

Ф. М. Журавлев /к. т. н./,  
А. К. Тараканов /д. т. н./, В. П. Лялюк /д. т. н./  
Национальная металлургическая академия  
Украины

Е. В. Чупринов, Д. А. Кассим /к. т. н./  
Металлургический институт КНУ

## Влияние минерального состава нерудной части концентрата на качество железорудных окатышей

*Изучены сравнительные металлургические характеристики неофлюсованных и офлюсованных обожженных окатышей, изготовленных из концентратов с разным минеральным составом нерудной части. Результаты исследований позволяют оценивать влияние вида концентрата на металлургические свойства производимых окатышей. (Ил. 1. Табл. 2. Библиогр.: 3 назв.)*

**Ключевые слова:** железорудный концентрат, производство окатышей.

*Comparative metallurgical characteristics of unfluxed and fluxed pellets which are produced from iron-ore concentrates with different mineral composition are studied. Outcomes of the investigations give the possibility to evaluate the influence of the iron-ore concentrates composition on the metallurgical properties of the pellets.*

**Key words:** iron-ore concentrates, pellets production.

Качество железорудных материалов, связанное с их вещественным составом, чаще всего оценивают по химическому составу, выделяя как важнейшие показатели общие содержания Fe и SiO<sub>2</sub>. Однако на металлургические свойства железорудных окатышей существенно влияет минералогический состав нерудной части концентрата, из которого окатыши производятся. Главным компонентом нерудной части концентрата является кварц (SiO<sub>2</sub>), но на процесс термического упрочнения окатышей оказывает влияние наличие в концентрате сложных минералов, которые могут включать в себя связанные между собой оксиды и гидроксиды Si, Fe, Al, Mn, Mg, Ti, K, Na и других элементов. Упрочнение окатышей при их обжиге в значительной мере зависит от наличия в нерудной части концентрата легкоплавких и тугоплавких минералов [1; 2], особенно – если окатыши неофлюсованные.

При термоупрочнении окатышей их необходимые металлургические характеристики достигаются как за счет твердофазного спекания рудных фаз, так и за счет образования при обжиге расплава, застывающего в процессе охлаждения в виде железосиликатного стекла и образующего структуру окатышей необходимой прочности в исходном состоянии и в ходе восстановления в доменной печи [1–3].

Необходимую прочность обожженным окатышам в большинстве случаев можно обеспечить за счет одного только твердофазного спекания минералов шихты. В процессе же восстановления окатышей их достаточная прочность достигается при наличии в их структуре опре-

деленного минимального (2–6 %) количества застывшего расплава в виде железосиликатного стекла. Окатыши, скрепленные только рекристаллизованным гематитом, быстро разрушаются в печи при восстановлении гематита. Если при производстве офлюсованных окатышей получить минимально необходимое количество расплава не вызывает трудностей, то в случае производства неофлюсованных окатышей образование расплава может быть проблематичным [2].

К сожалению, и доменщики, и производители сырья при выборе степени офлюсования окатышей для доменной плавки не всегда учитывают технологическую возможность получения окатышей с нужными прочностными свойствами.

Исходя из того, что термоупрочнение окатышей осуществляется в окислительной атмосфере, магнетит в процессе их нагрева до температур 1100–1200 °С окисляется до гематита, а гематит не образует эвтектических соединений с кремнеземом – основным минералом пустой породы концентрата. Поэтому источником расплава могут быть преимущественно исходные минералы нерудной части концентрата.

Анализ химических и минералогических составов магнетитовых железорудных концентратов, используемых в качестве основного компонента шихты в производстве окатышей для доменной плавки на разных горнообогатительных комбинатах Украины и России, показал их существенное различие как по содержанию в них железа (63,7–70,2 %) и кремнезема (9,3–2,7 %),

так и по минеральному составу нерудной части (табл. 1).

Если химический состав и физические характеристики магнетитов руд разных месторождений мало различаются между собой, то минералы, входящие в нерудную часть концентратов из руд разных месторождений, имеют между собой существенные различия (табл. 2).

