

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОКОМКОВАНИЮ КОНЦЕНТРАТА РУДЫ БЕЛАНОВСКОГО ГОКА

Анализ результатов исследований и опыт производства окатышей показывает, что качество обожженных железорудных окатышей зависит от целого ряда факторов: свойств исходного сырья, условий окомкования и гранулометрического состава сырых окатышей, параметров температурно-временной обработки при упрочняющем обжиге; минерального состава и их структуры.

Однако в большинстве сообщений приводимые результаты являются частным случаем, так как они получены при каких-то конкретных условиях, на конкретном исходном сырье, когда исследовалось влияние одного фактора без учета влияния других. Поэтому результаты не всегда совпадают, а порой и противоречат друг другу. В этой связи проведены исследования по определению параметров сырого окомкования концентрата руд Белановского горно-обогатительного комбината, термоупрочнения окатышей и их металлургические свойства.

Химический состав исследуемого концентрата и связующей добавки приведен в табл. 1. В качестве связующей добавки использовали индийскую бентонитовую глину в количестве 0,7 % натуральной массы концентрата в шихте окомкования. Испытания по сырому окомкованию и термоупрочнению окатышей проводили по методике, разработанной в институте «Механобрчермет».

Таблица 1

Химический состав исходных материалов

Материал	Массовая доля компонентов, %							
	Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂
Концентрат	67,3	28,6	64,40	4,86	0,12	0,36	0,57	0,06
Бентонит	5,2	1,3	6,0	51,89	5,34	2,73	15,45	-

Продолжение таблицы 1

Материал	Массовая доля компонентов, %						
	MnO	P ₂ O ₅	K ₂ O+ Na ₂ O	S	n.n.n	проч.	Сумма окислов
Концентрат	0,06	0,01	0,12	0,027	0,83	0,01	100,00
Бентонит	0,454	0,118	2,3	0,308	13,972	0,128	100,00

Качество сырых окатышей характеризовалось следующими показателями: прочность на сжатие сырых и сухих окатышей, прочность на удар (сбрасывание) с высоты 0,5 м на резиновую поверхность, предельная температура сушки (температура «шока»), массовая доля влаги, пористость.

Обжиг окатышей осуществлялся в воздушной атмосфере высокотемпературной печи муфельного и шахтного типа, имеющих широкий диапазон температур (от 300 до 1380°C). Температурно-тепловой режим термоупрочнения выбирался из условия полного протекания процессов окисления магнетита, формирования равномерной по объему окатыша структуры и максимального приближения к условиям обжига окатышей в установке «Решетка-трубчатая печь – охладитель».

Качество обожженных окатышей оценивали с использованием стандартных методик по их сопротивлению при сжатии (ДСТУ 3206-95), дробимости и истираемости (ДСТУ 3200-95), металлургические свойства обожженных окатышей при восстановлении определялись ДСТУ 3204-95, ДСТУ 3208-95, ДСТУ 3202-95.

Определение параметров окомкования является одним из основных этапов технологии производства окатышей, который осуществляется по следующей методике. Окружная скорость и угол наклона гранулятора принимались исходя из опыта окомкования, других, сходных с исследуемым по свойствам концентратов. В дальнейшем в ходе опытов определялось оптимальное содержание влаги в окатышах, время окомкования и прочностные свойства окатышей.

Определение оптимального содержания влаги в окатышах начинали с окомкования увлажненного концентрата, способного на грануляторе образовывать комки. Постепенное увеличение влажности концентрата на 0,2 % и определение прочности и гранулометрического состава окатышей позволило определить оптимальную влажность, то есть влажность, при которой выход годного класса окатышей (8,0-16,0 мм) составлял более 90 %, а их прочность была удовлетворительной (не менее 1 кг/окат. и 3-4 сбрасываний с высоты 0,5 м на резиновую плиту без разрушений).

Результаты выполненных испытаний показали, что исследуемый концентрат относится к хорошо комкуемым тонкодисперсным материалам. На рис. 1 приведены данные о влиянии массовой доли влаги при прочих равных условиях окомкования на гранулометрический состав сырых окатышей. Из полученных данных (рис. 1) следует, что при массовой доле влаги в окатышах равной $8,6 \pm 0,2$ % выход годного класса (8,0-16,0 мм) составляет 94-96 %. При этом прочность при сжатии сырых и сухих окатышей составляет 1,37 и 3,5 кг/окат., соответственно.

