

УДК 669.162.1:669.046

# ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОТОМОГРАФИИ

Л. О. Шихалиева<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 (ГУ)» (г. Москва, Россия),

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

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

Изучено влияние модифицирующих добавок силиката натрия и доломита на микроструктуру обожженных окатышей, приведены сравнительные исследования микроструктуры сырых окатышей, отобранных с разных стадий технологической цепочки: до и после роликового укладчика. Показана полная 3D визуализация внутренней структуры образцов сырых и обожженных окатышей, что позволяет диагностировать характерные для окатыша прочность без его разрушения и микроструктуру без подготовки шлифа.

**Ключевые слова:** сырые окатыши, обожженные окатыши, микроструктура, томограф, рентгеновская микротомография, шихта, связующее, добавка, бентонит, известь, прочность.

Микроструктура обожженных окатышей — важная характеристика, определяющая их физико-химические свойства, в том числе прочностные [1, 2]. В работе [3] выявляется и исследуется взаимосвязь параметров микроструктуры окатышей с их трещиноватостью как основного фактора, влияющего на прочность.

Одним из наиболее приемлемых методов изучения микроструктуры окатышей является компьютерная рентгеновская томография (КРТ) — неразрушающее послойное исследование внутренней структуры объекта. Метод, предложенный в 1972 г. Годфри Хаунсфилдом и Алланом Кормаком, удостоенными за эту разработку Нобелевской премии, основан на измерении и сложной компьютерной обработке разности ослабления рентгеновского излучения тканями разной плотности.

Метод КРТ позволяет решать большое количество задач: моделирование пустотного пространства (трещины, каверны, поры), подсчет пористости, исследование неоднородности породы, выделение разных включений в породе, подсчет объемов как образца окатыша, так и всех его пустот и включений [4]. Суть метода в том, что рентгеновские лучи теряют мощность при прохождении сквозь породу пропорционально ее плотности и регистрируются на матрице приемника, оставляя на экране монитора общие снимки окатыша, реконструируемые в трехмерный образец. Это позволяет видеть все поры, трещины, включения окатыша не разрушая его. Детально разобраться в свойствах окатыша на реконструированном образце позволяет программа VSG Avizo Fire.

В статье представлены сравнительные исследования с использованием рентгеновского микротомографа структурных характеристик сырых железорудных окатышей, отобранных с разных стадий технологической цепочки их производства, а также образцов, полученных лабораторным окомкованием

из железорудного концентрата КМА с привлечением модифицирующих и флюсующих добавок — силиката натрия и доломита, подобранных в предыдущих исследованиях [5, 6].

Для решения поставленных задач, использовался рентгеновский микротомограф производства фирмы X-Radia модели Versa XRM-500. Снятие скана происходило в процессе получения множества проекционных изображений образца при его вращении на опорной стойке и последующем восстановлении трехмерной структуры из полученных проекций.

Для исследования железорудных окатышей выбрали следующий режим работы прибора: ускоряющее напряжение на источнике 160 кВ, общая мощность 10 Вт, время накопления одной проекции 1,2 с. Для каждого образца получили 1800 проекций при полном обороте на 360 град, т. е. проекцию снимали при повороте на каждые 0,2 град. Обработка данных включала визуализацию, сегментацию, и численную оценку средствами ПО Avizo Fire.

Скан снимали в следующем порядке: исходный образец (железорудный окатыш) приклеивали к опорной стойке, всю конструкцию помещали в рентгеновский микротомограф между источником и детектором. После предварительной съемки для подбора соответствующего фильтра (отсечения шумового излучения) и центрирования образца (получения оптимального разрешения), запускали сканирование на полный поворот образца. Исследовали как сырые, так и обожженные окатыши промышленной технологической линии.

Для сравнительного анализа внутренней структуры сырых образцов отбирали окатыши до и после роликового укладчика. Образцы для сканирования распределяли по четырем классам крупности: < 12 мм, 12 – 14 мм, 14 – 16 мм и > 16 мм. При исследовании окатышей, отобранных до роликового укладчика, в классе 14 – 16 мм были выявлены немногочисленные образцы с вну-

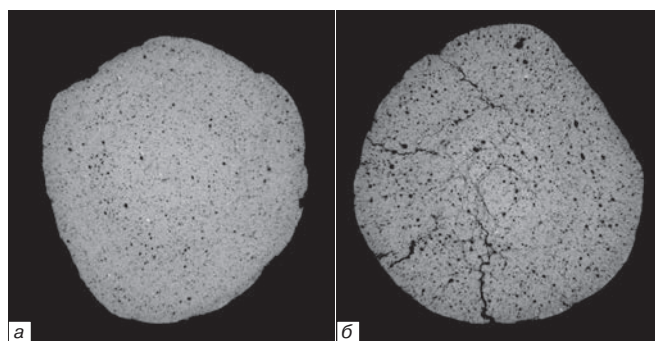
треними трещинами, имеющими радиальный характер, что свидетельствует о воздействии на окатыши ударных и сжимающих нагрузок при транспортировке. В окатышах, отобранных после роликового укладчика, внутренних трещин не наблюдалось. Возможно, окатыши с трещинами разрушились и были удалены в отсев на роликовом укладчике (рис. 1).