Минералы нерудной части концентратов можно разделить на три основные группы по температуре их плавления: это легкоплавкие минералы с относительно низкой (980–1080 °С) температурой плавления, достигаемой в зоне нагрева окатышей при их термоупрочнении, – эгирин (Э), родусит (Р), зеленая слюда (С); далее – тугоплавкие минералы с высокой (1250–

Таблица 1

Минеральный состав нерудной части концентратов для производства окатышей

| Месторождение руды (ГОК)   | Содержание в концентрате, % |                      | Содержание минералов в нерудной части концентрата, % |          |           | Силикаты нерудной части (в порядке уменьшения их количества) | Карбонаты нерудной части |
|----------------------------|-----------------------------|----------------------|------------------------------------------------------|----------|-----------|--------------------------------------------------------------|--------------------------|
|                            | Fe <sub>общ</sub>           | SiO <sub>2 общ</sub> | Кварц                                                | Силикаты | Карбонаты |                                                              |                          |
| Первомайское (СевГОК)      | 64,7–65,8                   | 8,8–7,2              | 74                                                   | 17       | 9         | Куммингтонит, родусит, эгирин, биотит                        | Доломит                  |
| Анновское (СевГОК)         | 65,3–66,5                   | 8,1–6,3              | 19                                                   | 80       | 1         | Родусит, биотит, куммингтонит                                | Кальцит                  |
| Петровское (ЦГОК)          | 66,8–68,3                   | 6,1–4,5              | 5–54                                                 | 90–38    | 5–8       | Актинолит, куммингтонит, биотит, хлорит                      | Доломит                  |
| Глееватское (ЦГОК)         | 64,5–66,2                   | 8,9–6,4              | 46–70                                                | 40–2     | 14–28     | Хлорит, куммингтонит                                         | Сидероплезит             |
| Ингулецкое (ИнГОК)         | 63,9–69,8                   | 9,2–3,1              | 40                                                   | 53       | 7         | Куммингтонит, хлорит                                         | Кальцит, доломит         |
| Днепровское (ПГОК)         | 65,3–67,4                   | 7,8–4,3              | 25                                                   | 66       | 9         | Куммингтонит, биотит, хлорит, родусит                        | Сидероплезит, доломит    |
| Лебединское (ЛебГОК, ОЭМК) | 68,4–70,2                   | 4,6–2,7              | 45–70                                                | 50–25    | 5         | Родусит, куммингтонит, биотит, зеленая слюда                 | Доломит                  |
| Михайловское (МихГОК)      | 63,7–66,3                   | 9,3–6,2              | 60–62                                                | 35–33    | 5         | Зеленая слюда, куммингтонит, родусит, эгирин                 | Сидероплезит, доломит    |
| Костамукшское (КостГОК)    | 66,2–67,3                   | 7,4–6,5              | 69                                                   | 29       | 2         | Грюнерит, биотит                                             | Кальцит                  |

Таблица 2

Химический состав силикатов нерудной части концентратов для производства окатышей

| Наименование силиката | Содержание компонентов, % |       |                                |      |       |                  |                                |      |                   |                  |                  | ППП, % |
|-----------------------|---------------------------|-------|--------------------------------|------|-------|------------------|--------------------------------|------|-------------------|------------------|------------------|--------|
|                       | Fe <sub>общ</sub>         | FeO   | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO   | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MnO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub> |        |
| Эгирин                | 24,09                     | –     | 34,42                          | –    | –     | 52,27            | –                              | –    | 13,31             | –                | –                | 0,80   |
| Родусит               | 17,70                     | 5,91  | 18,78                          | –    | 11,74 | 56,00            | –                              | –    | 6,52              | –                | –                | 1,05   |
| Зеленая слюда         | 19,14                     | 4,90  | 21,90                          | –    | 5,25  | 52,50            | 0,70                           | –    | 0,26              | 10,15            | 0,04             | 4,30   |
| Биотит                | 15,26                     | 18,05 | 1,75                           | –    | 9,35  | 36,09            | 18,84                          | 0,18 | –                 | 9,91             | 1,80             | 4,03   |
| Куммингтонит          | 30,19                     | 38,80 | –                              | 0,25 | 6,87  | 51,56            | –                              | 0,07 | –                 | –                | –                | 2,45   |
| Хлорит                | 22,51                     | 24,44 | 5,00                           | –    | 5,35  | 43,77            | 12,50                          | –    | –                 | –                | –                | 8,94   |
| Кварц                 | 0,80                      | –     | 1,14                           | 0,03 | –     | 98,50            | –                              | –    | –                 | –                | –                | 0,30   |