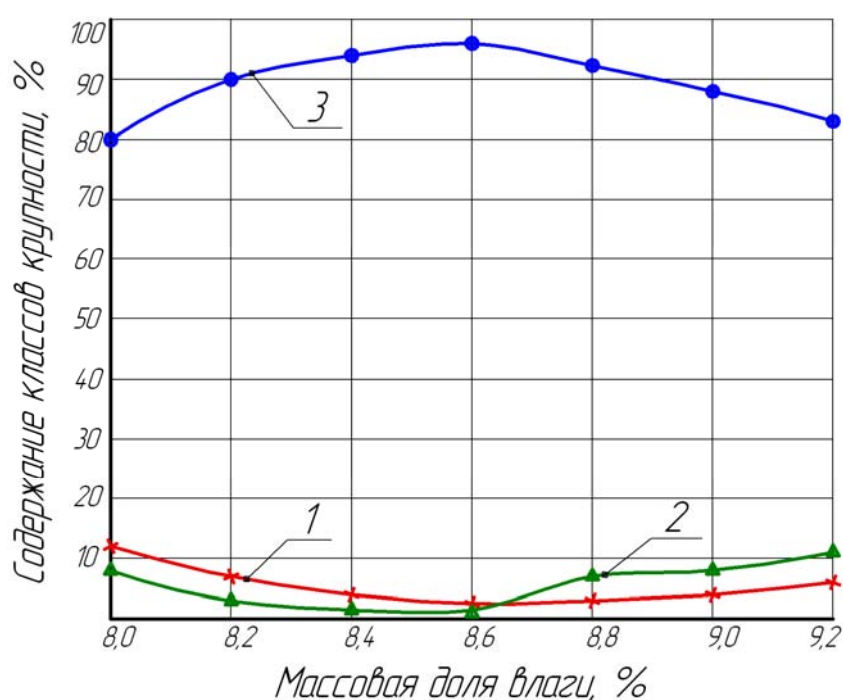


Рис. 1 – Изменение гранулометрического состава окатышей в зависимости от массовой доли влаги:

1 – класс крупности 0-8,0 мм;

2 – класс крупности +16,0 мм; 3 – класс крупности 8,0-16,0 мм

Экспериментально определено, что при удельной поверхности концентрата равной 250-270 м²/кг окомкование шихты, содержащей 0,7 % бентонита, происходит стабильно, а сырые окатыши с массовой долей влаги $8,6 \pm 0,2$ %, обладают удовлетворительными свойствами, а их предельная температура сушки (температура «шока») равна 510 ± 10 °С.

Результаты испытаний по комкуемости концентрата позволили заключить, что при массовой доле влаги в концентрате более 9,0 % при производстве неофлюсованных окатышей происходит дестабилизация процесса окомкования шихты, окатыши получают переувлажненными,

снижается выход годного класса (8,0-16,0 мм) и повышается количество крупного (+16 мм) класса окатышей. Нарушение стабильности процесса комкуемости шихты с повышением массовой доли влаги (более 9,0 %), по-видимому, обусловлено, наличием в микроструктуре концентрата некоторых нерудных минералов (хлорит, тальк, гётит, амфиболы), которые обладают определенной гидрофобностью, а также имеют различную форму зерен, которые отрицательно влияют на процесс формирования окатышей.

На основании анализа экспериментальных данных по изучению комкуемости концентрата проведена серия опытов по определению влияния отдельных факторов (влаги шихты, расхода бентонита, нагрузки на окомкователь) на показатели качества окатышей. Проведены исследования по влиянию комплекса технологических факторов на оптимизацию гранулометрического состава сырых окатышей. Целью указанных исследований является определение зависимости функции от переменных факторов:

$$y = f(X_1, X_2, X_3) \quad (1)$$

В качестве функции принимаются – выход годного класса окатышей (8,0-16,0 мм), а также по классам крупности (10,0-14,0 мм).

