

УДК 669.052.42:539.016

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЙ В ОБОЖЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШАХ ПРИ ИХ ОХЛАЖДЕНИИ

*Меламуд С.Г., к.т.н., зам. директора учебно-проектного центра*

*«Проектный институт УРФУ» (e1944 @yandex . ru)*

*Юрьев Б.П., к.т.н., доцент кафедры теплофизики и информатики*

*в металлургии (yurev-b@mail . ru)*

**Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина**

(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

**Аннотация.** Предложена методика расчета напряжений в обожженных зональных окисленных окатышах на основе возникновения при их охлаждении напряженного состояния на границе зон с разной температурой кристаллизации шлаковых включений. Проведены расчеты напряженного состояния для качканарских окатышей с разным расположением гематитовых и магнетитовых зон. Показано, что при охлаждении обожженных зональных окатышей на воздухе на границе магнетитового ядра и гематитовой оболочки возникают растягивающие нормальные напряжения в радиальном направлении, способствующие отрыву ядра от оболочки. Установлено, что наличие трехзонной структуры окатышей (магнетитовое ядро – гематитовая оболочка – поверхностная магнетитовая пленка) способствует перераспределению нормальных напряжений по их сечению. Увеличение толщины поверхностной магнетитовой пленки уменьшает растягивающие напряжения в радиальном направлении на границе ядра и оболочки, в результате чего прочность окатышей повышается. При охлаждении обожженных окатышей с гематитовым ядром и магнетитовой оболочкой в нейтральной атмосфере на границе зон возникают растягивающие нормальные напряжения в тангенциальном направлении, способствующие снижению прочности окатышей.

**Ключевые слова:** методика, зональные окатыши, напряжение, прочность, охлаждение, атмосфера, магнетитовые и гематитовые зоны, структура, режимные параметры.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-12-865-870

Для получения полностью окисленных железорудных магнетитовых окатышей по всему объему и с однородной структурой необходимы низкие скорости нагрева и температуры не выше 1000 °С. В реальных условиях это приведет к увеличению продолжительности процесса обжига, низкой производительности обжиговых конвейерных машин и значительному увеличению их размеров. В результате сам процесс производства окатышей окажется экономически нецелесообразным. Поэтому в промышленных условиях обжиг окатышей ведут при температурах выше 1000 °С (1250 – 1350 °С) и скорости нагрева 100 °С/мин и выше. При таких параметрах обжига окатыши, как правило, имеют зональное строение [1 – 7]: магнетитовое ядро и гематитовую оболочку, т.е. ярко выраженное двухфазное строение. При охлаждении обожженных частично окисленных зональных окатышей в газовой атмосфере, близкой к нейтральной, гематит также диссоциирует с поверхности. В результате структура окатышей получается трехзонной: магнетитовое ядро – гематитовая оболочка – поверхностная магнетитовая пленка.

При охлаждении таких зональных окатышей в результате разницы температурных интервалов затвердевания шлаковых связей в гематитовой оболочке и магнетитовом ядре возникают напряжения (напряженное состояние), которые приводят к появлению концентри-

ческих трещин на границе раздела фаз и к частичному снижению прочности.

Чтобы произвести ориентировочные расчеты напряженного состояния обожженных зональных окатышей, их сложную структуру рассматривали как двухкомпонентную модель: сферическое ядро и оболочка (рис. 1).

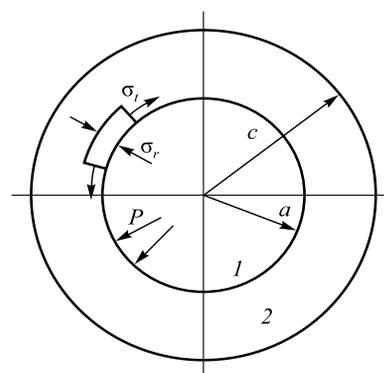


Рис. 1. Схема структурного элемента:  $c$  – радиус элемента;  $a$  – радиус ядра;  $P$  – равномерное давление на границе ядра (1) и оболочки (2);  $\sigma_r$  и  $\sigma_t$  – нормальные напряжения в радиальном и тангенциальном направлениях

