



УДК 620.173:539.4.015:622.78

DOI 10.17073/0368-0797-2023-6-696-704



Оригинальная статья

Original article

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ НЕОФЛЮСОВАННЫХ ОБОЖЖЕННЫХ ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ ОКАТЫШЕЙ НА ИХ ПРОЧНОСТЬ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ СЖАТИИ

А. Н. Дмитриев¹, В. Г. Смирнова¹, Е. А. Вязникова¹,
Г. Ю. Витькина¹ , А. С. Смирнов²

¹ Институт металлургии Уральского отделения РАН (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

² Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения РАН (Россия, 620049, Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34)

20procents@mail.ru

Аннотация. Обожженные окатыши должны сохранять прочность от момента схода с обжиговой машины до загрузки в доменную печь. Одним из показателей прочности обожженных окатышей является прочность на сжатие, то есть усилие при разрушении. При испытании окатышей на прочность на сжатие основным видом разрушения является возникновение и развитие трещин, проходящих через центр ядра окатышей (где действуют максимальные радиальные растягивающие напряжения) или в непосредственной близости от него. Представлены требования по прочности на статическое сжатие, предъявляемые при доменном производстве к железорудным окатышам. С использованием оптического и сканирующего электронного микроскопа, оснащенного энергодисперсионным микроанализатором, проанализировали связь структурных составляющих и пор в ядре обожженных неофлюсованных железорудных титаномагнетитовых окатышей с усилием разрушения при статическом сжатии. Методом сканирующей электронной микроскопии и рентгенспектрального микроанализа установили, что ядро окатышей является многофазным материалом. Основные фазы – титаномагнетит, магнетит, титаногематит, гематит и алюмосиликатное связующее. Оптическая микроскопия позволила установить микроструктуру ядра окатышей. Возможны три типа микроструктуры: неоокисленное ядро (магнетит или титаномагнетит), частично окисленное ядро – вокруг (магнетита или титаномагнетита) зерна гематита (титаногематита) и окисленное ядро (гематит и титаногематит). Определяющими факторами для получения окатышей с усилием разрушения более 2,5 кН/окатыш по требованиям доменного производства являются: количество закрытых макропор в ядре и количество зерен крупных размеров в ядре. При увеличении количества закрытых макропор и количества зерен крупных размеров в ядре снижается усилие разрушения от 3,50 до 0,87 кН/окатыш.

Ключевые слова: неофлюсованные окатыши, титаномагнетит, магнетит, гематит, титаногематит, алюмосиликатное связующее, микроструктура ядра, усилие разрушения, закрытые поры

Благодарности: Работа выполнена в рамках реализации Государственного задания ИМЕТ Уральского отделения РАН (№ 122020100125-6) с использованием оборудования ЦКП «Урал-М» ИМЕТ Уральского отделения РАН и ЦКП «Пластометрия» ИМАШ Уральского отделения РАН.

Для цитирования: Дмитриев А.Н., Смирнова В.Г., Вязникова Е.А., Витькина Г.Ю., Смирнов А.С. Влияние структуры неофлюсованных обожженных титаномагнетитовых окатышей на их прочность при статическом сжатии. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2023;66(6): 696–704. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-6-696-704>

EFFECT OF STRUCTURE OF UNFLUXED BURNT TITANOMAGNETITE PELLETS ON STRENGTH UNDER STATIC COMPRESSION

A. N. Dmitriev¹, V. G. Smirnova¹, E. A. Vyaznikova¹,
G. Yu. Vit'kina¹ , A. S. Smirnov²

¹ Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (101 Amundsen Str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)

² E.S. Gorkunov Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (34 Komsomolskaya Str., Yekaterinburg 620049, Russian Federation)

 20procents@mail.ru

Abstract. Burnt pellets must retain their strength from the moment they are taken out of an induration machine until they are loaded into a blast furnace. One of the indicators of the burnt pellets' strength is the compressive strength, i.e. the ultimate force. In experiments to determine compressive strength, the main type of fracture is occurrence and development of cracks that pass through the core center of pellets (where the maximum radial tensile stresses present) or near it. The paper presents the requirements for static compression strength imposed by blast furnace production to iron ore pellets. Using an optical and scanning electron microscope equipped with an energy-dispersive microanalyzer, we analyzed the relationship of structural components and pores in the core of burnt unfluxed iron ore titanomagnetite pellets with the ultimate force under static compression. By scanning electron microscopy and X-ray spectral microanalysis, it was established that the core of pellets is a multiphase material, and its main phases are titanomagnetite, magnetite, titanohematite, hematite and aluminosilicate binder. Optical microscopy made it possible to establish the microstructure of the pellet core, which has three types of microstructures: non-oxidized core (magnetite or titanomagnetite), partially oxidized core – around (magnetite or titanomagnetite) hematite grains (titanohematite) and oxidized core (hematite and titanohematite). The main factors for obtaining pellets with an ultimate force of more than 2.5 kN/pellet according to the requirements of blast furnace production are: the number of closed macropores and the number of large grains in the core. It is shown that with an increase in the number of closed macropores and the number of large grains in the core, the ultimate force is reduced from 3.5 kN to 0.87 kN/pellet.