В качестве переменных факторов приняты – скорость вращения окомкователя (X_1), нагрузка по шихте (X_2) и массовая доля бентонита в шихте (X_3).

Диапазон изменения переменных факторов выбран применительно к производству окатышей в промышленных условиях и составляет:

- скорость вращения окомкователя – 12-18 мин⁻¹;
- нагрузка по шихте – 1,0-1,7 т/м³·ч;
- массовая доля бентонита в шихте 0,5-1,0 %.

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что увеличение массовой доли бентонита в шихте на каждые 0,1 % (с 0,5 до 1,0 %) снижает в сырых окатышах содержание класса 10,0-14,0 мм на 0,5 % абсолютных величин. Увеличение удельной нагрузки по шихте на окомкователь с 1,0 до 1,7 т/м³·ч при массовой доле влаги 8,6 % приводит к снижению класса 10,0-14,0 мм на 9,0 % абсолютных величин, при этом выход класса крупности окатышей 14,0-16,0 мм возрастает 10-12 % абсолютных величин.

Таким образом, на основании результатов испытаний можно сделать вывод, что стабилизация гранулометрического состава окатышей обеспечивается путем поддержания оптимальной нагрузки по шихте, массовой доли в шихте влаги, бентонита и скорости вращения окомкователя.

Средние обобщающие показатели качества сырых окатышей приведены в табл. 2.

Таблица 2

Средние показатели качества сырых окатышей

Параметры	Значение параметров
Основность окатышей, доли ед.	естественная (0,1)
Состав шихты, %:	
концентрат	99,3
бентонит	0,7
Массовая доля влаги в окатышах, %	8,6-8,7
Массовая доля годного класса (8,0-16,0 мм)	94,0-96,0
Прочность на сброс, раз	5,5-6,0
Прочность на сжатие, кг/окат:	
сырых	1,20-1,40
сухих	3,5-4,0
Предельная температура сушки, °С	500-520
Пористость, %	30-32

Определение оптимальных параметров термоупрочнения (температуры, продолжительности нагрева и обжига) производили с учетом достижения требований, предъявляемых к качеству

железорудных окатышей. Для исследований использовали сырые окатыши крупностью 8,0-16,0 мм, изготовленные в аналогичных условиях.

Сушка сырых окатышей является процессом, предшествующим процессу подогрева и обжига окатышей и во многом определяет качество готового продукта. Опыт производства окатышей на конвейерных обжиговых машинах убедительно показал, что наиболее рациональным способом слоевой сушки сырых окатышей является комбинированный подвод теплоносителя – продувом и прососом. В процессе слоевой сушки происходит перераспределение влаги, что обуславливает образование двух горизонтов сушки и частичного переувлажнения. Причем переувлажнению могут подвергаться горизонты, находящиеся на различном расстоянии от входа теплоносителя в слой.

Следовательно, время пребывания элементарного горизонта окатышей в переувлажненном состоянии определяется его расположением относительно входа теплоносителя в слой. Явление переувлажнения влечет за собой ослабление прочности связей между частицами компонентов шихты в объеме окатыша, «размывает» контакты, что приводит к снижению прочности окатыша или к его разрушению, в результате этого уменьшается газопроницаемость слоя, снижается эффективность сушки. В процессе изучения сушки окатышей определено, что переувлажнение окатышей зависит от температуры и скорости фильтрации теплоносителя. С повышением скорости фильтрации теплоносителя от 0,6 до 2,0 $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ относительная высота переувлажненного слоя окатышей снижается.

С повышением температуры теплоносителя от 250 до 600 °С при постоянной его скорости фильтрации (2,0 $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$) относительное переувлажнение верхнего слоя окатышей возрастает.

При высоких скоростях фильтрации (более 2,0 $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$) визуально наблюдается «кипение» воды на поверхности слоя окатышей, что затрудняет их сушку, увеличивается общее время сушки при дутье снизу. Экспериментально определено, что переувлажнение окатышей на 40% по отношению к первоначальному содержанию влаги увеличивает время сушки на 30% в зависимости от скорости фильтрации. Одновременно с переувлажнением окатышей снижается их первоначальная прочность (кг/окат.) вследствие нарушения капиллярного давления и жестких связей между зёрнами. В отдельных случаях наблюдалось появление трещин в окатышах, а также полное разрушение некоторых окатышей. Этот фактор является важным, поскольку при дальнейшем термоупрочнении подаваемый под давлением теплоноситель может разрушать окатыши, потерявшие свою первоначальную прочность.