Fig. 1. Scheme of the structural element:  $c$  – radius of the element;  $a$  – radius of the nucleus;  $P$  – uniform pressure on the border of the nucleus (1) and the blanket (2);  $\sigma_r$  and  $\sigma_t$  – normal stress in radial and tangential directions

Допускается, что после высокотемпературного обжига зональных окатышей в результате жидкофазного спекания магнетитовое ядро и гематитовая оболочка имеют плотную структуру. В результате разницы температурных интервалов затвердевание шлаковых связей в гематитовой оболочке и магнетитовом ядре при охлаждении в системе возникает разность деформаций [8 – 11]:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – свободные относительные усадки магнетитового ядра и гематитовой оболочки соответственно.

В рассматриваемом случае  $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ . Так как ядро не может свободно изменять свой размер, на поверхности соприкосновения его с оболочкой возникает равномерное давление, которое определяется из уравнения равновесия элемента шара (рис. 1) в радиальном направлении [10], т.е.

$$\Delta\varepsilon = \frac{P}{E_1}(1 - 2\mu_1) = \frac{1}{E_2} \left\{ \frac{P(2a^3 + c^3)}{2(c^3 - a^3)} - \mu_2 \left[ \frac{P(2a^3 + c^3)}{2(c^3 - a^3)} - P \right] \right\}, \quad (2)$$

где  $P$  – давление, Па;  $E_1$  и  $E_2$  – модули упругости ядра и оболочки, Па;  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – коэффициенты Пуассона для ядра и оболочки;  $a$  и  $c$  – внутренний и наружный радиусы оболочки, м, причем  $c > a$ .

Для нашего случая имеем

$$P = \Delta\varepsilon/B,$$

где

$$B = \frac{1}{E_1}(1 - 2\mu_1) + \frac{1}{2E_2} \left( \frac{2a^3 + c^3 + \mu_2 c^3 - \mu_2 4a^3}{c^3 - a^3} \right). \quad (3)$$

Для определения нормальных напряжений в сферической оболочке на расстоянии  $R$  от центра системы использовали решение задачи Ляме [10] для полый сферы, находящейся под действием внутреннего равномерного давления:

$$\sigma_r^{(2)} = \frac{Pa^3}{c^3 - a^3} \left( \frac{c^3}{R^3} - 1 \right), \quad \sigma_t^{(2)} = -\frac{Pa^3}{c^3 - a^3} \left( 1 + \frac{c^3}{2R^3} \right),$$

где  $\sigma_r^{(2)}$ ,  $\sigma_t^{(2)}$  – нормальные напряжения в радиальном и тангенциальном направлениях для оболочки, Па.

Для случая  $R = a$  нормальные напряжения достигают наибольших величин на внутренней поверхности оболочки, т.е.

$$\left( \sigma_r^{(2)} \right)_{\max} = +P; \quad \left( \sigma_t^{(2)} \right)_{\max} = -\frac{P(2a^3 + c^3)}{2(c^3 - a^3)}, \quad (4)$$

и на внешней оболочке ядра

$$\left( \sigma_r^{(1)} \right)_{\max} = +P; \quad \left( \sigma_t^{(1)} \right)_{\max} = +P, \quad (5)$$

где  $\sigma_r^{(1)}$  и  $\sigma_t^{(1)}$  – нормальные напряжения в радиальном и тангенциальном направлениях для ядра, Па; знак «–» соответствует сжимающим напряжениям, знак «+» – напряжениям при растяжении.

Уравнения (4) и (5) справедливы для упругой области деформаций. В нашем случае процессы кристаллизации шлаковых составляющих окисленной оболочки и неокисленного ядра в окатышах протекают в температурном интервале 1200 – 900 °С. При этом наблюдается неупругая деформация окатыша в целом.

Поэтому для расчетов напряженного состояния использовали модуль перехода ( $S$ ) от упругой деформации к неупругой [12]:

$$S = \frac{E\tau}{2\eta(1 + \mu)},$$

где  $\tau$  – продолжительность неупругой деформации, с;  $\eta$  – эффективная динамическая вязкость материала при его неупругой деформации, Па·с.