Полученные результаты свидетельствуют о деформации окатышей в ходе транспортировки и перегрузок, отрицательно сказывающейся на их микроструктуре и, следовательно, прочности. Разрушающим воздействия при транспортировке подвергаются, прежде всего, более крупные окатыши: чем крупнее окатыш, тем больше его масса, следовательно, выше момент импульса, воздействующий на окатыш в момент удара при перегрузках.

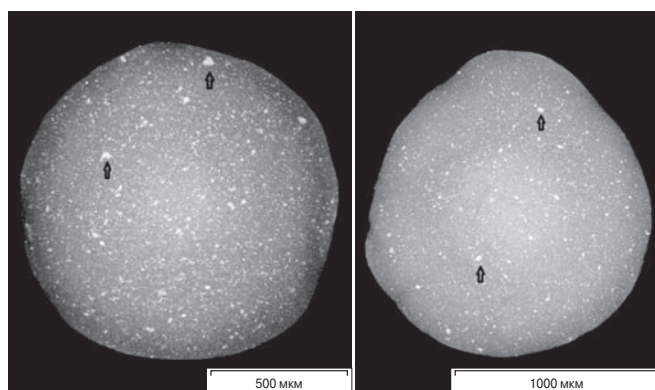
По полученным результатам было зарегистрировано, что с увеличением размеров сырых окатышей, их пористость несколько снижается, и возрастает доля мелких пор ( $< 50$  мкм), что обусловлено более длительным воздействием динамических нагрузок на окатыш в процессе окомкования. Чем крупнее окатыш, тем плотнее он по внешнему радиусу. Его пористость в основном сосредоточена в центре, т. е. открытая пористость этих окатышей снижается, а закрытая растет. Данный фактор способствует образованию трещин в процессах сушки и окисления, так как закрытая пористость и маленький размер пор снижают скорость диффузионных процессов движения пара к поверхности и кислорода к центру окатыша, поэтому именно в крупных окатышах наблюдаются наиболее крупные трещины.

На рис. 2 представлены виртуальные 3D-изображения образцов сырых окатышей с визуализацией светлых включений в объеме образца. На данных снимках четко просматриваются белые области — частицы известняка. Судя по их размеру, можно сказать, что в процессе дозирования флюса часть частиц образует более крупные конгломераты, которые в процессе перемешивания шихты не разрушаются. Размер таких конгломератов может достигать 300 – 400 мкм (см. рис. 2). В зоне окислительного подогрева такие частицы-конгломераты будут создавать дополнительные внутренние напряжения, способствующие образованию трещин внутри окатыша. Предотвращение данной ситуации возможно интенсивным перемешиванием шихты.

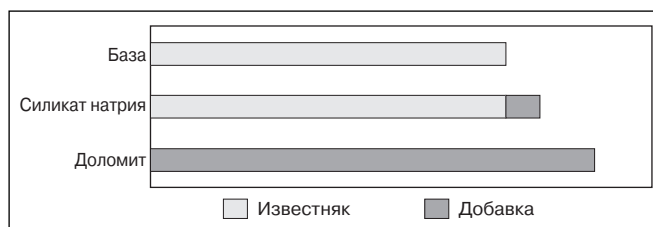
Обоженные окатыши, приготовленные по разным рецептурам с добавлением разных модифицирующих добавок, выбранные для сравнительных исследований, были получены в лабораторных условиях ИЦ МФТИ и НИТУ МИСиС. Окатыши термообработывались в лабораторной шахтной печи с контролируемой средой. Температурно-временной режим был установлен в соответствии с типичным режимом, используемым при производстве неофлюсованных окатышей ( $t_{\text{обж}} = 1250$  °С,  $\tau_{\text{то}} = 17 - 18$  мин без учета длительности охлаждения).



**Рис. 1.** Виртуальные сечения двух образцов сырых окатышей, фракция 14 – 16 мм: а — после роликового укладчика (без дефектов); б — до роликового укладчика (с внутренними трещинами)

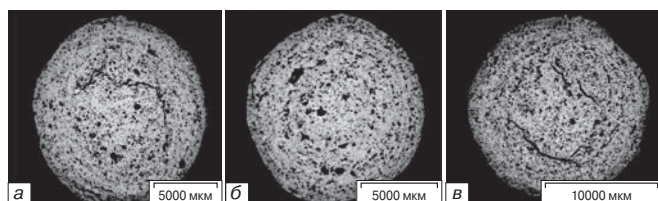


**Рис. 2.** Виртуальные 3D-изображения образцов сырых окатышей с визуализацией светлых включений в объеме образца



**Рис. 3.** Относительное изменение дозирования флюсующих и модифицирующих добавок, %

Обоженные окатыши представляют минеральную композицию железосодержащих фаз, состав, микроструктура и физико-механические свойства которых зависят от химического и фазового состава исходной шихты и режима высокотемпературной обработки. Окатыши должны иметь такую высокую холодную прочность, чтобы они не разрушались при транспортировке от обжигового агрегата до доменной печи. Ранее нами были определены прочностные характеристики лабораторных окатышей, приготовленных по разным рецептурам [5]. В данной работе интерес представляли окатыши с добавками доломита и силиката натрия (рис. 3), продемонстрировавшие лучшие прочностные характеристики среди окатышей всех экспериментальных серий с разными добавками. Для сравнительного анализа также исследовали образцы



**Рис. 4.** Виртуальное сечение образцов обожженных окатышей серий: а — базовая; б — с силикатом натрия; в — с доломитом

базовой серии. Шихта базовых окатышей состояла из концентрата, бентонита и известняка. Силикат натрия служил дополнением к известняку. Доломит использовали в качестве заменителя известняка.

