличение скорости нагрева окатышей ведет к сокращению времени активного окисления. В этой связи для получения низкозакисных окатышей необходимо осуществлять их нагрев до температур активного окисления (900 – 1000 °С), при этих температурах выдерживать окатыши до получения необходимого содержания FeO, а затем нагревать до температуры обжига. При высоких температурах окисление затормаживается развитием процесса спекания и появлением закрытых пор, что накладывает отпечаток на диффузию кислорода в пористом теле окатыша при том, что скорость диффузии ионов железа возрастает. Такое развитие процесса создает условия для проявления зональности в окатышах, когда окисление, протекающее объемно, переходит во фронтальное. Процесс окисления протекает более интенсивно в окатышах меньшего диаметра [15]. Развитие окисления со временем сопровождается равномерным уменьшением радиуса магнетитового ядра.

Анализ данных измерений диаметра магнетитовых ядер показал существенное различие их размеров (табл. 2), поэтому была поставлена задача оценки влияния величины магнетитового ядра на прочность окатышей.

На рис. 2 представлены поверхности разрушенных окатышей, на которых видно их двухзонное строение: внутренний слой – магнетитовое ядро, наружный

слой – гематитовая оболочка. Разрушение окатышей при испытаниях, как правило, происходило путем образования одной-двух трещин, лежащих в плоскостях, проходящих через центр магнетитового ядра или в непосредственной близости от него. В результате окатыш разделялся на две-три части, как это показано на рис. 2.

Такой характер разрушения определяется особенностями напряженного состояния при сжатии шара, для которого, как известно [21], характерно наличие интенсивных растягивающих нормальных напряжений к меридиональной плоскости, параллельной нагружающей силе, и проходящей через центр шара. К подобным выводам пришли авторы работ [10, 22], отметившие, что разрушение окатышей при сжатии в основном происходит по центру ядра под действием максимальных растягивающихся напряжений. На фотографиях образцов 4, 9, 12 видно, что траектория одной из разрушающих трещин отклоняется от указанной выше плоскости и огибает магнетитовое ядро. Очевидно, это связано с наличием второй области концентрации растягивающих напряжений на границе магнетитового ядра и гематитовой оболочки, сформировавшейся при охлаждении окатышей вследствие различия их механических и теплофизических свойств [17].

Значения усилия разрушения из диаграмм деформирования, результаты вычислений энергии разрушения и массовой энергии разрушения имеют существенное различие для исследованных окатышей.

На рис. 3 результаты экспериментов и вычислений представлены в виде графических зависимостей от значений относительного размера магнетитового ядра. Представленные данные показывают устойчивую