Величину неупругой деформации за время  $\tau$  рассчитывали по формуле

$$d_\tau = Sd_e,$$

где  $d_e$  – значение упругой деформации.

В этом случае выражение для параметра  $B$  в уравнении (3) запишется в виде

$$B = \frac{\tau_1(1 - 2\mu_1)}{2\eta_1(1 + \mu_1)} + \frac{\tau_2}{4\eta_2(1 + \mu_2)} \times \left[ \frac{2a^3 + c^3 + \mu_2 c^3 - \mu_2 4a^3}{c^3 - a^3} \right], \quad (6)$$

где  $\tau_1$  и  $\tau_2$  – продолжительность неупругой деформации ядра и упругопластической деформации оболочки, с;  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – эффективная динамическая вязкость материала ядра и оболочки, Па·с.

В температурном интервале охлаждения окатыша, в котором происходит одновременно неупругая деформация ядра и оболочки, возникающие напряжения в основном релаксируются за счет подвижности структурных составляющих [13, 14]. Напряженное состояние в зональных окатышах при их охлаждении возникает с момента завершения кристаллизации шлаковой составляющей гематитовой оболочки, которая переходит в упругопластическое состояние и в дальнейшем незначительно изменяет свои размеры. В то же время неупругая деформация неокисленного ядра растет со временем охлаждения до полного отвердевания шлаковой составляющей. При этом величина неупругой деформации неокисленного ядра больше упругопластической деформации окисленной оболочки, что и яв-

ляется причиной возникновения напряженного состояния в зональном окатыше.

Полученные количественные значения эффективной вязкости и усадки окисленных и неокисленных брикетов из офлюсованного качканарского титаномагнетитового концентрата в температурном интервале 1300 – 900 °С послужили основанием для ориентировочных расчетов напряженного состояния в окатышах с разными расположением и соотношением магнетитовых и гематитовых зон.

На рис. 2 показаны результаты расчета равномерного давления  $P$  на границе зон для температур охлаждения в интервале 1180 – 1050 °С при разных соотношениях размеров окатыша  $c$  и магнетитового ядра  $a$ . Видно, что при уменьшении температуры давление  $P$  возрастает. Причем при изменении соотношения  $c/a$  от 1,2 до 4,0 давление  $P$  при температуре 1050 °С возрастает от  $20 \cdot 10^7$  до  $60 \cdot 10^7$  Па.

С учетом полученных значений  $P$  рассчитаны максимальные напряжения в гематитовой оболочке по формуле (4). Изменение максимальных нормальных напряжений в радиальном и тангенциальном направлениях в гематитовой оболочке с увеличением соотношения  $c/a$  для температуры 1100 °С приведено на рис. 3. При относительно тонкой оболочке ( $c/a = 1,0 - 1,1$ ) в ней наблюдаются большие сжимающие тангенциальные и незначительные растягивающие радиальные напряжения. Лишь при объемном содержании гематитовой оболочки, составляющем 75 % и более ( $c/a \geq 1,6$ ), тангенциальные напряжения в оболочке меньше радиальных.

Согласно кинетическим закономерностям окисления качканарских окатышей при скоростях нагрева 1,7 °С/с и выше до температур 1270 – 1340 °С степень

их зонального окисления составляет 70 – 85 % [10]. При этом соотношение  $c/a$  в окатышах равно 1,5 и более. Поэтому при охлаждении обожженных гранул и наблюдается отслоение магнетитового ядра от гематитовой оболочки под действием растягивающих радиальных напряжений (рис. 3), значения которых превышают пределы прочности наиболее прочных фаз, существующих в окатышах.

Так как величина напряжений в зональном окатыше зависит в основном от параметров  $\Delta\epsilon$ ,  $\eta_1$  и  $\eta_2$ , уменьшение в нем количества шлаковой связки, а также сближение температурных интервалов кристаллизации шлаковых составляющих различных зон окатыша будут способствовать снижению напряжений. Ориентировочные расчеты показали, что после охлаждения зонального окатыша гематитовая оболочка находится под действием сжимающих тангенциальных и растягивающих радиальных напряжений, а магнетитовое ядро – под действием растягивающих тангенциальных и радиальных напряжений. Изменение напряжений по толщине окисленной оболочки зонального окатыша показано на рис. 4, а. Максимальные напряжения ( $\sigma_r$  и  $\sigma_t$ ) наблюдаются на внутренней поверхности оболочки, величина их уменьшается по ее толщине.