Keywords: unfluxed pellets, titanomagnetite, magnetite, titanohematite, hematite, aluminosilicate binder, core microstructure, ultimate force, closed pores

Acknowledgements: The research was supported by the State Task of the Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (122020100125-6) using the equipment of the Center for Collective Use “Ural-M” of the Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences and the Research Center “Plastometry” of the E.S. Gorkunov Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Dmitriev A.N., Smirnova V.G., Vyaznikova E.A., Vit'kina G.Yu., Smirnov A.S. Effect of structure of unfluxed burnt titanomagnetite pellets on strength under static compression. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(6):697–704.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-6-697-704>

ВВЕДЕНИЕ

Железорудные окатыши являются важным сырьем при выплавке чугуна в доменных печах. На предприятиях России и за рубежом производство окатышей представляет собой комбинацию двух взаимосвязанных процессов: формирование сырых окатышей и их упрочнение. Сырые окатыши подвергают обжигу с целью достижения необходимых металлургических характеристик (прочность на сжатие, удар, истирание и прочность при восстановлении). В целях улучшения процесса окомкования и получения прочных окатышей к тонкоизмельченному концентрату добавляют 0,5 – 1,0 % бентонита [1; 2]. Бентонит, в основном, состоит из оксидов алюминия и кремния, обладающих высокой влагопоглощающей способностью [3 – 5]. Бентонит является наиболее распространенным связующим для железорудных окатышей [5 – 7]. Сырые окатыши подвергают окислительному обжигу на конвейерных обжиговых машинах для упрочнения. В работах [8 – 10] отмечается, что в диапазоне температур 200 – 1300 °C происходит удаление влаги, окисление частиц магнетита, спекание зерен магнетита или гематита, формирование пор и силикатной связки, в результате чего повышаются прочностные характеристики окатышей. При удалении влаги бентонит образует твердые перемишки алюмосиликата, которые придают упрочнение [11; 12].

Завершение процессов окисления означает получение равномерной структуры окатышей [9]. В работе [13] установлено, что определяющим фактором интенсивности процесса окисления является не общая пористость, а размер пор. Именно больший размер пор у окатышей с меньшей удельной поверхностью

концентрата обуславливает их лучшую окисляемость. Это относится к периоду окисления, когда этот процесс определяется, в основном, диффузией кислорода в порах окатыша. В дальнейшем, при образовании пленки гематита на зернах, превращение будет зависеть от размера зерен концентрата.

Окисление магнетита в окатышах проходит по трем различным вариантам: полное окисление по всему сечению окатыша; полное окисление оболочки и неокисленное ядро; частичное окисление оболочки и неокисленное ядро [14]. В работе [15] предполагают, что обогащение кислородом в газовой атмосфере при непрерывном нагреве магнетитовых окатышей может привести к окислению окатышей по всему их объему, устраняя неокисленные ядра. Особенности кинетики окисления магнетитового концентрата предполагают, что такое обогащение кислородом может быть особенно эффективным при более низких температурах. В работе [16] установлено, что при температуре от 700 до 800 °C при 21 % O₂ или путем повышения содержания кислорода до 60 или 100 % при температуре 800 °C можно добиться полного окисления по всему сечению окатыша. В работе [17] предложена формула для расчета скорости реакции окисления в зависимости от температуры и парциального давления кислорода в газовой фазе. В работе [18] обнаружены нитевидные кристаллы гематита на окисленной поверхности частиц магнетитового концентрата в диапазоне температур от 800 до 950 °C. Толщина нитевидных кристаллов увеличилась с 30 нм при температуре 800 °C до 200 нм при 950 °C. Нитевидные кристаллы действуют как мостики между частицами концентрата во время окислительного обжига окатышей, способствуя увеличению их прочности.

В работе [19] считают, что когда частица начинает окисляться, вокруг нее образуется оболочка из гематита, в то время как сердцевина все еще остается магнетитовой. При температуре 1100 °С скорость диффузии кислорода была ограничена спеканием в магнетитовой сердцевине, происходящим после окисления, а не скоростью диффузии кислорода через окисленную гематитовую оболочку, как утверждалось в более ранних работах. Скорость окисления была максимальной при температуре примерно 1100 °С. Она существенно снижается при 1200 °С, поскольку как гематитовая оболочка, так и магнетитовая сердцевина спекаются при этой температуре. В работе [20] показано, что упрочнение железорудного окатыша вследствие процесса спекания начинается при 1100 °С. Увеличение прочности окатышей на сжатие зависит от температуры нагрева, влияние структуры не рассматривается.

Одной из важных металлургических характеристик окатышей является их прочность на сжатие. В соответствии с ГОСТ 24765 – 81 на горно-обогаительных комбинатах, производящих окатыши, результаты испытаний на сжатие используют для оценки качества продукции. Требования к окатышам на большинстве фабрик окомкования: прочность на статическое сжатие 2,0 кН/окатыш. В доменном производстве прочность на статическое сжатие должна быть более 2,5 кН/окатыш [21 – 23].