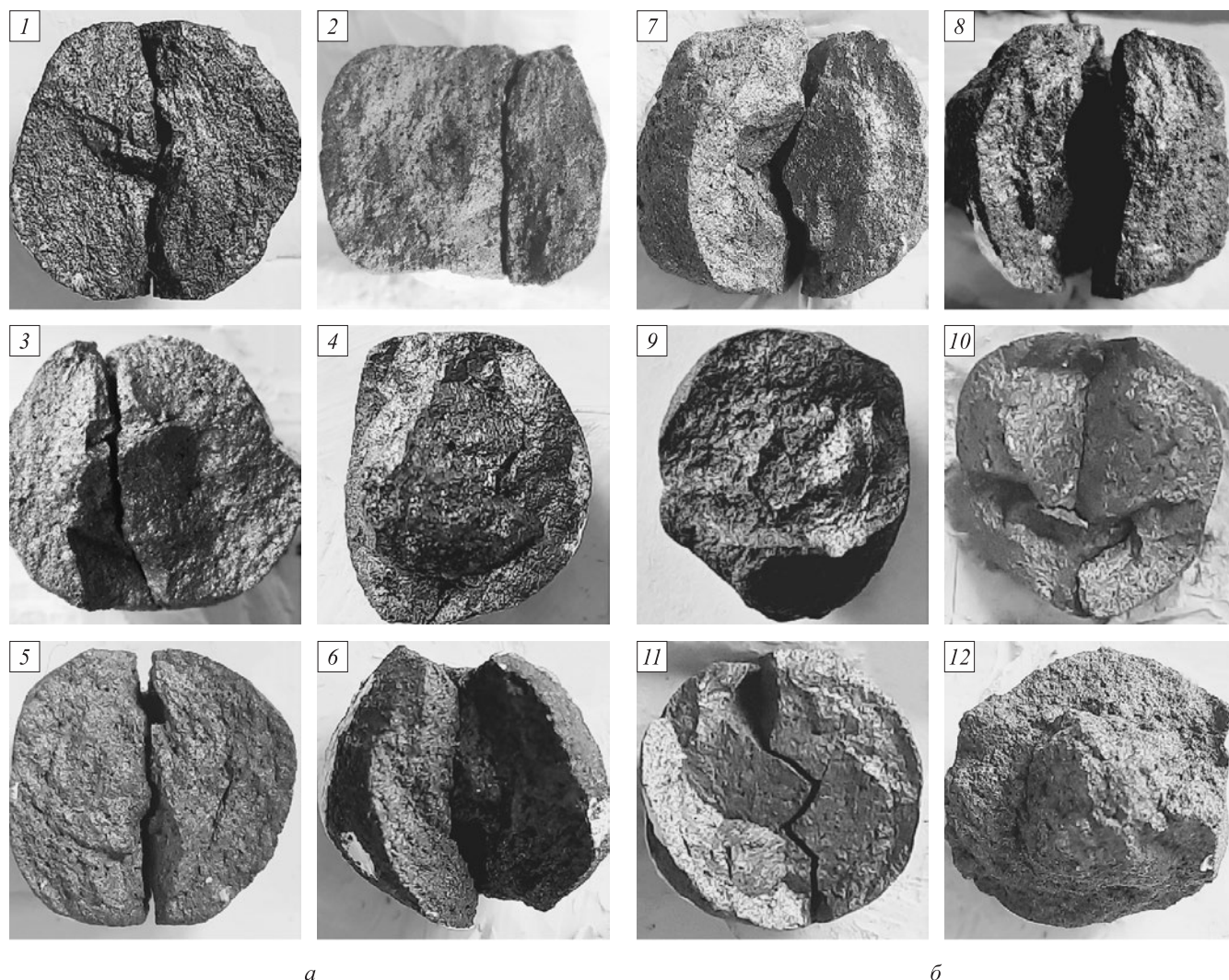


Рис. 2. Поверхности разрушения железорудных окатышей после испытаний на сжатие: фракции 10 – 12 (а) и 14 – 16 мм (б) (1 – 12 – номера образцов, см. табл. 2)

Fig. 2 Destruction surfaces of iron-ore pellets after compression tests: fractions 10 – 12 (a) and 14 – 16 mm (b) (1 – 12 – numbers of the samples from Table 2)

корреляционную связь (табл. 3) между предельными характеристиками разрушения окатышей при сжатии и величиной магнетитового ядра: чем меньше магнетитовое ядро, тем больше достигнутые в экспериментах значения усилия, энергии разрушения и массовой энергии разрушения.

Важным является факт, что построенные на рис. 3 зависимости от относительного диаметра магнетитового ядра являются общими для обеих фракций окатышей.

В табл. 3 представлены результаты линейного регрессионного анализа

Таблица 3

Результаты регрессионного анализа зависимостей

Table 3. Results of regression analysis of dependencies

Исследуемый показатель Y_i	Коэффициент линейной регрессии A_i	Коэффициент линейной регрессии B_i	Коэффициент корреляции R^2
Усилие разрушения F , Н	3327,4	–2785,5	0,7704
Энергия разрушения A_f , Дж	0,5453	–0,5304	0,6809
Массовая энергия разрушения A_m , Дж/г	0,1786	–0,1986	0,7679