Двухзонные окатыши получают и при использовании бескислородной газовой среды во время высокотемпературного обжига и охлаждения предварительно окисленных окатышей. При этом структура обожженных окатышей состоит из гематитового ядра и магнетитовой оболочки. Рассмотрим механизм возникновения напряженного состояния в таких окатышах.

Офлюсованные качканарские окатыши с магнетитовой оболочкой и гематитовым ядром (рис. 4, б) получали путем полного предварительного окисления на

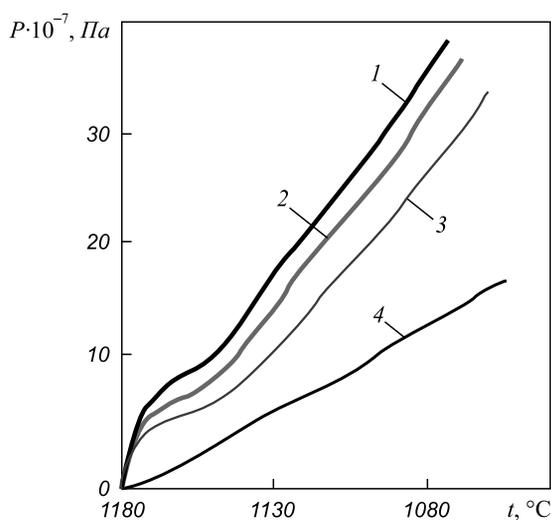


Рис. 2. Изменение равномерного давления  $P$  на границе магнетитового ядра и гематитовой оболочки при охлаждении окатышей, имеющих разные соотношения  $c/a - 4,0; 2,0; 1,5$  и  $1,2$  (кривые 1 – 4)

Fig. 2. Change of uniform pressure  $P$  on the border of magnetite nucleus and hematite blanket when cooling pellets, having different correlation  $c/a - 4,0; 2,0; 1,5$  and  $1,2$  (curves 1 – 4)

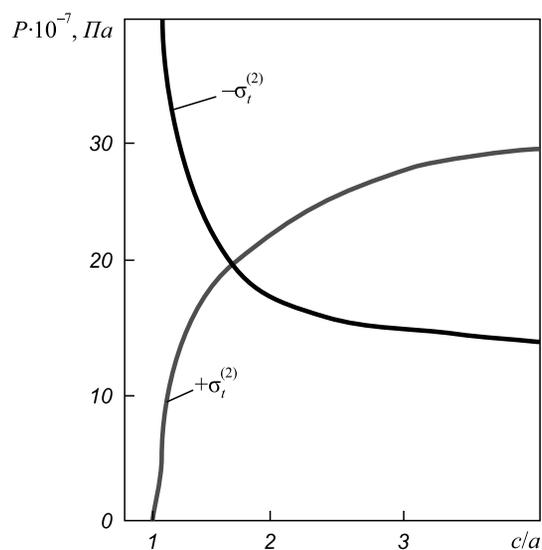


Рис. 3. Зависимость максимальных напряжений в гематитовой оболочке окатышей от соотношения  $c/a$  при температуре 1100 °С

Fig. 3. Dependence of maximum stress in a hematite blanket of pellets on the correlation  $c/a$  at the temperature of 1100 °С