Проблема целостности окатышей при механическом воздействии привлекает многих исследователей, которые для прогнозирования разрушения используют аналитические, численные и экспериментальные подходы к исследованию. В соответствии с результатами математического моделирования [24; 25], наиболее неблагоприятное напряженное состояние при сжатии окатышей сферической формы возникает в центре за счет действия интенсивных растягивающих радиальных напряжений. Именно поэтому в качестве меры для оценки прочности окатышей обычно используют разрушающее усилие при испытаниях на сжатие. Проведенное в работе [26] исследование показало, что при испытании на статическое сжатие основным видом разрушения является возникновение и развитие трещин, проходящих через центр магнетитового ядра, где действуют максимальные радиальные растягивающие напряжения, или в непосредственной близости от него. Было установлено, что для окатышей как фракции 10 – 12 мм, так и фракции 14 – 16 мм имеет место общая закономерность: чем больше относительный размер магнетитового ядра, тем меньше усилие разрушения [26].

В научно-технической литературе отсутствуют сведения о влиянии структуры ядра на прочность окатышей.

Целью настоящей работы является проведение комплексных исследований структурных составляющих (магнетит, титаномагнетит, гематит, титаногематит,

алюмосиликат) и пор в ядре обожженных неофлюсованных титаномагнетитовых окатышей и определение связи усилия разрушения при статическом сжатии со структурой ядра окатышей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для установления связи структуры окатышей с их прочностью на сжатие были исследованы 13 обожженных неофлюсованных титаномагнетитовых окатышей фракции 10 – 16 мм. Окатыши обработаны по базовому температурно-временному режиму обжига АО «ЕВРАЗ КГОК». Окатыши были испытаны в соответствии с требованиями ISO 4700 на универсальной машине BT1-FR050THW.A1K (Zwick GmbH, Германия) при скорости перемещения бойков 10 мм/мин с записью диаграммы деформирования. Общее содержание железа ($Fe_{общ}$) в окатышах определяли методом титриметрии по ГОСТ 32517.1, FeO – по ГОСТ 53657. Химический анализ соединений CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , MgO, TiO_2 , V_2O_5 осуществляли атомно-эмиссионным методом с индуктивно-связанной плазмой с использованием прибора SpectroBlue (Spectro, Германия). Химический состав исследуемых окатышей следующий, % (по массе): $Fe_{общ}$ 60,90; FeO 3,02; CaO 1,00; SiO_2 3,89; Al_2O_3 2,83; MgO 2,59; TiO_2 2,73; V_2O_5 0,59.

По излому окатышей изготавливали микрошлифы.

Металлографическое исследование проводили на оптическом микроскопе Neophot-2. Полученные изображения анализировали с помощью программного обеспечения Siam-700. На изображениях измеряли размер зерен, размер закрытых макропор и размер связующей фазы в ядре. Измерения проводили на пяти полях зрения, на которых проведено 20 отрезков. Для определения доли фазы, закрытых макропор и связующей фазы использовали линейный метод на основе принципа Кавальери–Акера [27]. Размер зерен определяли по ГОСТ Р ИСО 643 – 2015, при этом использовали условную классификацию номера фазы: 3 – 8 (крупные), 9 (средние), 10 (мелкие), 11 и выше (очень мелкие). При определении закрытых и открытых пор использовали следующую терминологию [28]: закрытые поры находятся внутри образца и полностью изолированы от соседних; открытые поры имеют открытый канал сообщения с внешней поверхностью тела. Размер пор оценивали, измеряя их максимальный размер в двух перпендикулярных направлениях. Разделение пор по размерам осуществляли по следующим признакам [29]: макропоры – диаметром $d_n > 20$ мкм; мезопоры – $20 \geq d_n \geq 0,2$ мкм; микропоры – $d_n < 0,2$ мкм.

Рентгенофазовый анализ (РФА) выполнен на дифрактометре Shimadzu XRD-7000, оснащенном рентгеновской трубкой в CuK_α -излучении на воздухе в диапазоне 2θ от 10 до 85°. Для идентифицирования и определения количества фаз использовали базу данных PDF 4 (International Centre For Diffraction Data).

Рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) фаз проводили на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega II, оснащённом энергодисперсионным микроанализатором Oxford INCA ENERGY 450.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На оптическом микроскопе в микроструктуре ядра окатышей были обнаружены структуры, которые можно подразделить на три типа: 1 (табл. 1, образцы 1, 3, 4, 5, 9, 10, 11) – неокисленное ядро – магнетит или титаномагнетит; 2 (табл. 1, образцы 2, 6, 7, 8, 12) – частично окисленное ядро – вокруг магнетита или титаномагнетита зерна гематита или титаногематита; 3 (табл. 1, образец 13) – окисленное ядро – гематит или титаногематит.

Методом РФА в окатышах были обнаружены следующие фазы: гематит, магнетит, кварц, силикат магния и диоксид железистый. Уточнить состав фаз стало возможно только с использованием РСМА, так как на дифрактограммах, полученных методом РФА, рефлексы «гематит» и «титаногематит», «магнетит» и «титаномагнетит» накладываются (полное совпадение соотношения линий интенсивности, углов 2θ межплоскостных расстояний от рефлексов с данными ICDD PDF 4 (International Centre For Diffraction Data)).