Испытаниями установлено, что при переувлажнении окатышей на 30 % их прочность снижается почти в два раза (рис. 2). Кроме того, определено, что окатыши переувлажненные, а затем высушенные имеют прочность на сжатие меньшую (на 10 %), чем окатыши, не подвергавшиеся переувлажнению.

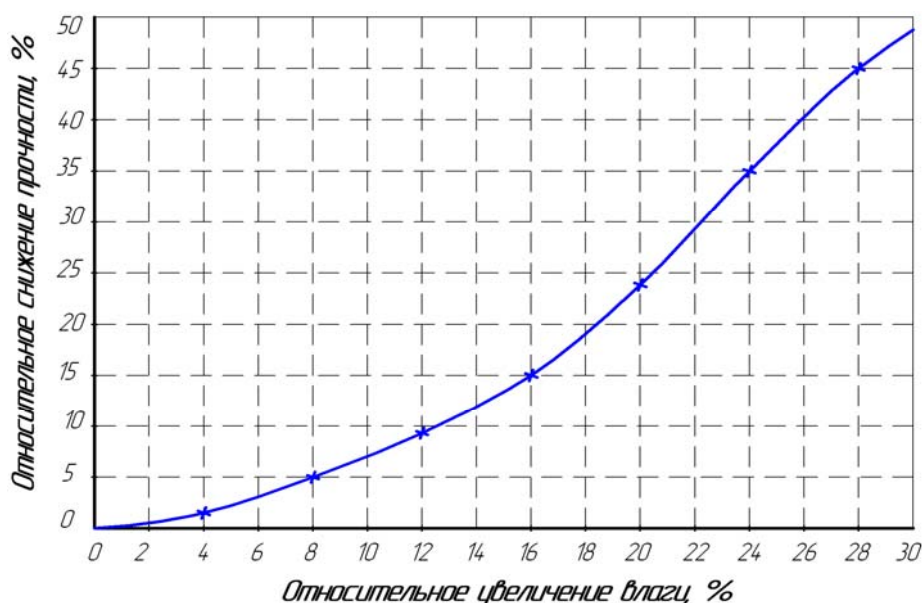


Рис. 2 – Изменение прочности окатышей от переувлажнения их при сушке

Повышение температуры теплоносителя и скорости его фильтрации в большей степени влияет на скорость нагрева нижнего горизонта и в меньшей степени среднего. Прогрев верха слоя в очень незначительной мере зависит от увеличения параметров газового потока.

На рис. 3 приведены данные по сушке сырых окатышей при разной температуре теплоносителя и фиксированной его скорости фильтрации через слой окатышей. Из приведенных данных следует, что использование более нагретого (300 °С) теплоносителя позволяет повысить скорость сушки окатышей.