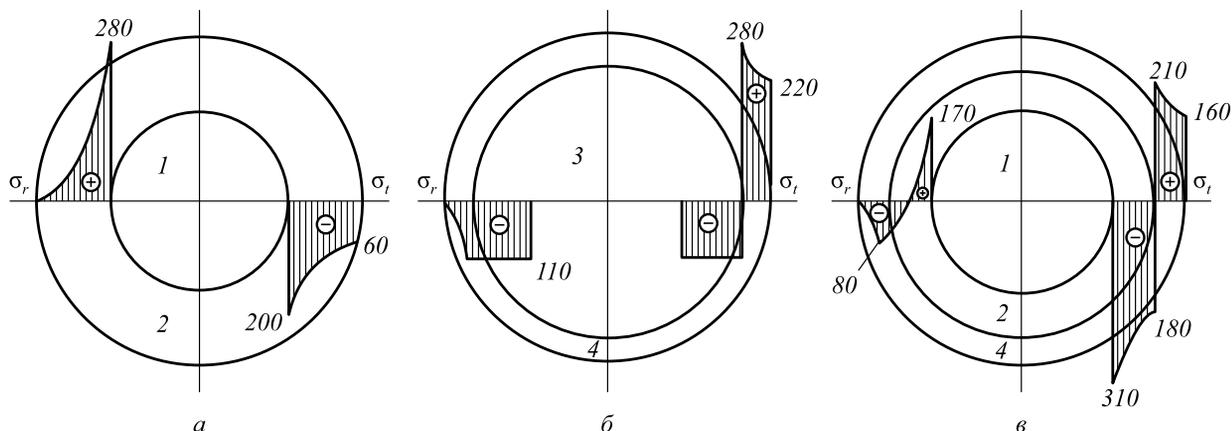


Рис. 4. Распределение напряжений (цифры у экстремума на эпюре напряжений –  $\sigma_i \cdot 10^{-7}$ , Па) в двух (а, б) и трехзонных (в) окатышах: 1 – магнетитовое ядро; 2 – гематитовая оболочка; 3 – гематитовое ядро; 4 – поверхностная магнетитовая пленка

Fig. 4. Stress distribution (numbers by the extremum on the stress distribution diagram –  $\sigma_i \cdot 10^{-7}$ , Pa) in two- (a, b) and three-zonal (c) pellets: 1 – magnetite nucleus; 2 – hematite blanket; 3 – hematite nucleus; 4 – surface magnetite film

воздухе при температуре 1300 – 1350 °С и охлаждали в нейтральной среде. Высокая температура обжига и бескислородная среда способствуют диссоциации гематита в окатыше, причем процесс диссоциации преимущественно протекает с поверхности в глубь окатыша с образованием магнетитовой оболочки. При охлаждении в результате разной температуры кристаллизации шлаковых составляющих магнетитовой оболочки и гематитового ядра в окатыше возникает напряженное состояние. Так как магнетитовая оболочка переходит в упругопластическое состояние при более низкой температуре, чем гематитовое ядро, т.о. в этом случае на границе ядра и оболочки возникает сжимающее давление  $P$ , равное [10]

$$-P = \Delta \epsilon / B,$$

где

$$B = \frac{\tau_2(1-2\mu_2)}{2\eta_2(1+\mu_2)} + \frac{\tau_1}{4\eta_1(1+\mu_1)} \times \left[ \frac{2b^3 + c^3 + \mu_1 c^3 - 4\mu_1 b^3}{c^3 - b^3} \right], \quad (7)$$

где  $b$  – радиус гематитового ядра.

В этом случае максимальные напряжения на внутренней поверхности магнетитовой оболочки и на внешней поверхности гематитового ядра составят

$$\left(\sigma_r^{(1)}\right)_{\max} = -P; \quad \left(\sigma_t^{(1)}\right)_{\max} = \frac{P(2b^3 + c^3)}{2(c^3 - b^3)}; \quad (8)$$

$$\left(\sigma_r^{(2)}\right)_{\max} = -P; \quad \left(\sigma_t^{(2)}\right)_{\max} = -P. \quad (9)$$

На основе соотношений (7) – (9) рассчитаны значения давления  $P$  на границе магнетитовой оболочки и гематитового ядра, а также возникающие при этом напряжения. Полученные зависимости давления  $P$

от температуры охлаждения в интервале температур 1180 – 1050 °С позволили установить, что сжимающее давление  $P$  на границе зон в окатыше возрастает с понижением температуры. При 1050 °С давление  $P$  возрастает от  $27 \cdot 10^7$  до  $48 \cdot 10^7$  Па при увеличении соотношения  $c/b$  в окатыше от 1,2 до 4,0. Наличие давления  $P$  приводит к возникновению растягивающих нормальных напряжений в тангенциальном и сжимающих в радиальном направлениях в магнетитовой оболочке, а также сжимающих нормальных напряжений в тангенциальном и радиальном направлениях в гематитовом ядре (рис. 4, б). Максимальные нормальные напряжения в магнетитовой оболочке наблюдаются на ее внутренней поверхности и уменьшаются в направлении к ее внешней поверхности.