#### Молекулярные формулы силикатов

|                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Эгирин –        | Na Fe <sup>+3</sup> (Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> );                                                                                                                                                                                                                                     |
| Родусит –       | Na <sub>2</sub> (Fe <sub>0,7</sub> <sup>+2</sup> Mg <sub>2,3/3</sub> ) Fe <sub>2</sub> <sup>+3</sup> (Si <sub>8</sub> O <sub>22</sub> ) (OH) <sub>2</sub> ;                                                                                                                                |
| Зеленая слюда – | (K <sub>0,95</sub> Na <sub>0,05</sub> ) (Mg <sub>0,579</sub> Fe <sub>0,3</sub> <sup>+2</sup> Fe <sub>1,12</sub> <sup>+3</sup> Ti <sub>0,001</sub> ) <sub>2</sub> (Si <sub>3,84</sub> Al <sub>0,06</sub> Fe <sub>0,1</sub> <sup>+3</sup> ) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ; |
| Биотит –        | K (Mg <sub>3,6</sub> <sup>+2</sup> Fe <sub>1,07</sub> <sup>+2</sup> Fe <sub>0,09</sub> <sup>+3</sup> Ti <sub>0,08</sub> Al <sub>0,15</sub> Mn <sub>0,01</sub> ) <sub>3</sub> [(Si <sub>2,57</sub> Al <sub>1,43</sub> ) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ] (OH) <sub>2</sub> ;                  |
| Куммингтонит –  | (Fe <sub>5,32</sub> <sup>+2</sup> Mg <sub>1,68</sub> ) <sub>7</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>11</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> ;                                                                                                                                                    |
| Хлорит –        | Fe <sub>3,7</sub> <sup>+2</sup> Mg <sub>1,3</sub> <sup>+2</sup> Fe <sub>1</sub> <sup>+3</sup> (Si <sub>3</sub> Al) O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub> ;                                                                                                                                     |
| Кварц –         | SiO <sub>2</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                           |

1350 °С) температурой плавления, развиваемой только в зоне обжига над слоем окатышей в течение их непродолжительного пребывания в этой зоне, – биотит (Б), куммингтонит (К), хлорит (Х); и, наконец, – минерал кварц (Кв) с температурой плавления 1720 °С, который не расплавляется при максимальных температурах, развиваемых в слое обжигаемых окатышей.

Кроме того, следует иметь в виду, что при максимальной температуре термоупрочнения (1300–1350 °С), развиваемой над слоем обжигаемых окатышей на конвейерной обжиговой машине, температура на границе «слой – постель» на 50–70 °С ниже, чем над слоем.

Учитывая значение влияния количества, химического состава и свойств расплавов, образующихся при термоупрочнении окатышей, на их характеристики [2], влияние минерального состава нерудной фазы концентрата на показатели качества изучали на примере неофлюсованных и офлюсованных обожженных окатышей, изготовленных при одинаковых технологических параметрах. Методика исследования заключалась в следующем: из исходного концентрата магнитного обогащения ЦГОК, содержавшего 8,6 %  $\text{SiO}_2$ , изготавливали магнитным способом обогащения пробу мономинеральной фракции магнетита необходимой массы, содержавшей 71,3 %  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  с минимально возможным (0,65 %) содержанием кремнезема. А из хвостов нерудной части после обогащения руд Криворожского (ЦГОК, СевГОК – Украина) и Лебединского (ЛеБГОК – Россия) месторождений выделялись мономинеральные фракции каждого имеющегося в этих рудах силиката нерудной части в необходимом для проведения испытаний количестве.