Результаты РСМА (рис. 1, табл. 2) показали, что ядро окатышей состоит из следующих фаз:

– тип 1: фаза в точке 1 – титаномагнетит (70,3 % Fe; 0,4 % Ti); фаза в точке 2 – алюмосиликатное связующее состава, % (по массе): FeO 19,28; SiO₂ 45,95;

Таблица 1

Результаты измерения усилия разрушения окатышей на сжатие в зависимости от их размера

Table 1. Results of measuring the ultimate compressive force of pellets depending on their size

Номер образца	Фракция, мм	Усилие разрушения, кН/окатыш
1	10 – 12	3,16
2		3,06
3		2,59
4		2,06
5		2,01
6		1,91
7		1,56
8	14 – 16	2,06
9		1,88
10		1,33
11		1,14
12		0,87
13		0,70

CaO 14,7; Al₂O₃ 13,8; MgO 2,14; фаза в точке 3 – магнетит (72,03 % Fe);

– тип 2: фаза в точке 1 – титаногематит (67,1 % Fe; 1,4 % Ti); фаза в точке 2 – алюмосиликатное связующее состава, % (по массе): FeO 26,0; SiO₂ 40,4; CaO 12,9; Al₂O₃ 12,2; MgO 8,9; фаза в точке 3 – гематит (60,86 % Fe);

– тип 3: фаза в точке 1 – титаногематит (67,5 % Fe; 1,9 % Ti); фаза в точке 2 – алюмосиликатное связующее состава, % (по массе): FeO 60,9; SiO₂ 23,53; CaO 5,6; Al₂O₃ 5,67; MgO 1,3.

Микроструктура неокисленного ядра тип 1 (рис. 2, а) состоит из зерен магнетита и титаномагнетита (1), которые разделены алюмосиликатным связующим (2) и закрытыми порами (3), имеющими сферическую или близкую к ней форму различного размера. Зерна магнетита или титаномагнетита соединены между собой, образуя при спекании магнетитовый или титаномагнетитовый поверхностный контакт (4). Микроструктура

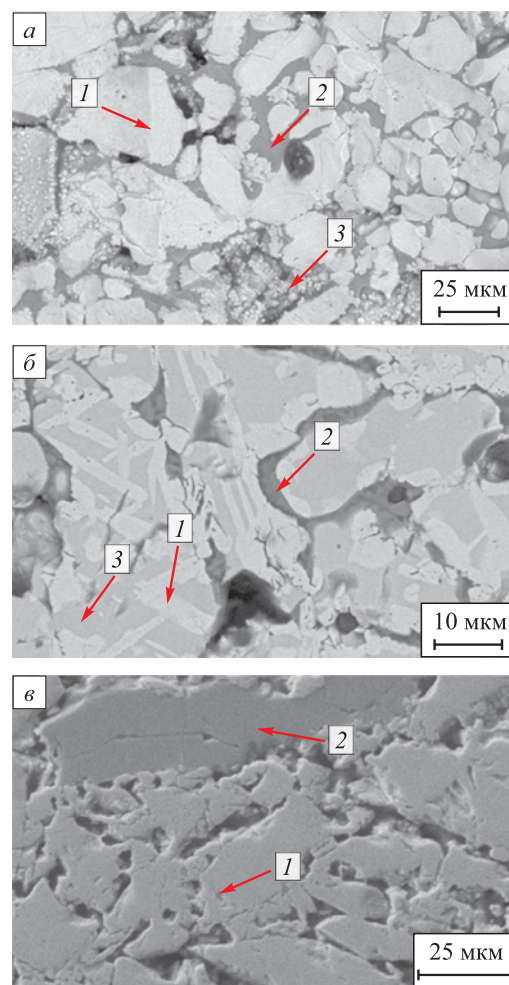


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение структуры ядра окатышей в плоскости действия силы: а – в – тип 1 – 3

Fig. 1. Electron microscopic image of the pellets' core structure in the plane of ultimate action: а – в – type 1 – 3

Результаты рентгеноспектрального микроанализа окатышей

Table 2. Results of X-ray microspectral analysis of the pellets

Точки	Содержание элементов, % (по массе), в области анализа									
	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ti	Ca	Fe	V
Тип 1										
1	27,00	–	1,2	1,10	–	–	0,4	–	70,30	–
2	50,44	1,2	1,2	7,19	21,48	0,9	–	10,49	7,10	–
3	25,07	–	1,1	1,20	0,60	–	–	–	72,03	–
Тип 2										
1	28,70	–	1,2	0,90	0,70	–	1,4	–	67,10	–
2	37,14	–	5,4	6,51	18,92	–	–	9,31	20,22	2,5
3	29,64	–	7,1	1,70	0,70	–	–	–	60,86	–
Тип 3										
1	28,70	–	0,4	1,00	–	–	1,9	–	67,50	0,5
2	28,70	0,4	2,0	3,00	11,00	0,1	0,8	4,00	49,50	0,5