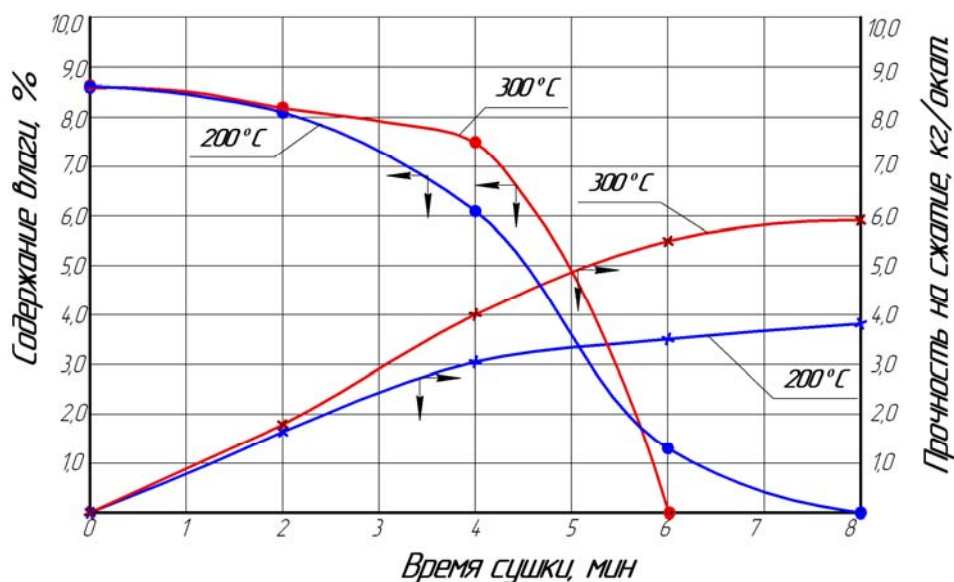


Рис. 3 – Кинетика сушки и прочность на сжатие окатышей при температурах 200 и 300 °С и скорости фильтрации теплоносителя 1,2-1,5 нм³/м²·с

В современных схемах газоздушных потоков обжиговых конвейерных агрегатов температура теплоносителя, направляемого на сушку прососом, снижается до уровня 250-290 °С. При этом соотношение площади зон сушки продувом и прососом изменяется в пределах от 2:1 до 1:1. Указанное соотношение зон сушки продувом и прососом позволяет уменьшить уровень теплотерь в зоне сушки продувом, а сушка прососом в определенной мере совмещается с подогревом слоя, что способствует интенсификации процесса термоупрочнения окатышей.

Проблема переувлажнения окатышей по высоте слоя относится в первую очередь к слоевой сушке относительно высокого их слоя (0,30-0,45 м), характерной для обжиговых конвейерных машин с полным циклом термоупрочнения и охлаждения окатышей на решетке.

В значительно меньшей мере они могут проявляться при сушке слоя небольшой высоты (0,18-0,22 м) на решетке системы с вращающейся печью и кольцевым охладителем. С учетом этого, а также с целью снижения энергозатрат на процесс получения обожженных окатышей, в последнее время все большее распространение получают схемы без реверса теплоносителя при сушке окатышей.

Таким образом, на основании проведенных исследований и с учетом мирового опыта термоупрочнения окатышей предлагается с целью уменьшения теплотерь, повышения удельной производительности зон сушки при сохранении газодинамических свойств слоя производить сушку сырых окатышей без реверса теплоносителя по следующему режиму:

- сушка 1 прососом при температуре теплоносителя 290-350 °С (уточняется расчетом);
- сушка 2 прососом при температуре теплоносителя на входе в слой 300-370 °С в начале зоны и 500-650 °С в конце;
- соотношение площади зон сушки 1 и 2 в пределах от 50×50 до 25×75 %.

Проведенными ранее исследованиями на тонкодисперсных железорудных концентратах с удельной поверхностью 200-230 м²/кг установлено, что получение обожженных окатышей, устойчивых от чрезмерного разрушения их при восстановлении, необходим умеренный нагрев до максимально допустимых температур изотермической выдержки при обжиге, в особенности в интервале температур начала интенсивного окисления магнетита. Соблюдение указанного нагрева при термоупрочнении окатышей способствует формированию однородной структуры по всему

сечению окатыша и глубокой степени окисления магнетита, что обеспечивает высокую восстановимость окатышей в процессе доменной плавки с минимальным образованием мелочи, лучшему использованию восстановительного газа в печи и снижению удельного расхода кокса на тонну чугуна.

В процессе нагрева и обжига окатышей изменяется степень окисления магнетита в окатышах, повышаются их прочностные свойства. Изменение свойств окатышей является результатом целого ряда физико-химических процессов, которые происходят при высокотемпературном обжиге. В зависимости от состава компонентов в шихте окомкования, характера их взаимодействия, а также условий протекания обжига, упрочнение окатышей может происходить как в твердофазном состоянии, так и в присутствии жидкой фазы.

При окислительном упрочняющем обжиге окатышей из магнетитового концентрата руд Белановского месторождения происходит окисление магнетита до гематита. Этот процесс имеет существенное значение для формирования структуры окатышей. Своевременное завершение процесса окисления, активность свежесформированной окиси железа обуславливают рост скорости спекания частиц, получение мелкопористой однородной текстуры.