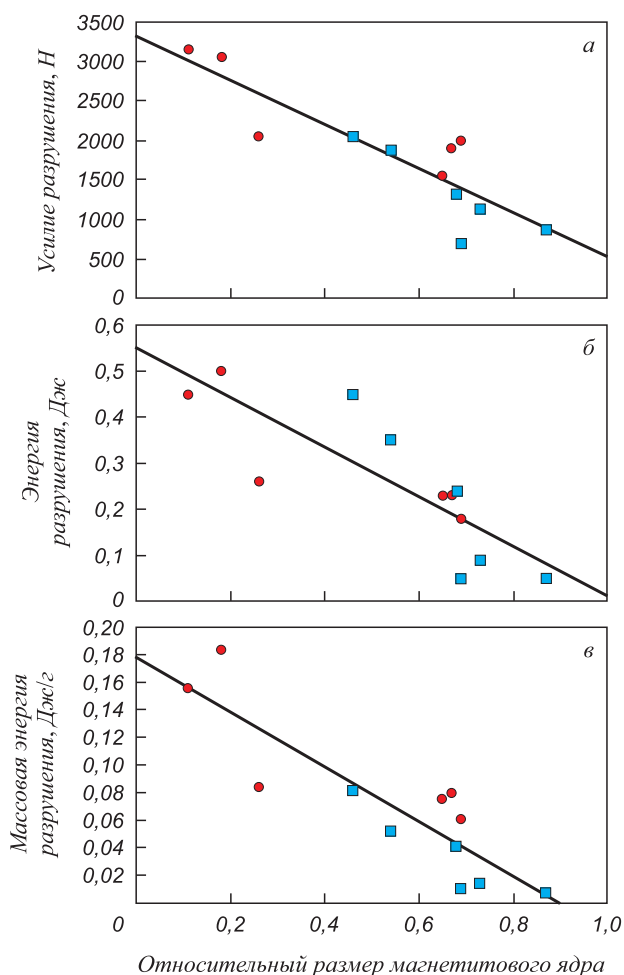


Рис. 3. Зависимость усилия разрушения (а), энергии разрушения (б) и массовой энергии разрушения (в) от относительного размера магнетитового ядра окатыша фракции 10 – 12 (●) и 14 – 16 мм (■)

Fig. 3. Dependence of destruction force (а), destructive energy (б) and mass destructive energy (в) on the relative size of magnetite core of 10 – 12 (●) and 14 – 16 mm (■) pellet fractions

$$Y_i = A_i + B_i D^*, \quad (4)$$

где Y_i – значения F , A , D^* при $i = 1, 2, 3$ соответственно; A_i , B_i – коэффициенты линейной регрессии.

Из уравнений регрессии следует, что максимальный уровень предельных характеристик окатышей, достигаемый при полном окислении магнетита по исполь-

зованной технологии (соответствует случаю $D^* = 0$), может быть следующим: $F = 3327,4$ Н; $A_f = 0,5453$ Дж; $A_m = 0,1786$ Дж/г. Таким образом окатыши, состоящие целиком из гематита, будут отвечать требованиям, предъявляемым к доменным неофлюсованным окатышам, идущим на экспорт [23]. Значения достоверности линейной аппроксимации, приведенные в табл. 3, показывают, что при прогнозировании качества окатышей по прочности на сжатие наиболее достоверным является силовой критерий (F). Однако энергетические характеристики – энергия разрушения (A_f) и массовая энергия разрушения (A_m) также успешно могут быть использованы для этих целей.

Выводы

Проанализированы поверхности разрушения железорудных окатышей при испытании на сжатие и известные в научной литературе данные по исследованию напряженного состояния. Показано, что основным видом разрушения является возникновение и развитие трещин плоскости, проходящих через центр магнетитового ядра, где действуют максимальные радиальные растягивающие напряжения, или в непосредственной близости от него. В отдельных случаях траектория одной из трещин отклоняется и огибает магнетитовое ядро. Очевидно, это связано с наличием второй области концентрации растягивающих напряжений на границе магнетитового ядра и гематитовой оболочки, сформировавшихся при охлаждении окатышей вследствие различия их механических и теплофизических свойств.

Установлено, что с уменьшением относительно-го диаметра магнетитового ядра с 0,8 до 0,2 и менее прочность окатыша на сжатие возрастает до значений, требуемых ISO 4700. Поэтому в процессе обжига необходимо стремиться к получению однородной гематитовой структуры окатышей. Проведенный анализ показал, что при этом могут быть достигнуты максимальные значения характеристик прочности на сжатие: максимальное разрушающее усилие 3300 Н, энергия разрушения 0,55 Дж, массовая энергия разрушения 0,18 Дж/г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Шумаков Н.С., Дмитриев А.Н., Гараева О.Г. Сырые материалы и топливо для доменной плавки. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 392 с.
2. Eklund N., Dahlstedt A. The choice of pellets in a mixed blast furnace burden and how it effects process conditions // Proceedings of the 14th Conf. on Hungarian Pig Iron and Steel Making. Hungary, Balatonszeplak, 2002. P. 1–14.
3. Никитченко Т.В., Тимофеева А.С., Кожухов А.А. Влияние модифицирующих добавок на формирование железорудных окатышей // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 4. С. 67–72.

