

УДК 669.162.1:669.046

# ИЗМЕНЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ ПУТЕМ ВВОДА В ШИХТУ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК И ЗАМЕНЫ ФЛЮСА

Л. О. Сихалиева<sup>1,2</sup>, Е. В. Ширяева<sup>1,2</sup>, Т. А. Марютина<sup>1,2</sup>, Т. В. Никитченко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ФГАОУ ВПО «Московский физико-технический институт (государственный университет)»  
(г. Москва, Россия),

<sup>2</sup> ООО «Инжиниринговый центр МФТИ по трудноизвлекаемым полезным ископаемым»  
(г. Долгопрудный, Россия),

<sup>3</sup> СТИ НИТУ «МИСиС» (г. Москва, Россия)

Приведены результаты лабораторных исследований по улучшению показателей прочностных свойств окатышей путем ввода в шихту различных модифицирующих добавок. Исследованы зависимости изменения прочностных и металлургических характеристик окатышей при модификации их химического состава.

**Ключевые слова:** шихта, окатыши, связующее, добавка, бентонит, известь, обжиг, прочность.

С ростом конкуренции на внутреннем и международных рынках железорудного сырья наряду с возрастающей стоимостью энергоносителей существует проблема повышения качества получаемого продукта одновременно со снижением затрат на его производство. Кроме того, значительное усложнение логистических схем поставки при выходе на международные рынки привело к появлению дополнительных пунктов перегрузки окатышей в морских портах, в результате чего возрастает риск разрушения продукта. Попытка коренным образом улучшить металлургические свойства окатышей в уже сложившихся условиях путем ввода модифицирующей добавки предпринималась неоднократно (см. например, [1 – 4]).

На основании систематизации сведений об основных связующих, флюсующих и упрочняющих добавках, применяемых при производстве окатышей [5], для лабораторных испытаний с применением железорудного концентрата КМА были предложены четыре добавки: углерод-наноструктурированный порошок НУМ-Д, силикат натрия, доломит и магнезит. Цель работы — проведение экспериментальных исследований по выбору оптимального флюса или модифицирующей добавки, которые при минимальном количестве обеспечат повышение прочности окатышей. Кроме того, для оценки возможных изменений металлургических свойств проведены лабораторные испытания по определению восстановимости и температурного интервала размягчения для окатышей с наибольшей прочностью. Испытания проводили в Инжиниринговом центре МФТИ и НИТУ МИСиС. Ниже приведено описание используемых нами модифицирующих добавок.

**Порошок НУМ-Д** представляет собой одномерные наномасштабные нитевидные образования поликристаллического графита в виде сыпучего порошка черного цвета. Использование данной модифицирующей добавки может способствовать образованию внутренних локальных жидкофазных связей, приводящих к упрочнению окатыша. Согласно предварительным

исследованиям, данный материал показал хорошие результаты в качестве упрочняющей добавки в цемент, бетон и строительные полимеры.

**Силикат натрия ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )** — белый порошок, образующий при взаимодействии с водой вязкий раствор, повышающий комковатость шихты. При удалении воды раствор силиката натрия превращается в аморфное твердое тело. А на стадии твердофазного спекания с железорудной частью шихты оксид натрия способствует снижению температуры плавления образующегося соединения. На основе анализа тройной диаграммы состояния  $\text{SiO}_2 - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$  предполагается, что жидкофазная связка в железорудном окатыше будет образовываться на более ранней стадии — в зоне подогрева при достижении температуры внутренней зоны окатыша 800 – 900 °С [6].

**Доломит и магнезит** — породообразующие минералы класса карбонатов, были предложены к испытаниям как магнийсодержащие добавки. Они неоднократно тестировались на разных предприятиях и показали положительные результаты. В настоящих исследованиях доломит и магнезит использовали в качестве сравнительных добавок, в том числе и для выявления механизма формирования прочностных характеристик окатышей. Массовые доли основных компонентов доломита/магнезита, %: 7,30/3,54  $\text{SiO}_2$ ; 2,20/0,56  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 31,00/5,58  $\text{CaO}$ ; 14,80/86,35  $\text{MgO}$ . Потери массовых долей входящих в их состав компонентов при прокаливании не учитывались.