В процессе изучения влияния температуры и времени обжига окатышей определено, что при температуре выше 950 °С и малом времени окисления (менее 5 мин) существуют четкие различия между высокой степенью окисления периферии окатыша и ее отсутствием в центре. При температуре 1150 °С и небольшом времени окисления (менее 15 мин) наблюдается зональное строение структуры окатыша, ядро которого (диаметром 2-3 мм) состоит из магнетита. Рассчитанная глубина окисления магнетита в окатышах от температуры и продолжительности обжига приведена в табл. 3.

Таблица 3

Рассчитанная глубина окисления окатышей в зависимости от температуры и продолжительности обжига

Тип окатышей	Температура нагрева, °С	Продолжительность обжига, мин			
		5	10	15	25
		Глубина окисления окатышей, мм			
Окатыши нефлюсованные из концентрата с удельной поверхностью 270 м ² /кг	550	3,0	3,3	3,8	4,2
	750	4,8	5,0	5,3	5,6
	950	5,5	5,9	6,0	6,5

Экспериментально определено, что нагрев окатышей из концентрата руд Белановского ГОКа необходимо осуществлять в два периода. Период интенсивного нагрева (100-150 °С/мин) от температуры 500-600 до 850-1000 °С на колосниковой решетке, при которой происходит интенсивное окисление магнетита, и период медленного нагрева во вращающейся печи (менее 100 °С/мин) от температуры 1050 °С до предельно допустимой температуры обжига. Соблюдение установленного нагрева при термоупрочнении окатышей позволяет получить окатыши с однородной структурой и с высокими физико-механическими и металлургическими свойствами.

Быстрый нагрев окатышей, без предварительного окисления (что часто наблюдается в верхних горизонтах обжигаемого слоя) приводит к зональной структуре окатыша, с окисленной периферией и магнетитовым ядром.

Влияние скорости нагрева на прочностные свойства окатышей и содержание закиси железа в них хорошо иллюстрируются результатами, представленными в табл. 6.

Повышенные скорости нагрева снижает прочностные свойства окатышей.

Данные табл. 4 позволяют заключить, что уменьшение прочности при сжатии зависит от степени окисленности магнетита, которая косвенно характеризует структуру окатышей.

Таблица 4

Зависимость качества окатышей от скорости их нагрева в процессе обжига

Скорость нагрева, °С/мин	Содержание Fe ⁺⁺ , %	Прочность окатышей		
		на сжатие, кг/окат	на дробимость (+5 мм), %	на истираемость (минус 0,5 мм), %
30-40	0,6	345	96,9	2,0
60-90	3,1	312	90,7	3,6
120-150	8,0	260	89,9	4,8

При изучении режима упрочняющего обжига окатышей установлено, что предельно допустимая температура обжига окатышей определяется температурой размягчения шихты окомкования. Для окатышей из исследуемого концентрата Белановского ГОКа она составляет 0,92-0,95 доли ед. от температуры, соответствующей верхней точке размягчения шихты и равна для неофлюсованных окатышей 1290-1330 °С.

Исследования по влиянию продолжительности обжига на качество окатышей показали, что этот параметр оказывает такое же влияние на процесс формирования структуры и свойства, как температура обжига, но в меньшей степени. У окатышей при увеличении продолжительности обжига возрастает прочность при сжатии и прочность на удар, а истираемость уменьшается.

На основании сопоставления качества окатышей, обожженных при разных температурно-временных режимах с требованиями к их качеству, определены наиболее оптимальные условия термообработки и соответствующие этим условиям показатели качества (табл. 5).

Таблица 5

Режим обжига окатышей и показатели их качества

Показатель	Значение показателя
1 Основность окатышей (CaO+MgO)/SiO ₂ , доли ед.	естественная (0,1)
2 Температура сушки, °С	300-350
3 Скорость нагрева, °С/мин	60-90
4 Температура обжига, °С	1290-1330
5 Продолжительность обжига, мин	5-10
6 Прочность окатышей:	
- на сжатие, кг/окат.	350-434
- на удар (выход класса +5,0 мм), %	95,6-96,8
- истираемость (выход класса минус 0,5 мм), %	2,9-3,9
7 Показатели при восстановлении (ДСТУ 3202-95):	
- прочность (выход класса +5,0 мм), %	80,9-85,6
- истираемость (выход класса минус 0,5 мм), %	3,5-4,0
- степень восстановления, %	50,6-55,1

Обобщающие регламентные данные по получению сырых и обожженных в лабораторных условиях окатышей приведены в табл. 6, 7, на рис. 4, 5.