1. Shumakov N.S., Dmitriev A.N., Garaeva O.G. *Raw Materials and Fuels for Blast Furnace Smelting*. Yekaterinburg: UB RAS, 2007, 392 p. (In Russ.).
2. Eklund N., Dahlstedt A. The choice of pellets in a mixed blast furnace burden and how it effects process conditions. *Proceedings of the 14th Conf. on Hungarian Pig Iron and Steel Making*. Hungary, Balatonszeplak, 2002, pp. 1–14.
3. Nikitchenko T.V., Timofeeva A.S., Kozhukhov A.A. Effect of modifying additives on the formation of iron ore pellets. *Chernaya metallurgiya. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2018, no. 4, pp. 67–72. (In Russ.).

4. Gao Q.-J., Shen F.-M., Wei G., Jiang X., Zheng H.-Y. Effects of MgO containing additive on low-temperature metallurgical properties of oxidized pellet // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2013. Vol. 20. No. 7. P. 25–28. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(13\)60121-1](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(13)60121-1)
5. Gustafsson G., Häggblad H.-A., Nishida M., Larsson S., Jonsén P. Fracture probability modelling of impact-loaded iron ore pellets // *International Journal of Impact Engineering*. 2017. Vol. 102. P. 180–186. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.12.014>
6. Gustafsson G., Häggblad H.-A., Jonsén P. Multi-particle finite element modelling of the compression of iron ore pellets with statistically distributed geometric and material data // *Powder Technology*. 2013. Vol. 239. P. 231–238. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2013.02.005>
7. Gustafsson G., Häggblad H.-A., Jonsén P. Characterization modeling and validation of a two-point loaded iron ore pellet // *Powder Technology*. 2013. Vol. 235. P. 126–135. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2012.10.003>
8. Tavares L.M., Cavalcanti P.P., de Carvalho R.M., da Silveira M.W., Bianchi M., Otaviano M. Fracture probability and fragment size distribution of fired Iron ore pellets by impact // *Powder Technology*. 2018. Vol. 336. P. 546–554. <http://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.06.036>
9. Юрьев Б.П., Гольцев В.А. Исследование процесса окисления магнетита // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2016. Т. 59. № 10. С. 735–739. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-10-735-739>
10. Горбачев В.А., Абзалов В.М., Юрьев Б.П. Кристаллохимическое превращение магнетита в гематит в железорудных окатышах // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2007. № 4. С. 27–30.
11. Yur'ev B.P., Dudko V.A. Optimization of the iron-ore pellet annealing process on conveyor machines considering the layer's physicochemical process run // *Steel in Translation*. 2020. Vol. 50. No. 9. P. 611–617. <http://doi.org/10.3103/S0967091220090119>
12. Малышева Т.Я., Юсфин Ю.С., Плотноков С.В. Влияние щелочей на механизм упрочнения окатышей из концентратов руд железистых кварцитов // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2011. № 11. С. 15–19.
13. Dwarapudi S., Devi T.U., Mohan R.S., Ranjan M. Influence of pellet size on quality and microstructure of iron ore pellets // *ISIJ International*. 2008. Vol. 48. No. 6. P. 768–776. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.48.768>
14. Umadevi T., Kumar P., Lobo N.F., Prabhu M., Mahapatra P.C., Ranjan M. Influence of pellet basicity (CaO/SiO₂) on iron ore pellet properties and microstructure // *ISIJ International*. 2011. Vol. 51. No. 1. P. 14–20. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.14>
15. Физико-химические и теплотехнические основы производства железорудных окатышей / В.М. Абзалов, В.А. Горбачев, С.Н. Евстюгин, В.И. Клейн, Л.И. Леонтьев, Б.П. Юрьев. Екатеринбург: МИЦ, 2015. 335 с.
16. Gao Q.-J., Shen Y.-S., Jiang X., Zheng X.-Y., Shen F.-M., Liu C.-S. Effect of MgO on oxidation process of Fe₃O₄ in pellets // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2016. Vol. 23. No. 10. P. 1007–1011. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(16\)30151-0](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(16)30151-0)
17. Меламуд С.Г., Юрьев Б.П. Методика расчета напряжений в обожженных железорудных окатышах при их охлаждении // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2015. Т. 58. № 12. P. 865–870. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-12-865-870>
18. ISO 4700. Iron ore pellets for blast furnace and direct reduction feed stocks. Determination of the Crushing Strength. Switzerland: International Organization for Standardization, 2015. 5 p.
19. Cavalcanti P.P., Tavares L.M. Statistical analysis of fracture characteristics of industrial iron ore pellets // *Powder Technology*. 2018. Vol. 325. P. 659–668. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.11.062>