Шихту для экспериментальных окатышей готовили, добавляя упрочняющие добавки разных концентраций к известняку, при этом порошок НУМ-Д и силикат натрия служили дополнением к известняку. За базовые окатыши принимали окатыши из шихты, состоящей из концентрата, бентонита и известняка. Доломит и магнезит использовали в качестве заместителя известняка. Относительное изменение флюсующих и модифицирующих добавок представлено на диаграмме (рис. 1). Дозировка каждого компонента не превышала 1 %. Каждый эксперимент воспроиз-

Прочностные характеристики базовых и экспериментальных окатышей

Параметры	Известняк № 1	Порошок НУМ-Д			Силикат натрия			Доломит		Магнезит	
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 1	№ 2	№ 3	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2
Выход годного класса 10 – 16 мм, %	64,8	47,7	40,8	35,7	77,1	63,2	58	47,5	46,7	33,5	55,2
Прочность сырых окатышей на сжатие, г/ок.	755	826	790	842	841	1124	1094	748	668	738	836
Прочность сырых окатышей, число сбрасываний	3,5	4,2	3,2	3,3	4,4	4,2	4	2,7	2,8	3,2	3,3
Прочность сухих окатышей на сжатие, г/ок.	1200	867	1266	966	1726	2028	1848	1514	1352	1096	1426
Прочность обожженных окатышей на сжатие, кг/ок.	285,4	304	268,5	130,7	348	318,4	323,7	319,4	360,7	300,8	324,8

водили троекратно. Сырые окатыши изготавливали на лабораторном чашевом грануляторе. Тщательно перемешанную шихту выдерживали в течение 0,5 ч перед окомкованием. Результаты исследований приведены в таблице.

Наилучшие показатели получены при введении в состав шихты силиката натрия. Так, для этой серии экспериментальных окатышей был получен наибольший выход годного класса, который составлял на 12 % больше выхода годного класса окатышей базовой серии. Процесс окомкования проходил устойчиво, слипания в грозди не наблюдалось. При контакте данной добавки с влажным концентратом образуется NaOH снижающий межфазное натяжение на границе жидкость/твердое, т. е. снижается угол смачивания, повышается комкуемость концентрата. Повышение смачиваемости концентрата способствует увеличению количества и уменьшению размера пор, что обеспечивает более полную степень окисления магнетитового окатыша в процессе термической обработки [7].

Обжигали лабораторные окатыши в лабораторной шахтной печи с контролируемой средой. Обожженные окатыши с добавлением известняка имели прочность на сжатие 285,4 кг/ок. Это значение было принято как базовое для проведения дальнейшего сравнительного анализа, так как известняк является основным флюсующим компонентом многих производителей железорудных окатышей.

Прочность обожженных окатышей с добавкой порошка НУМ-Д № 1 превысила уровень базовой прочности на 6,7 %. Увеличение дозировки данной добавки снизило прочностные характеристики из-за образования рыхлых областей в структуре окатышей.

Добавка силиката натрия способствовала повышению прочности окатышей. Как видно из таблицы, существует оптимум дозировки данного компонента, который будет определяться свойствами конкретного железорудного концентрата. Изучая механизм поведения силиката натрия в ходе окислительного обжига, на основе микроструктурного анализа установили, что образующаяся жидкофазная связка, включающая метасиликат натрия, более равномерно распределена в объеме окатыша. Образование со-

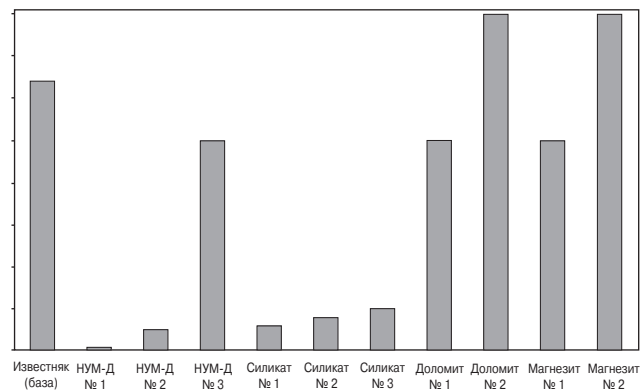


Рис. 1. Относительное изменение дозировок флюсующих и модифицирующих добавок

единения такого типа согласно тройной диаграмме  $\text{SiO}_2 - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$  начинается при 760 °С. При этом раннее образование данной связки не затрудняло диффузию кислорода к центру окатыша, о чем можно судить по результатам рентгеноспектрального микрозондирования: содержание железа изменялось от 0,71 % в центре окатыша до 70,2 % в поверхностном слое, в то время как в образцах с использованием известняка содержание железа в зернах центральной части окатыша составляло 71,9 %, что соответствует составу магнетита.