Затем высушенные общие пробы каждой мономинеральной фракции (магнетита и каждого силиката) доизмельчались до одинаковой крупности (по удельной поверхности) для создания равных условий при получении сырых окатышей. Необходимые добавки в шихту (флюс и бентонитовая глина) во всех опытах были также одинаковой крупности. Для оценки влияния основности окатышей на их свойства подготавливали две шихты. В первой серии испытаний в каждую шихту к мономинеральной фракции магнетита добавляли 0,5 % бентонитовой глины и по одной мономинеральной фракции нерудной части из расчета получения в шихте общего содержания кремнезема, равного 5,0 %. Во второй серии испытаний в каждую такую шихту добавляли известняк для получения основности ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ) окатышей, равной 1,0. Технологические параметры получения сырых окатышей из этих шихт были практически одинаковыми, что

подтверждалось значениями объемной доли общих пор полученных сырых окатышей диаметром  $14 \pm 1$  мм в пределах  $34 \pm 1$  %.

Сырые окатыши из обеих шихт подвергались термоупрочнению в электропечи при одинаковых во всех опытах режимах сушки, нагрева (скорость нагрева – 40 °С/мин с изотермической выдержкой 30 мин при 800 °С для полного окисления магнетита), продолжительности высокотемпературного обжига (7 мин) и охлаждения (скорость охлаждения – 40 °С/мин). Изменялась только максимальная температура обжига: 1250 °С – для офлюсованных окатышей и 1300 °С – для неофлюсованных. Металлургические характеристики обожженных окатышей определялись стандартными методами. Изучались также минералогический состав и микроструктура обожженных окатышей.

Из-за добавки известняка среднее содержание железа у неофлюсованных окатышей было примерно на 3,0 % выше, чем у офлюсованных. Содержание  $\text{FeO}$ , зависящее от степени окисленности магнетита, у неофлюсованных окатышей с тугоплавкими силикатами ниже ( $1,1 \pm 0,3$  %), чем у окатышей с легкоплавкими силикатами ( $1,7 \pm 0,4$  %). Аналогичная зависимость наблюдается и у офлюсованных окатышей:  $1,7 \pm 0,4$  % и  $2,5 \pm 0,3$  % соответственно. Следует также отметить, что содержание  $\text{FeO}$  в офлюсованных обожженных окатышах с любыми силикатами выше, чем у аналогичных неофлюсованных. Это объясняется большим количеством расплава в структуре обжигаемых окатышей, препятствующего диффузии кислорода к зернам магнетита.

При практически одинаковой пористости сырых неофлюсованных и офлюсованных окатышей с тугоплавкими и легкоплавкими силикатами нерудной части концентрата объемная доля открытых пор у обожженных окатышей разного типа разнится. Так, объемная доля открытых пор у неофлюсованных окатышей составила  $17,2 \pm 7,0$  % и  $7,2 \pm 2,6$  %, а у офлюсованных –  $27,2 \pm 3,7$  % и  $15,1 \pm 3,8$  % соответственно (рис. 1а, а').

Прочностные показатели обожженных окатышей из разных шихт также существенно различаются между собой. Так, прочность на сжатие неофлюсованных окатышей с тугоплавкими силикатами составила  $4,13 \pm 0,28$  кН/ок, с легкоплавкими –  $5,36 \pm 0,46$  кН/ок, а офлюсованных окатышей –  $3,80 \pm 0,62$  кН/ок и  $5,23 \pm 0,53$  кН/ок соответственно (рис. 1б, б'). Прочность на удар неофлюсованных окатышей с тугоплавкими силикатами составила  $93,1 \pm 3,4$  %, с легкоплавкими –  $97,8 \pm 0,7$  %. У офлюсованных окатышей прочность на удар составила: с тугоплавкими