20. Cavalcanti P.P., Tavares L.M. Static and dynamic compressive loading offered iron ore pellets // *Powder Technology*. 2019. Vol. 354. P. 281–288. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.06.006>
21. Лурье А.И. Теория упругости. М.: Наука, 1970. 939 с.
4. Gao Q.-J., Shen F.-M., Wei G., Jiang X., Zheng H.-Y. Effects of MgO containing additive on low-temperature metallurgical properties of oxidized pellet. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2013, vol. 20, no. 7, pp. 25–28. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(13\)60121-1](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(13)60121-1)
5. Gustafsson G., Häggblad H.-A., Nishida M., Larsson S., Jonsén P. Fracture probability modelling of impact-loaded iron ore pellets. *International Journal of Impact Engineering*. 2017, vol. 102, pp. 180–186. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.12.014>
6. Gustafsson G., Häggblad H.-A., Jonsén P. Multi-particle finite element modelling of the compression of iron ore pellets with statistically distributed geometric and material data. *Powder Technology*. 2013, vol. 239, pp. 231–238. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2013.02.005>
7. Gustafsson G., Häggblad H.-A., Jonsén P. Characterization modeling and validation of a two-point loaded iron ore pellet. *Powder Technology*. 2013, vol. 235, pp. 126–135. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2012.10.003>
8. Tavares L.M., Cavalcanti P.P., de Carvalho R.M., da Silveira M.W., Bianchi M., Otaviano M. Fracture probability and fragment size distribution of fired Iron ore pellets by impact. *Powder Technology*. 2018, vol. 336, pp. 546–554. <http://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.06.036>
9. Yur'ev B.P., Gol'tsev V.A. Study of the magnetite oxidation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 10, pp. 735–739. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-10-735-739>
10. Gorbachev V.A., Abzalov V.M., Yur'ev B.P. Conversion of magnetite to hematite in iron-ore pellets. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2007, no. 4, pp. 27–30. (In Russ.).
11. Yur'ev B.P., Dudko V.A. Optimization of the iron-ore pellet annealing process on conveyor machines considering the layer's physicochemical process run. *Steel in Translation*. 2020, vol. 50, no. 9, pp. 611–617. <http://doi.org/10.3103/S0967091220090119>
12. Malysheva T.Ya., Yusfin Yu.S., Plotnikov S.V. Alkalies influence on hardening mechanism of pellets made from quartzite concentrating ore. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 11, pp. 15–19. (In Russ.).
13. Dwarapudi S., Devi T.U., Mohan R.S., Ranjan M. Influence of pellet size on quality and microstructure of iron ore pellets. *ISIJ International*. 2008, vol. 48, no. 6, pp. 768–776. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.48.768>
14. Umadevi T., Kumar P., Lobo N.F., Prabhu M., Mahapatra P.C., Ranjan M. Influence of pellet basicity (CaO/SiO₂) on iron ore pellet properties and microstructure. *ISIJ International*. 2011, vol. 51, no. 1, pp. 14–20. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.14>
15. Abzalov V.M., Gorbachev V.A., Evstyugin S.N., Klein V.I., Leont'ev L.I., Yur'ev B.P. *Physical, Chemical and Thermal Fundamentals of Iron-Ore Pellet Production*. Yekaterinburg: MITs, 2015. 335 p. (In Russ.).
16. Gao Q.-J., Shen Y.-S., Jiang X., Zheng X.-Y., Shen F.-M., Liu C.-S. Effect of MgO on oxidation process of Fe₃O₄ in pellets. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2016, vol. 23, no. 10, pp. 1007–1011. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(16\)30151-0](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(16)30151-0)
17. Melamud S.G., Yur'ev B.P. Calculation methods of tensions in burnt iron-ore pellets at their cooling. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, vol. 58, no. 12, pp. 865–870. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-12-865-870>
18. ISO 4700. *Iron ore pellets for blast furnace and direct reduction feed stocks. Determination of the Crushing Strength*. Switzerland: International Organization for Standardization, 2015. 5 p.
19. Cavalcanti P.P., Tavares L.M. Statistical analysis of fracture characteristics of industrial iron ore pellets. *Powder Technology*. 2018, vol. 325, pp. 659–668. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.11.062>
20. Cavalcanti P.P., Tavares L.M. Static and dynamic compressive loading offered iron ore pellets. *Powder Technology*. 2019, vol. 354, pp. 281–288. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.06.006>
21. Lur'e A.I. *Theory of Elasticity*. Moscow: Nauka, 1970. 939 p. (In Russ.).