Наиболее высокое значение прочности окатышей было достигнуто при использовании в качестве флюсующей добавки доломита. Оксиды магния образуют жидкофазную связку в железорудных окатышах уже при 1150 °С., что и обеспечивает повышение их прочностных характеристик [8]. Замена доломита магнезитом не дала значительного повышения прочностных показателей окатышей в сравнении с базовыми.

Почти все тестируемые образцы имели зональную структуру, что свидетельствовало о недостаточности времени окислительного подогрева и обжига. Термическая обработка окатышей осуществлялась в лабораторной шахтной печи с контролируемой атмосферой. Температурно-временной режим, используемый в данных экспериментах, был установлен в соответствии с типовым режимом, используемым при производстве неофлюсованных окатышей ( $T$  обжига 1250 °С, дли-

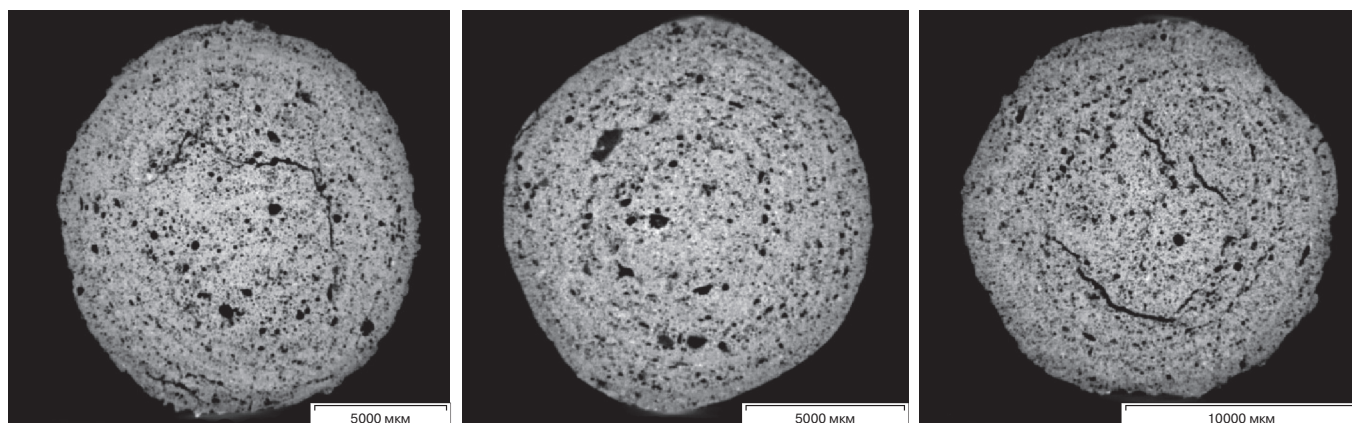


Рис. 2. Сечения обожженных окатышей, полученные с помощью рентгеновского микротомографа: а — известняк; б — известняк с добавкой силиката натрия; в — доломит

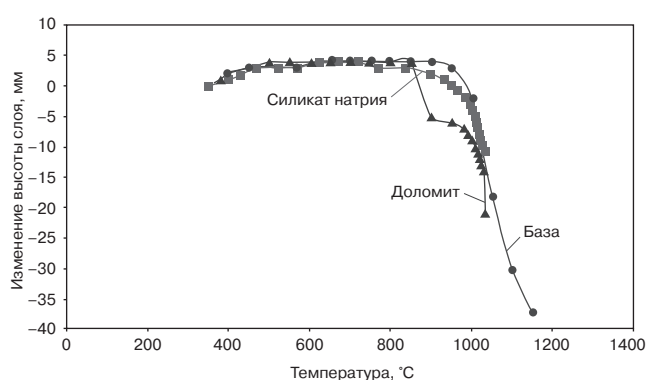


Рис. 3. Кривые размягчения окатышей в процессе восстановления

тельность термической обработки без учета времени охлаждения составила 17 – 18 мин).

Окатыши с высокими прочностными свойствами использовали в дополнительных исследованиях по восстановимости и размягчаемости. Степень восстановления определяли для базовых окатышей и окатышей с добавлением доломита № 1 на лабораторной установке непрерывного взвешивания. Методика измерения восстановимости заключалась в непрерывном контроле изменения массы пробы в процессе восстановления водородом при 800 – 900 °С по аналогии с ГОСТ 17212. Отличие используемой в данных исследованиях методики заключалось в химическом составе восстановительного газа и уровне конечной температуры эксперимента. Методом мессбаэровской спектроскопии определили общую массу остаточного кислорода, связанного с железом. Исходя из полученных данных, определили степень восстановления окатышей с известняком ( $R = 76,2\%$ ) и окатышей с добавкой доломита ( $R = 75\%$ ). Данный показатель для обеих серий экспериментов оказался практически идентичным, следовательно, замена известняка доломитом не ухудшит восстановимость окатышей.