Установлено, что при соотношении  $c/b = 1,6$  и менее, величина растягивающих нормальных напряжений в тангенциальном направлении больше сжимающих напряжений в радиальном направлении. В этом случае наблюдается растрескивание магнетитовой оболочки.

При расчетах напряженного состояния в окатышах с трехзонной структурой предполагали, что распределение нормальных напряжений в трехзонном окатыше (рис. 4, в) равно алгебраической сумме соответствующих нормальных напряжений в двухзонных окатышах: магнетитовое ядро – гематитовая оболочка (рис. 4, а) и гематитовое ядро – магнетитовая оболочка (рис. 4, б).

Результаты расчетов напряжений (рис. 5) выявили изменение растягивающих нормальных напряжений в радиальном и сжимающих нормальных напряжений в тангенциальном направлении, возникающих на границе магнетитового ядра и гематитовой оболочки, в зависимости от соотношения  $c/a$  в окатыше при образовании на его поверхности магнетитовой пленки разной толщины  $h$ .

При увеличении соотношения  $c/a$  в окатыше снижаются напряжения  $\sigma_t$  и возрастают напряжения  $\sigma_r$ .

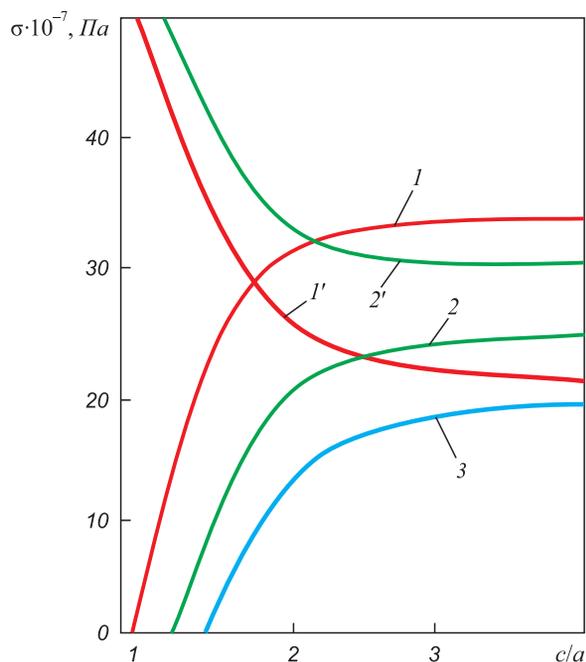


Рис. 5. Зависимость максимальных напряжений в гематитовой оболочке окатышей от соотношения  $c/a$  при температуре  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ : 1, 2, 3 – растягивающие нормальные напряжения в радиальном направлении для двух- (1) и трехзонного (2, 3) окатышей при  $h = 1$  и  $h = 2$  мм соответственно; 1' и 2' – сжимающие нормальные напряжения в тангенциальном направлении соответственно для двух- и трехзонного окатышей при  $h = 1$  мм

Fig. 5. Dependence of maximum stress in hematite blanket of pellets on the correlation  $c/a$  at the temperature of  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ : 1, 2, 3 – tensile normal stress in a radial direction for two- (1) and three-zonal (2, 3) pellets at  $h = 1$  and  $h = 2$  mm correspondingly; 1' and 2' – compression normal stress in a tangential direction correspondently for two- and three-zonal pellets at  $h = 1$  mm

Увеличение параметра  $h$  способствует уменьшению растягивающих  $\sigma_r$  и увеличению сжимающих  $\sigma_t$  напряжений на границе ядра и оболочки при соответствующих значениях  $c/a$ . Растягивающие нормальные напряжения, являющиеся основной причиной образования трещин в окатыше, уменьшаются, поэтому прочностные характеристики обожженных окатышей должны возрастать.