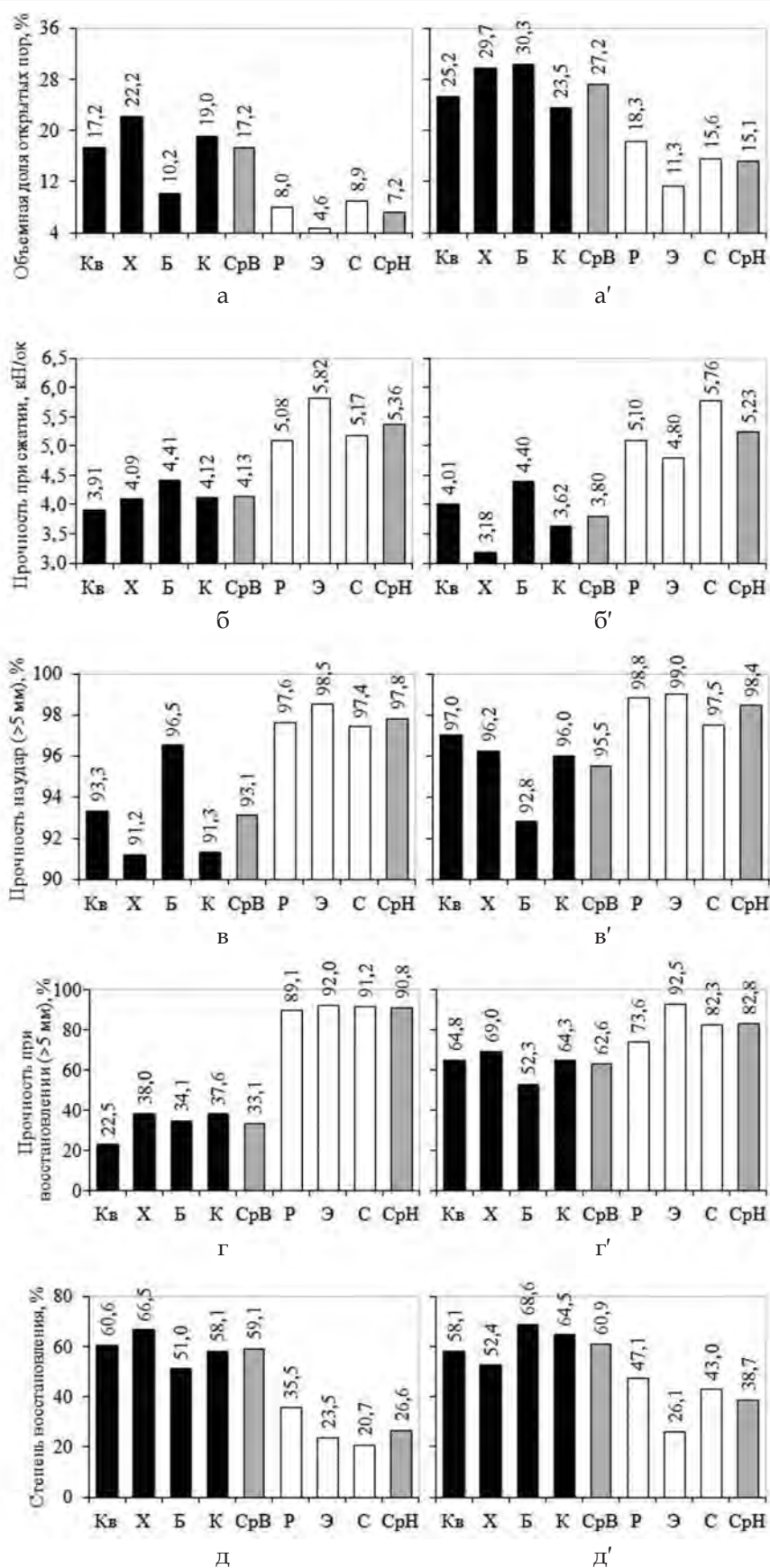


Рис. 1. Металлургические характеристики обожженных неофлюсованных (а-д) и офлюсованных (а'-д') окатышей из концентратов с разным минеральным составом нерудной части:

Кв, X, Б, К, Р, Э, С – соответственно, кварц, хлорит, биотит, куммингтонит, родусит, эгирин, зеленая слюда; СрВ и СрН – соответственно, средние значения с высокотемпературными (тугоплавкими) и низкотемпературными (легкоплавкими) минералами

силикатами  $95,5 \pm 2,7$  %, с легкоплавкими силикатами –  $98,4 \pm 0,9$  % (рис. 1в, в').

Если из готовых окатышей с пониженной прочностью и частично разрушившихся в процессе транспортирования и складирования образовавшуюся мелкую фракцию можно отсеять перед доменной печью, то разрушение окатышей в процессе восстановления в доменной печи существенно ухудшает газопроницаемость столба доменной шихты. Поэтому характеристики поведения окатышей в процессе восстановления имеют большое значение для эффективной работы печи.