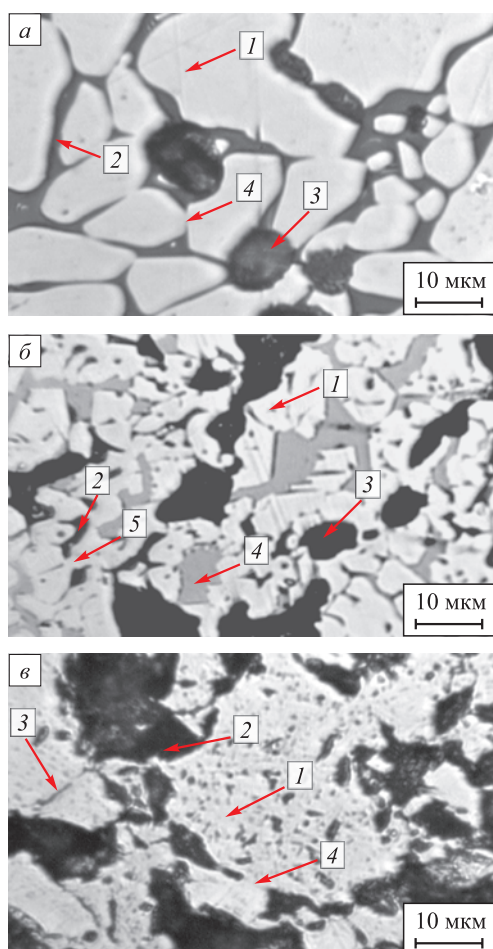


Рис. 2. Типичные микроструктуры ядра окатышей в плоскости действия силы:
а – в – тип 1 – 3

Fig. 2. Typical microstructures of the pellet core in the plane of ultimate action:
а – в – type 1 – 3

частично окисленного ядра (тип 2) (рис. 2, б) – связанные между собой структурные составляющие гематита и титаногематита (1), титаномagnetита и магнетита (4) и алюмосиликатного связующего (2). Оболочки зерен, состоящие из гематита (титаногематита), соединены между собой, образуя при спекании гематитовый (титаногематитовый) поверхностный контакт (5). Некоторые зерна разделены закрытыми порами (3). Микроструктура окисленного ядра тип 3 (рис. 2, в) состоит из зерен титаногематита и гематита (1), которые разделены открытыми порами сложной формы (2), представляющими собой чередование узких каналов с резкими раздуваниями, алюмосиликатным связующим (3). Зерна гематита (титаногематита), соединены между собой, образуют при спекании гематитовый (титаногематитовый) поверхностный контакт (4).

Сравнение результатов работ [15 – 20] и полученной микроструктуры ядра позволили предположить, что окисление магнетита (титаномagnetита) окатышей типа 1 происходило в интервале температур 700 – 900 °С, типа 2 – 400 – 600 °С, а типа 3 – 200 – 400 °С.

На рис. 3 – 5 результаты исследований и вычислений представлены в виде графических зависимостей от усилия разрушения.

На рис. 3 показаны зависимости усилия разрушения от среднего размера: зерна магнетита (титаномagnetита), гематита (титаногематита), закрытых макропор и алюмосиликатного связующего в ядрах окатышей. При анализе полученных зависимостей считали, что имеется устойчивая корреляционная связь (коэффициент корреляции $R^2 > 0,7$). Из рис. 3, а видно, что при средних размерах магнетита (титаномagnetита) 10 – 15 мкм, закрытых макропор 12 – 15 мкм, алюмо-

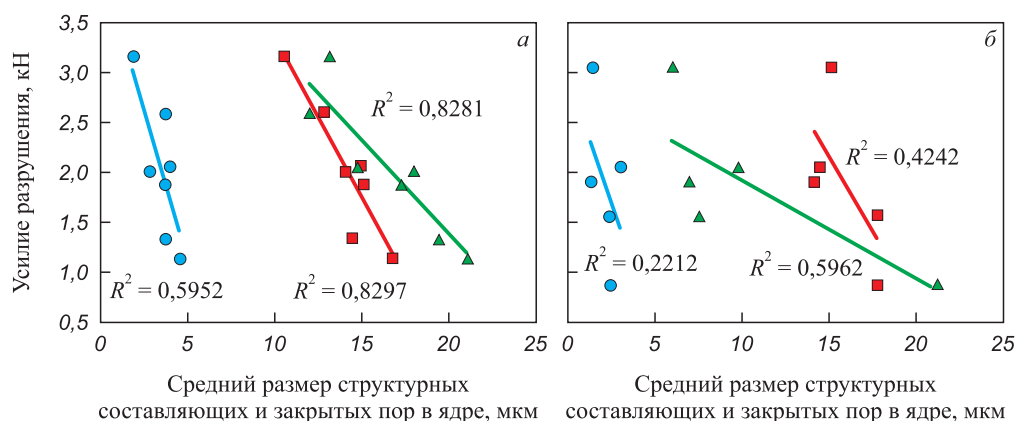


Рис. 3. Влияние среднего размера структурных составляющих в ядре окатыша на усилие разрушения: *a* и *б* – тип 1 и 2; ■ – магнетит (титаномagnetит); ▲ – закрытые макропоры; ● – алюмосиликатное связующее

Fig. 3. Effect of the average grain structural components in the core on the ultimate force: *a* and *б* – type 1 and 2; ■ – magnetite (titanomagnetite); ▲ – closed pores; ● – aluminosilicate binder