Таблица 6

Регламентные показатели технологии получения окатышей

Показатель	Значение показателя
Массовая доля влаги в концентрате, %	8,5±0,2
Состав шихты, %:	
- концентрат	99,3
- упрочняющая добавка (бентонит)	0,7
Сырые и сухие окатыши:	
- массовая доля влаги, %	8,6±0,2
- прочность на сжатие, кг/окат.:	
сырых	1,3
сухих	3,5
Сушка окатышей:	
- температура подогрева, °С	290-360
- продолжительность сушки, мин	6-7
Подогрев окатышей:	
- температура подогрева, °С	950-1000
- продолжительность подогрева, мин	3-5
Нагрев окатышей:	
- температура нагрева, °С	1050-1150
- продолжительность нагрева, мин	5-7
Обжиг окатышей:	
- температура обжига, °С	1290-1330
- продолжительность обжига, мин	5-10
Охлаждение окатышей:	
- скорость охлаждения, °С/мин	не более 100
- конечная температура окатышей, °С	не более 110

Таблица 7

Показатели качества окатышей

Показатель	Значение показателя
Обожженные окатыши:	
Прочность окатышей на сжатие, кг/окат.	340,0
Прочность во вращающемся барабане, %:	
- на удар (выход фракции + 5,0 мм)	96,9
- на истирание (выход фракции минус 0,5 мм)	2,9
Массовая доля в окатышах:	
Fe _{общ.}	65,5
FeO	0,9-1,1
CaO	0,15
SiO ₂	5,10
MgO	0,40
S	0,005
Основность окатышей ((CaO+MgO)/SiO ₂), доли ед.	0,1
Восстановленные окатыши:	
Прочность при низкотемпературном восстановлении (ДСТУ 3202-95), %:	
- на удар (выход фракции + 5,0 мм)	85,3
- на истирание (выход фракции минус 0,5 мм)	3,6
- степень восстановления, %	55,0
Скорость восстановления (CdR/dt) при 40 % степени восстановления (ДСТУ 3204-95), % отнятия кислорода в мин	0,76
Степень восстановления при температуре 1100 °С, %	91,3
Максимальное набухание (ДСТУ 3208-95), %	9,4