Проведенные испытания показали, что показатели прочности при восстановлении неофлюсованных окатышей с тугоплавкими силикатами ( $33,1 \pm 10,6$  %) существенно хуже, чем аналогичные показатели неофлюсованных окатышей с легкоплавкими силикатами ( $90,8 \pm 1,2$  %) (рис. 1г, г'). При этом степень восстановления первых ( $59,1 \pm 8,1$  %) выше, чем вторых ( $26,6 \pm 8,9$  %) (рис. 1д, д'). Аналогичные зависимости указанных выше показателей металлургических характеристик неофлюсованных окатышей от минерального состава нерудной части концентрата наблюдаются и у офлюсованных окатышей, но с иными абсолютными значениями этих показателей. Так, показатели прочности при восстановлении офлюсованных (основность 1,0 ед.) окатышей с тугоплавкими силикатами составили  $62,6 \pm 10,3$  %, а аналогичные показатели у этих окатышей с легкоплавкими силикатами были  $82,8 \pm 9,7$  %. При этом степень восстановления офлюсованных окатышей с туго- и легкоплавкими силикатами составила  $60,9 \pm 8,5$  % и  $38,7 \pm 12,6$  % соответственно (рис. 1д, д').

Пределы абсолютных значений каждой из металлургических характеристик неофлюсованных и офлюсованных обожженных окатышей, изготовленных из концентратов с разным минеральным составом нерудной части (табл. 1), позволяют выбирать оптимальные составы окатышей и концентраты для их производства для достижения требуемых каждым потребителем показателей качества.

Показанные выше различия металлургических характеристик неофлюсованных и офлюсованных окатышей, изготовленных из концентратов с разным минеральным составом нерудной части, являются следствием разного влияния этих силикатов на микроструктуру окатышей, количество расплава и степень его кристаллизации в охлажденных окатышах. Как показал кристаллооптический анализ микроструктур, для всех исследованных окатышей харак-

терны как твердофазный, так и жидкофазный механизмы спекания рудных зерен. Степень рекристаллизации зерен гематита обуславливается количеством расплава и его свойствами. Степень кристаллизации самого расплава в зависимости от присутствия в шихте разных нерудных минералов различна, что определяет уровень прочностных свойств окатышей: чем выше степень кристаллизации шлаковой связки, тем ниже прочность окатышей при минимально необходимом количестве стекланной связки [1]. Наличие равномерно распределенной силикатной стекланной связки в структуре окатышей, связывание и блокирование ею рудных зерен обеспечивают окатышам высокую прочность при восстановлении. Имеющиеся в составе легкоплавких силикатов небольшие количества оксидов щелочных металлов ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ) снижают температуру их плавления, уменьшают вязкость и кристаллизационную способность расплава и способствуют увеличению прочности окатышей как при транспортировке и складировании, так и в процессе восстановления в доменной печи.

### Выводы

1. Неофлюсованные и офлюсованные окатыши с легкоплавкими силикатами имеют лучшие показатели прочности, чем окатыши с тугоплавкими силикатами.
2. Неофлюсованные окатыши с легкоплавкими силикатами прочнее, чем офлюсованные (основность 1,0 ед.) окатыши с теми же силикатами.
3. Неофлюсованные окатыши с тугоплавкими силикатами являются менее прочными, чем офлюсованные окатыши с теми же силикатами.
4. Вне зависимости от основности окатышей и температуры плавления силикатов, чем выше показатель прочности, тем ниже восстановимость окатышей.

### Библиографический список

1. Журавлев Ф. М. Окатыши из концентратов железистых кварцитов / Ф. М. Журавлев, Т. Я. Мальшева. – М.: Металлургия, 1991. – 127 с.
2. Влияние минерального состава пустой породы концентрата на показатели качества окатышей / Ф. М. Журавлев, А. В. Мерлин, Л. А. Дрожилов [и др.] // Сталь. – 1977. – № 3. – С. 197–200.
3. Юсфин Ю. С. Обжиг железорудных окатышей / Ю. С. Юсфин, Т. Н. Базилевич. – М.: Металлургия, 1973. – 272 с.

**Поступила 31.03.2016**