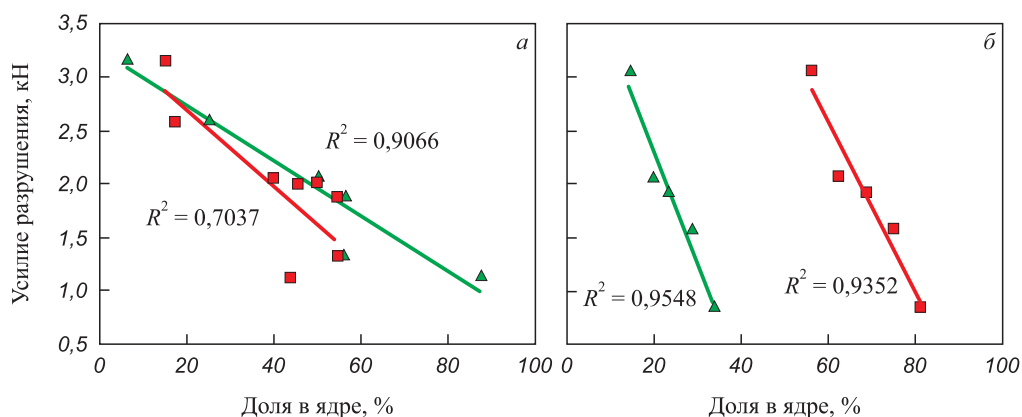


Рис. 4. Влияние доли зерен крупных размеров и закрытых макропор в ядре окатыша на усилие разрушения: *a* и *б* – тип 1 и 2; ■ – магнетит (титаномagnetит); ▲ – закрытые макропоры

Fig. 4. Effect of the fraction of large grains and closed macropores in the core on the ultimate force: *a* and *б* – type 1 and 2; ■ – magnetite (titanomagnetite); ▲ – closed macropores

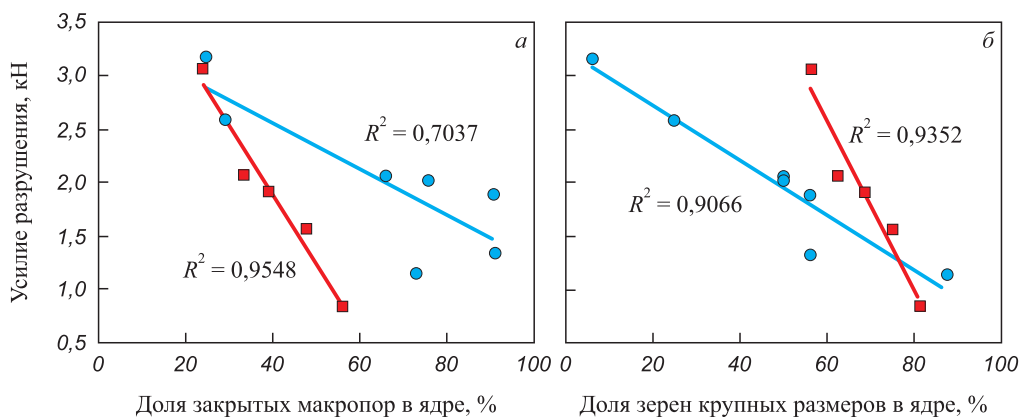


Рис. 5. Влияние доли закрытых макропор (*a*) и зерен крупных размеров (*б*) на усилие разрушения в ядре окатыша в зависимости от типа структуры: ● и ■ – тип 1 и 2

Fig. 5 Effect of the fraction of closed macropores (*a*) and large grains (*б*) in the core on the ultimate force depending on the type of structure: ● and ■ – type 1 and 2

силикатной связки 1,5 – 2,0 мкм наблюдается соответствие требованиям прочности при статическом сжатии 2,5 кН/окатыш. При рассматриваемом типе структуры структурные составляющие и макропоры влияют на усилие разрушения. При структуре типа 2 (рис. 3, б) линейной связи между средним размером зерна гематита (титаногематита), средними размерами закрытых макропор, алюмосиликатного связующего и усилием разрушения не обнаружено.

Между усилием разрушения в ядрах окатышей от доли зерен крупных размеров магнетита (титаномagnetита) и доли закрытых макропор имеет место линейная зависимость (рис. 4, а). Чем меньше доля закрытых макропор и зерен крупных размеров магнетита (титаномagnetита), тем больше усилие разрушения. При структуре типа 2 также наблюдается аналогичная зависимость.

Для всех структур (тип 1, 2) наблюдается: увеличение количества закрытых макропор и зерен крупных размеров снижает усилие разрушения от 3,5 до 0,87 кН/окатыш (рис. 5).

Для получения окатышей с усилием разрушения более 2,5 кН/окатыш должны выполняться следующие условия: для структуры типа 1 – количество закрытых макропор должно быть менее 18 % и количество зерен крупных размеров не более 25 %; структуры типа 2 – 25 и 60 % соответственно. Для получения окатышей с усилием разрушения более 2 кН/окатыш: при структуре типа 1 – количество закрытых макропор должно быть менее 40 % и количество зерен крупных размеров не более 50 %; структуре типа 2 – 25 и 65 %.

Усилие разрушения 0,70 кН/окатыш (тип 3) не соответствует требованиям прочности при статическом сжатии за счет большого количества открытых макропор (47 %) и количества зерен крупных размеров (75 %).

Важным является тот факт, что для обеих типов структур можно получать окатыши с усилием разрушения более 2,5 кН/окатыш.