22. Rolland S.A., Gethin D.T., Lewis R.W., Tweed J.H. Characterization of powders in low pressure region of yield surface // *Powder Metallurgy*. 2010. Vol. 53. No. 4. P. 340–351.
<http://doi.org/10.1179/003258910X12680382874526>
23. Исмагилов Р.И., Эфиндиев Н.Т., Пузаков П.В., Шарковский Д.О., Поколенко А.Ю., Стародумов А.В., Лавриненко А.А. Разработка технологий производства различных видов высококачественных окатышей // *Сталь*. 2020. № 3. С. 15–18.
22. Rolland S.A., Gethin D.T., Lewis R.W., Tweed J.H. Characterization of powders in low pressure region of yield surface. *Powder Metallurgy*. 2010, vol. 53, no. 4, pp. 340–351.
<http://doi.org/10.1179/003258910X12680382874526>
23. Ismagilov R.I., Efindiev N.T., Puzakov P.V., Sharkovskii D.O., Pokolenko A.Yu., Starodumov A.V., Lavrinenko A.A. Developing technologies for the production of different types of high-quality pellets. *Stal'*. 2020, no. 3, pp. 15–18. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Андрей Николаевич Дмитриев, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории пирометаллургии восстановительных процессов, Институт металлургии УрО РАН
ORCID: 0000-0001-6446-0215
E-mail: andrey.dmitriev@mail.ru

Andrei N. Dmitriev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the Laboratory of Pyrometallurgy of Reduction Processes, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science
ORCID: 0000-0001-6446-0215
E-mail: andrey.dmitriev@mail.ru

Валентина Григорьевна Смирнова, ведущий инженер лаборатории пирометаллургии восстановительных процессов, Институт металлургии УрО РАН
ORCID: 0000-0002-2285-2509
E-mail: metallography@mail.ru

Valentina G. Smirnova, Leading Engineer of the Laboratory of Pyrometallurgy of Reduction Processes, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science
ORCID: 0000-0002-2285-2509
E-mail: metallography@mail.ru

Елена Александровна Вязникова, младший научный сотрудник лаборатории пирометаллургии восстановительных процессов, Институт металлургии УрО РАН
ORCID: 0000-0003-2754-1846
E-mail: vjaznikova@mail.ru

Elena A. Vyaznikova, Junior Researcher of the Laboratory of Pyrometallurgy of Reduction Processes, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science
ORCID: 0000-0003-2754-1846
E-mail: vjaznikova@mail.ru

Алексей Владимирович Долматов, к.х.н., ученый секретарь, старший научный сотрудник лаборатории металлургических расплавов, Институт металлургии УрО РАН
ORCID: 0000-0002-6632-9533
E-mail: dolmatov.imet@gmail.com

Aleksei V. Dolmatov, Cand. Sci. (Chem.), Scientific Secretary, Senior Researcher of the Laboratory of Metallurgical Melts, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science
ORCID: 0000-0002-6632-9533
E-mail: dolmatov.imet@gmail.com

Галина Юрьевна Витькина, к.т.н., старший научный сотрудник, заведующая лабораторией пирометаллургии восстановительных процессов, Институт металлургии УрО РАН
ORCID: 0000-0002-1076-2709
E-mail: 20procents@mail.ru

Galina Yu. Vit'kina, Cand. Sci. (Eng.), Senior Research, Head of the Laboratory of Pyrometallurgy of Reduction Processes, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science
ORCID: 0000-0002-1076-2709
E-mail: 20procents@mail.ru

ВКЛАД АВТОРОВ:

Дмитриев А.Н. – научное руководство, формирование основной концепции, цели и задачи исследования.

Смирнова В.Г. – написание текста рукописи, получение и анализ данных, обзор публикаций по теме статьи, получение данных для анализа.

Вязникова Е.А. – получение данных для анализа.

Долматов А.В. – получение данных для анализа.

Витькина Г.Ю. – визуализация результатов исследований, доработка текста.

Поступила в редакцию 02.07.2021

После доработки 19.08.2021

Принята к публикации 28.06.2021

Received 02.07.2021

Revised 19.08.2021

Accepted 28.06.2021