Полученные результаты были использованы при разработке и внедрении ряда способов изготовления прочных в исходном состоянии и при восстановлении офлюсованных окатышей КачГОКа и ССГОКа. В частности, было установлено, что частично окисленные окатыши, имеющие зональное строение и охлажденные на воздухе, обладают невысокими прочностными свойствами, что связано с наличием в них трещин на границе магнетитового ядра и гематитовой оболочки.

Однако, при охлаждении этих обожженных окатышей в нейтральной среде наблюдались только небольшие нитевидные трещины, не нарушающие сплошности структуры. При этом прочность офлюсованных окатышей КачГОКа увеличивалась в 4–5 раз (с 500–600 до 2000–3000 Н/окатыш), а окатышей ССГОКа – в 3–4 раза (с 1000–1100 до 3000–4400 Н/окатыш) по сравнению с охлаждением их на воздухе [15].

**Выводы.** Рассмотрена методика, позволяющая проводить расчеты напряженного состояния в окатышах с разным расположением и соотношением магнетитовых и гематитовых зон и тем самым прогнозировать изменение прочности окатышей и разрабатывать рекомендации по их получению с магнетито-гематитовой основой и имеющих необходимую прочность.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горбачев В.А., Абзалов В.М., Юрьев Б.П. Кристаллохимическое превращение магнетита в гематит в железорудных окатышах // Изв. вуз. Черная металлургия. 2007. № 4. С. 27–30.
2. Плотников С.В., Бормотов А.С. Механизм фазовых превращений при окислительном обжиге промышленных окатышей из концентратов руд железистых кварцитов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 3. С. 29–32.
3. Yur'ev V.P., Spirin N.A. Oxidation of iron – ore pellets // Steel in Translation. 2011. Vol. 41, No. 5, pp. 400–403.
4. Малышева Т.Я., Юсфин Ю.С., Плотников С.В. Технологические аспекты производства окатышей из магнетитовых руд // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 9. С. 3–5.
5. Кокорин Л.К., Лелеко С.Н. Производство окисленных окатышей. – Екатеринбург: Уральский центр ПФ и рекламы «Марат», 2004. – 280 с.
6. Егоров–Тисменко Ю.К. Кристаллография и кристаллохимия. – М.: Изд-во Книжный дом «Университет», 2010. – 588 с.
7. Булах А.Г., Золотарев А.А., Кривовичев В.Г. Общая минералогия. – М.: Академия, 2008. – 360 с.
8. Горчаков Г.И., Лифанов И.И., Терехин Л.Н. Коэффициенты термического расширения и температурные деформации строительных материалов. – М.: Изд-во стандартов, 1968. – 167 с.
9. Сидоров В.Н. Сопrotивление материалов. – М.: Изд-во Архитектура-С, 2013. – 304 с.
10. Горшков А.Г., Старовойтов Э.И., Тарлаковский Д.В. Теория упругости и пластичности. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 416 с.
11. Илюшин А.А. Пластичность. Упругопластические деформации. – М.: Логос, 2004. – 388 с.
12. Тайра С., Отани Р. Теория высокотемпературной прочности материалов. – М.: Металлургия, 1986. – 280 с.
13. Радченко В.П., Еремин Ю.А. Реологическое деформирование и разрушение материалов и элементов конструкций. – М.: Машиностроение – 1, 2004. – 265 с.
14. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. – М.: Профессия, 2007. – 560 с.
15. Меламуд С.Г., Юрьев Б.П. Изменение прочности железорудных окатышей в процессе термической обработки и способы ее повышения // Сталь. 2014. № 3. С. 6–11.

Поступила 2 сентября 2014 г.

## CALCULATION METHODS OF TENSIONS IN BURNT IRON-ORE PELLETS AT THEIR COOLING

**S.G. Melamud**, *Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director of Training and Design Center «URFU Design Institute»*

(e1944@yandex.ru)

**B.P. Yur'ev**, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy"*

(yurev-b@mail.ru)

**Ural Federal University named after the first President of Russia**  
**B.N. Yeltsin** (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia)