Выводы

Выявлено, что ядро окатышей имеет три типа структур: 1 (неокисленное ядро) – зерна титаномagnetита и магнетита, в том числе спеченные, закрытые макропоры и алюмосиликатное связующее; 2 (частично окисленное ядро) – вокруг магнетита (титаномagnetита) зерна гематита и титаногематита, в том числе спеченные, закрытые макропоры и алюмосиликатное связующее; 3 (окисленное ядро) – зерна гематита и титаногематита, в том числе спеченные, открытые поры и алюмосиликатное связующее.

При изготовлении окатышей, которые выдерживают нагрузку сжатия более 2,5 кН, количество закрытых макропор должно быть менее 18 %, а количество крупных зерен – не более 25 % (для структуры 1 типа) и 25 и 60 % для окатышей со структурой 2 типа.

Причиной снижения усилия разрушения до 0,70 кН/окатыш для структуры 3 типа является наличие в ядре окатыша большого количества открытых макропор и зерен крупных размеров.

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.
2. Gul A., Sirkeci A.A., Boylu F., Guldani G., Burat F. Improvement of mechanical strength of iron ore pellets using raw and activated bentonites as binders. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2014;51(1):23–36. <https://dx.doi.org/10.5277/ppmp150203>
3. Бардавелидзе Г.Г., Брагин В.В., Спиринов Н.А., Пигарев С.П. Исследование окатышей из концентрата окисленных железистых кварцитов АО «Михайловский ГОК». *Металлург*. 2021;(12):11–18. https://doi.org/10.52351/00260827_2021_12_11
Bardavelidze G.G., Bragin V.V., Spirin N.A., Pigarev S.P. Research of pellets from concentrate of oxidized ferruginous quartzites of JSC “Mikhailovsky GOK”. *Metallurg*. 2021;(12):11–18. (In Russ.). https://doi.org/10.52351/00260827_2021_12_11
4. Shaik M.B., Sekhar C., Dwarapudi S., Gupta N., Paul I., Patel A.K., Tudu S., Kumar A. Characterization of colemanite and its effect on cold compressive strength and swelling index of iron ore pellets. *Mining, Metallurgy and Exploration*. 2021;38(1):217–231. <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00331-5>
5. Guo H., Shen F.-M., Jiang X., Gao Q.-J., Ding G.-G. Effects of MgO additive on metallurgical properties of fluxed-pellet. *School of Metallurgy, Northeastern University*. 2019;26:3238–3251. <https://doi.org/10.1007/s11771-019-4249-6>
6. Li W., Fu G., Chu M., Zhu M. Influence of MgO on the oxidation and induration of Hongge vanadium titanomagnetite pellets. *Ironmaking and Steelmaking*. 2019;47(8):837–843. <https://doi.org/10.1080/03019233.2019.1615815>
7. Yi Y., Li G., Gao P., Zhang X., Zhang Y., Zhang J., Huang J. Effect of humic acid binder on oxidation roasting of vanadium-titanium magnetite pellets via straight-grate process. *Crystals*. 2021;11(11):1–11. <https://doi.org/10.3390/cryst11111283>
8. Mohamed O.A., Shalabi M.E.H., El-Hussiny N.A., Khedr M.H., Mostafa F. The role of normal and activated bentonite on the pelletization of barite iron ore concentrate and the quality of pellets. *Powder Technology*. 2003; 130(1-3):277–282. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(02\)00205-X](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(02)00205-X)
9. Абзалов В.М., Горбачев В.А., Евстюгин С.Н., Клейн В.И., Леонтьев Л.И., Юрьев Б.П. *Физико-химические и теплотехнические основы производства железорудных окатышей*. Екатеринбург: МИЦ; 2015:335.
10. Юрьев Б.П., Брук Л.Б., Спиринов Н.А., Шешуков О.Ю., Гольцев В.А., Шевченко О.И., Метелкин А.А. *Основы теории процессов при обжиге железорудных окатышей*. Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ; 2018:310.