Средняя прочность на сжатие, полученная для каждой серии лабораторных обожженных окатышей, кг/окатыш: для базовой серии 285, для серий с силикатом натрия 348 и с доломитом 360,7. Виртуальные сечения, характерные для базовой серии окатышей, полученных в ходе лабораторного обжига, а также образцов с наибольшей прочностью на сжатие с добавками силиката натрия и доломита соответственно показаны на рис. 4.

Результаты томографических исследований дают наглядную картину внутренней структуры образцов окатышей, полученных по разным рецептурам. По структуре укомплектованных зерен и пустот, локализации трещин, пор, неоднородностей можно установить связь прочностных свойств окатыша с процессами его формирования и термической обработки. При этом внутренняя структура окатыша может быть исследована без разрушения образца и подготовки шлифа. Исследования с помощью томографа полезны для представления макрохарактеристик исследуемого образца, в дальнейшем изучаемого на микроуровне, например, с помощью оптического или растрового электронного микроскопа, при исследовании химического состава зерен, чему будут посвящены последующие работы. По результатам томографического исследования диагностировали как открытые, так и закрытые трещины. Вследствие механического и температурного напряжения образуются системы трещин, ориентированных в определенных плоскостях: радиальные трещины, а также кольцевые.

Окатыши с базовым составом шихты имели равномерную пористую структуру. Встречались как очень маленькие поры  $< 0,08$  мм, так и крупные  $\sim 0,4$  мм. Четко выраженной зональности не наблюдалось, однако присутствовали концентрические трещины длиной  $\sim 11,85$  мм, а также частицы неусвоенной пустой породы размерами  $\sim 0,08 - 0,16$  мм (см. рис. 4, а). Окатыши с добавкой силиката натрия (см. рис. 4, б) показали высокий уровень холодной прочности. Поровая структура развита равномерно, присутствуют как мелкие, так и крупные поры. Трещин практически не наблюдается. Окатыши с добавок доломита имели самую

высокую прочность. Структура образцов равномерна, встречаются концентрические трещины, мелкие и крупные поры. Границы между окисленной и неокисленной зонами не наблюдается. Поровая структура представлена достаточно равномерно. В сравнении с базовыми окатыши с добавкой доломита (см. рис. 4, в) имеют однородную структуру по всему объему, тогда как у окатышей с базовой шихтой центральная часть более пористая.

## ВЫВОДЫ

1. Рентгеновская томография — перспективный метод исследования внутренней структуры железорудных окатышей, позволяющий решать прикладные и фундаментальные задачи. С использованием метода КРТ удается полностью визуализировать внутреннюю структуру образца в 3D-изображении и проанализировать многие его свойства (выделить трещины, поры, включения, неоднородности, разные слои внутренней области образца, отличающиеся структурой, а также дифференциацию плотности).

2. Анализ внутренней структуры сырого окатыша показал, что при транспортировке окатышей от чашевых окомкователей до обжиговой машины прочность сырых окатышей несколько снижается, на роликовом укладчике происходит отсев разрушенных образцов.

3. Измельченные флюсы в процессе дозирования склонны к агрегации; для разрушения агрегатов и эффективного перемешивания шихты более рационально использование интенсивных перемешивателей.

4. Полная 3D-визуализация внутренней структуры разных образцов обожженных окатышей позволяет диагностировать характерную для окатыша прочность без разрушения образца и говорить о микроструктуре без подготовки шлифа.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Модель М. С., Лядова В. Я., Чугунова Н. В. Ферритообразование в железорудном сырье. — М.: Наука, 1990. — 152 с.
2. Малышева Т. Я. Железорудное сырье: упрочнение при термообработке. — М.: Наука, 1988. — 199 с.
3. Хопунов Э. А. Структурно-механическая модель прочности окатышей // Обогащение руд. 2011. № 4. С. 21 — 26.
4. Рентгеноскопия и компьютерная томография // Сборник материалов научно-практических конференций: тез. конф., 3-я Международная конференция по компьютерной томографии / Группа компаний Ostec. — 2015, Москва, Владимир.
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. Шихалиева Л. О., Ширяева Е. В., Марютина Т. А., Никитченко Т. В. Изменение прочностных свойств железорудных окатышей путем ввода в шихту модифицирующих добавок и замены флюса // Сталь. 2016. № 5. С. 2 — 5.