**Abstract.** The paper presents the calculation methods of burnt zonal fluxed pellets at the basis of rising strained state at their cooling on the border of zones with different temperature of crystallization of slag content. The calculations of strained state for Kachkanar pellets with different disposition of hematite and magnetite zones were carried out. It was shown that cooling of the burnt zonal pellets in the air at the border of magnetite core and hematite shell–stretching radial tensions appear and they contribute to the loss of contact between the core and the shell. It was determined that the presence of the three-zonal structure of pellets (core–hematite shell–magnetite film surface) contributes to re-distribution of normal tensions at their section. The increase of thickness of magnetite film surface decreases stretching tensions in radial direction at the border of the core and the shell, in the result of which the strength of pellets rises. At cooling of burnt pellets with hematite core and magnetite shell in the neutral atmosphere at the border of zones stretching normal tensions appear in tangential direction, they contribute to the reduction of strength of pellets.

**Keywords:** methods, zonal pellets, tension, strength, cooling, atmosphere, magnetite and hematite zones, structure, operational parameters.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-12-865-870

### REFERENCES

- Gorbachev V.A., Abzalov V.M., Yur'ev B.P. Crystal-chemical transformation of magnetite into hematite in iron-ore pellets. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2007, no. 4, pp. 27–30. (In Russ.).
- Plotnikov S.V., Bormotov A.S. Phase transformation mechanism at oxidation burning of industrial pellets, produced from iron quartzite ores. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 3, pp. 29–32. (In Russ.).
- Yur'ev B.P., Spirin N.A. Oxidation of iron-ore pellets. *Steel in Translation*. 2011, vol. 41, no. 5, pp. 400–403.
- Malysheva T.Ya., Yusfin Yu.S., Plotnikov S.V. Technological aspects of production of pellets from magnetite ore. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 9, pp. 3–5. (In Russ.).
- Kokorin L.K., Leleko S.N. *Proizvodstvo oksislennykh okatyshei* [Production of oxidized pellets]. Ekaterinburg: Ural'skii tsentr PF i reklamy "Marat", 2004. 280 p. (In Russ.).
- Egorov–Tismenko Yu.K. *Kristallografiya i kristallokhimiya* [Crystallography and crystal chemistry]. Moscow: Izd-vo Knizhnyi dom "Universitet", 2010. 588 p. (In Russ.).
- Bulakh A.G., Zolotarev A.A., Krivovichev V.G. *Obshchaya mineralogiya* [General mineralogy]. Moscow: Akademiya, 2008. 360 p. (In Russ.).
- Gorchakov G.I., Lifanov I.I., Terekhin L.N. *Koeffitsienty termicheskogo rasshireniya i temperaturnye deformatsii stroitel'nykh materialov* [Coefficients of thermal expansion and temperature deformation of building materials]. Moscow: Izd-vo standartov, 1968. 167 p. (In Russ.).
- Sidorov V.N. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow: Izd-vo Arkhitektura-S, 2013. 304 p. (In Russ.).
- Gorshkov A.G., Starovoitov E.I., Tarlakovskii D.V. *Teoriya uprugosti i plastichnosti* [Theory of elasticity and plasticity]. Moscow: FIZMATLIT, 2002. 416 p. (In Russ.).
- Ilyushin A.A. *Plastichnost'. Uprugoplasticheskie deformatsii* [Plasticity. Elastoplastic deformations]. Moscow: Logos, 2004. 388 p. (In Russ.).
- Taira S., Otani R. *Teoriya vysokotemperaturnoi prochnosti materialov* [Theory of high-temperature material strength] Trans. from Jap. Moscow: Metallurgiya, 1986. 280 p. (In Russ.).
- Radchenko V.P., Eremin Yu.A. *Reologicheskoe deformirovanie i razrushenie materialov i elementov konstruksii* [Rheological deformation and destruction of materials and construction elements]. Moscow: Mashinostroenie–1, 2004. 265 p. (In Russ.).
- Malkin A.Ya., Isaev A.I. *Reologiya: kontseptsii, metody, prilozheniya* [Rheology: conceptions, methods, applications]. Moscow: Professiya, 2007. 560 p. (In Russ.).
- Melamud S.G., Yur'ev B.P. Strength change of iron-ore pellets in the process of thermal treatment and the ways of its increase. *Stal'*. 2014, no. 3, pp. 6–11. (In Russ.).

Received September 2, 2014