11. Bhuiyan I.U., Mouson J., Schröppel B., Kaech A., Dobryden I., Forsmo S.P.E., Hedlund J. Microstructure of bentonite in iron ore green pellets. *Microscopy and Microanalysis*. 2014;20(1):33–41.
<https://doi.org/10.1017/S1431927613013950>
12. Kawatra S.K., Ripke S.J. Effects of bentonite fiber formation in iron ore pelletization. *International Journal of Mineral Processing*. 2002;65(3-4):141–149.
[https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(01\)00062-X](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(01)00062-X)
13. Юрьев Б.П., Дудко В.А. Влияние структурных характеристик окатышей на их металлургические свойства. *Сталь*. 2021;(4):2–6.
Yur'ev B.P., Dudko V.A. Influence of the pellets' structural characteristics upon their metallurgical properties. *Stal'*. 2021;(4):2–6. (In Russ.).
14. Ericksson A., Andersson C., Ahmed H., Dahlin A., Kumar T.K.S., Semberg P. Effect of varied oxygen levels on the oxidation of a magnetite pellet bed during pot furnace induction. *ISIJ International*. 2021;61(5):1439–1449.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-469>
15. Tang M., Cho H.J., Pistorius P.C. Early gaseous oxygen enrichment to enhance magnetite pellet oxidation. *Metallurgical and materials Transactions B*. 2014;45(4):1304–1314.
<https://doi.org/10.1007/s11663-014-0064-5>
16. Kumar T.K.S., Viswanathan N.N., Ahmed H., Dahlin A., Andersson C., Bjorkman B. Developing the oxidation kinetic model for magnetite pellet. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2019;50(1):162–172.
<https://doi.org/10.1007/s11663-018-1423-4>
17. Горбачев В.А., Абзалов В.М., Юрьев Б.П. Кристаллохимическое превращение магнетита в гематит в железорудных окатышах. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2007;50(4):27–30.
Gorbachev V.A., Abzalov V.M., Yu'ev B.P. Conversion of magnetite to hematite in iron-ore pellets. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2007;50(4):27–30.
18. Song S., Pistorius P.C. Formation of hematite whiskers during magnetite concentrate oxidation. *ISIJ International*. 2019;59(10):1765–1769.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-755>
19. Forsmo S.P.E., Forsmo S.-E., Samskog P.-O., Björkman B.M.T. Mechanisms in oxidation and sintering of magnetite iron ore green pellets. *Power Technology*. 2008;183(2):247–259.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.07.032>
20. Timofeeva A.S., Nikitchenko T.V., Fedina V.V., Akul'shina I.I. Effect of flux on the hardening of pellet during heat treatment. *Metallurgist*. 2017;61(8):700–702.
<https://doi.org/10.1007/s11015-017-0552-3>
21. 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;20(7):25–28.
[https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(13\)60121-1](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(13)60121-1)
22. 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;1(4):67–72.
Nikitchenko T.V., Timofeeva A.S., Kozhuhkov A.A. Modification additions influence on the iron ore pellets forming. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2018;1(4):67–72. (In Russ.).
23. Gan M., Sun Y.-F., Fan X.-H., Ji Z.-Y., Lv W., Chen X.-L., Jiang T. Preparing high-quality vanadium titano-magnetite pellets for large-scale blast furnaces as ironmaking burden. *Ironmaking and Steelmaking*. 2018;47(4):1–8.
<https://doi.org/10.1080/03019233.2018.1492500>
24. 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;102:180–186.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jimpeng.2016.12.014>
25. 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;239:231–238.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2013.02.005>
26. Дмитриев А.Н., Смирнова В.Г., Вязникова Е.А., Долматов А.В., Витькина Г.Ю. Влияние структуры обожженных окатышей на прочность и разрушение при испытании на статическое сжатие. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021;64(11):785–792.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-11-785-792>
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;64(11):785–792. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-11-785-792>
27. Салтыков С.А. *Стереометрическая металлография*. Москва: Металлургия; 1970:376.
28. Klobes P., Meyer K. Ronald, Munro R.G. *Porosity and Specific Surface Area Measurements for Solid Materials. NIST Recommended Practice Guide*. U.S. GOVERNMENT Printing Office; Washington: 2006.
29. Абзалов В.М., Клейн В.И., Юрьев Б.П. Диффузия кислорода в порах железорудного окатыша. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2008;51(6):7–9.
Abzalov V.M., Klein V.I., Yur'ev B.P. Oxygen diffusion in pores of an iron ore pellet. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2008;51(6):7–9. (In Russ.).

Сведения об авторах

Information about the Authors

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

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

Валентина Григорьевна Смирнова, ведущий инженер лаборатории пирометаллургии восстановительных процессов, Институт металлургии Уральского отделения РАН

ORCID: 0000-0002-2285-2509

E-mail: metallography@mail.ru

Елена Александровна Вязникова, младший научный сотрудник лаборатории пирометаллургии восстановительных процессов, Институт металлургии Уральского отделения РАН

ORCID: 0000-0003-2754-1846

E-mail: vjaznikova@mail.ru

Галина Юрьевна Виткина, к.т.н., старший научный сотрудник, заведующий лабораторией пирометаллургии восстановительных процессов, Институт металлургии Уральского отделения РАН

ORCID: 0000-0002-1076-2709

E-mail: 20procents@mail.ru

Александр Сергеевич Смирнов, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории механики деформаций, Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения РАН

ORCID: 0000-0002-5826-491X

E-mail: smirnov@imach.uran.ru

Valentina G. Smirnova, Leading Engineer of the Laboratory of Pyrometallurgy of Reduction Processes, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0002-2285-2509

E-mail: metallography@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 Sciences

ORCID: 0000-0003-2754-1846

E-mail: vjaznikova@mail.ru

Galina Yu. Vit'kina, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Head of the Laboratory of Pyrometallurgy of Reduction Processes, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0002-1076-2709

E-mail: 20procents@mail.ru

Aleksandr S. Smirnov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Deformation Mechanics, E.S. Gorkunov Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0002-5826-491X

E-mail: smirnov@imach.uran.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

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

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

Е. А. Вязникова – получение данных для анализа.

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

А. С. Смирнов – получение данных для анализа.

A. N. Dmitriev – scientific guidance, formation of the basic concept, goals and objectives of the study.

V. G. Smirnova – writing the text, obtaining and analyzing the data, reviewing publications on the article topic.

E. A. Vyaznikova – obtaining data for analysis.

G. Yu. Vit'kina – visualization of the research results, revision of the text.

A. S. Smirnov – obtaining data for analysis.

Поступила в редакцию 21.03.2023

После доработки 30.05.2023

Принята к публикации 11.09.2023

Received 21.03.2023

Revised 30.05.2023

Accepted 11.09.2023