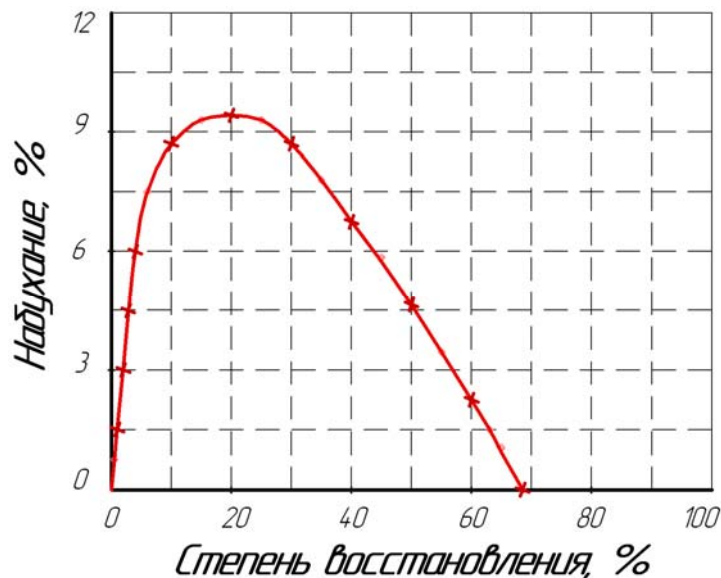


Рис. 4 – Изменение набухания окатышей в зависимости от степени восстановления

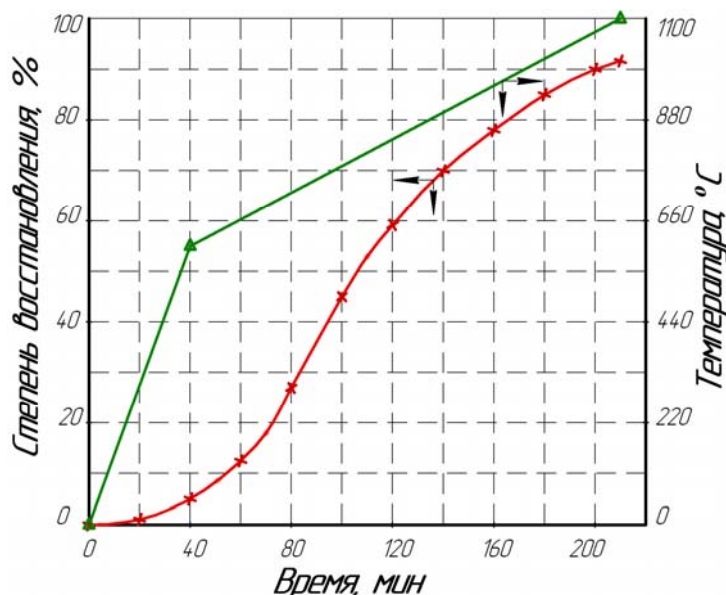


Рис. 5 – Изменение степени восстановления окатышей в зависимости от температуры и времени их восстановления

Таким образом, на основании результатов лабораторных испытаний (табл. 6, 7) показана возможность получения удовлетворительного качества окатышей из концентрата Белановского ГОКа.

ВЫВОДЫ:

Определены основные регламенты получения сырых и обожженных окатышей из концентрата Белановского ГОКа, содержащего 67,3 % общего железа и 4,86 % кремнезема, качество которых удовлетворяет требованиям, предъявляемым к обожженным окатышам для последующего доменного передела: прочность на сжатие более 250 кг/окат., показатель прочности на дробимость и истираемость (ДСТУ 3200-95) равен 96,9 % (по классу 5,0 мм) и 2,9 % (по классу минус 0,5 мм), соответственно.

Определено, что для получения равномерного гранулометрического состава сырых и обожженных окатышей с удовлетворительными прочностными свойствами внешняя удельная поверхность концентрата и его массовая доля влаги должны составлять $250 \pm 20 \text{ м}^2/\text{кг}$ и $8,6 \pm 0,2 \%$, соответственно.

Изучение закономерностей влияния основных параметров термоупрочнения окатышей на их показатели качества, транспортабельность и поведение при восстановлении показало, что эти закономерности определяются физико-химическими свойствами исходного сырья и минеральным составом пустой породы и условиями термоупрочнения.

Продолжительность обжига влияет на прочностные свойства окатышей аналогично температуре обжига, только в значительно меньшей степени и, в основном, на окатыши, упрочненные за счет твердофазного спекания.

Определены интервалы температур обжига, в которых возможно достижение высокого качества окатышей. Максимальная температура интервала определяется явлением взаимного припекания окатышей в прочные спеки, а минимальная температура интервала ограничивается требованиями к качеству окатышей.

Установлена закономерность формирования вещественного состава и структуры окатышей в зависимости от глубины окисления концентрата и режима обжига окатышей. Для обеспечения высоких показателей качества окатышей, структура их должна быть однородной, равнозернистой и мелкопористой. Рудный минерал должен быть представлен преимущественно гематитом, а шлак, преимущественно в виде стекла и равномерно распределен между рудными зёрнами и агрегатами.

По величине влияния на металлургические показатели качества окатышей технологические параметры, в порядке степени важности, можно расположить в следующей последовательности: химико-минеральный состав шихты, скорость нагрева, оптимальная температура обжига, продолжительность выдержки при оптимальной температуре обжига.

Определены оптимальные параметры термообработки, обеспечивающие максимально достижимую в обжиге величину всех показателей качества окатышей (табл. 3.5, 3.6), изготовленных из исследуемого концентрата. Температура изотермической выдержки в зоне обжига определяется температурой плавления шихты (0,98-0,95 доли ед. от температуры плавления шихты) и равна 1290-1330 °С.