Для прогнозирования интервала вязкопластичного состояния железорудного сырья в шихте доменной печи выбрали серии экспериментальных окатышей: серия с известняком (база), с добавкой к известняку

силиката натрия № 1 в минимальном количестве и серия № 1 с добавкой доломита. По усадке испытываемого слоя на 40 % оценивали температуру начала и окончания размягчения, что также регламентировано ГОСТом.

Анализ полученных кривых размягчения (рис. 3) показывает, что в начальном периоде восстановительного процесса при повышении температуры до 500 °С происходит набухание окатышей всех типов со степенью набухания примерно на одном уровне — около 10 %. При увеличении температуры восстановления до 900 °С начинается усадка слоя. У окатышей, офлюсованных доломитом при 900 °С, наблюдалось резкое снижение высоты слоя, соответствующее 10 % усадке; температуры конца размягчения была зафиксирована на уровне 1010 °С. У окатышей, офлюсованных известняком без добавки силиката натрия, температура начала размягчения соответствовала 1000 °С, температура конца размягчения — 1050 °С. Добавка силиката натрия примерно на 10 °С снижает уровень температур интервала размягчения. Таким образом, добавка доломита снижает температурный интервал размягчения окатышей, что является отрицательным фактором. Возможно, необходимо увеличить дозировку доломита или применять его в смеси с известняком.

## ВЫВОДЫ

1. Введение в шихту модифицирующей добавки силиката натрия позволяет увеличить прочностные свойства обожженных кислородных окатышей на 22 % практически без изменений металлургических свойств.

2. Замена известняка доломитом позволяет повысить прочность обожженных окатышей на 26 %, однако это может привести к снижению температурного интервала размягчения в процессе восстановления.

3. Апробация порошка НУМ-Д не продемонстрировала таких положительных результатов, как эксперименты с другими добавками, что, возможно является следствием неправильного способа введения порошка, и это требует дополнительных исследований. Например, предварительная активация порошка

водой может повысить прочностные характеристики как сырых, так и обожженных окатышей.

4. Рекомендуются полупромышленные испытания окатышей, офлюсованных доломитом и с модифицирующей добавкой силиката натрия в дозировке № 1 с их термической обработкой на обжиговой машине.

5. Дальнейший анализ микроструктурных характеристик позволит выявить механизм формирования прочностных характеристик образцов, полученных по вышеприведенным рецептурам, и рекомендовать оптимальную рецептуру для промышленных испытаний с целью увеличения прочностных характеристик не-офлюсованных железорудных окатышей.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юсфин Ю. С., Пашков Н. Ф., Антоненко Л. К. Интенсификация производства и улучшение качества окатышей. — М.: Металлургия, 1994. — 240 с.
2. Eisele T. C., Kawatra S. K. A review of binders in iron ore pelletization // Mineral Processing & Extractive Metallurgy Rev. 2003. Vol. 24. P. 1 - 90.
3. Чижилова В. М., Вайнштейн Р. М. Окомкование железорудных материалов с различными связующими добавками // Изв. вузов. Черная металлургия. 2004. № 2. С. 8 – 10.
4. Усольцев Д. Ю., Шаврин А. В., Копоть Н. Н. и др. Влияние состава и расхода комплексного связующего на металлургические свойства окатышей ОАО «Михайловский ГОК» // Сталь. 2003. № 9. С. 35 – 38.
5. Марютина Т. А., Ширяева Е. В., Шихалиева Л. О., Никитченко Т. В. Оценка влияния связующих и модифицирующих компонентов на прочностные характеристики железорудных окатышей // Сталь. 2015. № 7. С. 2 – 6.
6. Пат. 6241808 US. B1. Production of Iron Ore Pellets / K. Morioka, J. Kiguchi. Оpubл. 05.06. 2001.
7. Усольцев Д. Ю. Исследование влияния бенто-полимерных композиций на свойства железорудных окатышей и совершенствование на этой основе технологии подготовки шихты для их производства. Автореф. ... дис. канд. техн. наук. — Екатеринбург, УПИ, 2007. — 24 с.
8. Мальшева Т. Я., Долицкая О. А. Петрография и минералогия железорудного сырья. — М.: МИСиС, 2004. — 291 с.