

УДК 669.162.12:622

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБЪЕМЕ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ С ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ ПОРИСТОСТЬЮ

Павловец В.М., к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики и экологии (pavlovets.victormix@yandex.ru)

Герасимук А.В., аспирант кафедры электротехники (heavymetal7200@gmail.com)

Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Новокузнецк, Кемеровская обл., ул. Кирова, 42)

Аннотация. Выполнена сравнительная оценка термических напряжений в объеме железорудных окатышей с дифференцированной пористостью. Проанализировано термонапряженное состояние окатышей, полученных с применением технологии теплосилового напыления влажной шихты на шихтовый гарнисаж и на комкуемые материалы. Установлено влияние пористости, термической массивности окатышей на величину и характер изменения (распределения) термических напряжений по сечению окатышей. Оценен характер изменения прочности окатышей с дифференцированной пористостью по его сечению с динамикой температурного поля пористой сферы и критериями термической массивности в зародыше и оболочке окатыша. Проведен анализ роли термических напряжений в активации режима спекания железорудных окатышей, предложены рекомендации по совершенствованию теплового режима обжига окатышей. На основе этого анализа сделан вывод о более благоприятной поровой структуре полученных по технологии принудительного зародышеобразования окатышей, в объеме которых сформирован зародыш с повышенной пористостью.

Ключевые слова: термонапряженное состояние, дифференцированная пористость, характер изменения прочности, температурное поле пористой сферы, интенсивность нагрева, принудительное зародышеобразование, напыление влажной шихты, зародыши, оболочка, железорудные окатыши.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-8-536-542

Полученные в результате расчета термические напряжения, формируемые нестационарным температурным полем железорудных окатышей, можно сравнить с предельными разрушающими нагрузками [1], что позволяет оценить влияние фазовых переходов на двух- и трехслойную структуру окатышей [2], а в ряде случаев подобрать эффективный режим их термической обработки [3]. Воздействие на структуру окатышей с помощью методов теплосилового напыления влажной шихты в процессе их формообразования позволяет целенаправленно влиять на пористость и ее распределение по сечению окатышей [4 – 7]. Пористость, в свою очередь, способна изменять термонапряженное состояние спекаемых окатышей в процессе обжига и воздействовать на технологический режим. Дифференцированная пористость предполагает ее ступенчатое изменение в зародыше и оболочке окатыша. Именно поэтому оценка роли термических напряжений в формировании железорудных окатышей на начальных стадиях спекания и выбор технологического маршрута с учетом их термонапряженного состояния также представляют практический интерес.

Целью работы является анализ роли термических напряжений, возникающих в объеме нагреваемых окатышей с дифференцированной пористостью по сечению, в активации режима спекания железорудных окатышей.

Для расчетов термических напряжений в объеме спекаемых окатышей использовали три типа окатышей, схематичное изображение которых показано на рис. 1 (окатыши, полученные по технологии ЗО, ЗНД и ЗОН; индекс З означает зародышеобразование, О – окомкование, Н – напыление, Д – доокомкование).

Окатыши первого типа (рис. 1, а) были сформированы по технологии (ЗО), реализуемой в настоящее время в промышленности на основе капельного зародышеобразования и окомкования зародышей в режиме переката [7 – 10]; эти окатыши использовали для сравнительной оценки термонапряженного состояния. Условно

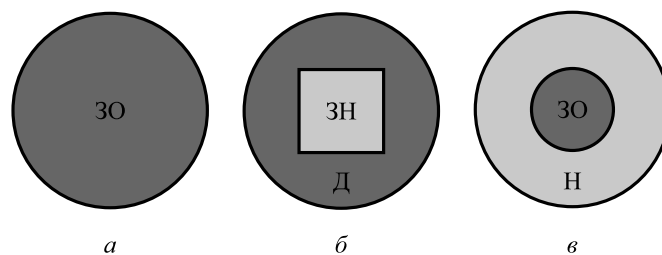


Рис. 1. Схематичное изображение окатышей, полученных по технологии ЗО (а), ЗНД (б), ЗОН (в)

Fig. 1. Schematic representation of pellets, obtained by the technology of nucleation by pelletizing NP (a), nucleation by spraying and prepelletizing NSPr (b), nucleation by pelletizing and spraying NPS (c)

считали, что для этих окатышей характерно равномерное распределение пористости по сечению, включая зародышевый центр и оболочку.

Окатыши второго типа (рис. 1, б) сформированы по технологии принудительного зародышеобразования ЗНД (зародышеобразование напылением и доокомкование зародышей) [4 – 6]. Процесс получения сырых железорудных окатышей по технологии ЗНД включает две основные стадии: принудительное зародышеобразование и формирование оболочки окатыша доокомкованием зародыша в режиме переката. В окатышах этого типа, технология получения которых отработана в лабораторных условиях, зародыши сформированы напылением шихты на гарнисаж окомкователя с последующим делением плотного напыленного слоя шихты на мерные зародышевые фрагменты. Принудительное зародышеобразование – это независимое формообразование влажной шихты, осуществляемое теплосиловым напылением материала сжатым воздухом на шихтовый гарнисаж в холостой (незанятой материалом) зоне окомкователя с последующим делением напыленного слоя (НС) шихты на зародыши независимо от процессов, протекающих в слое комкуемых материалов. Технология ЗНД позволяет реально менять относительную пористость зародышей $\theta_{зр}$ от 0,2 до 0,6 и массовую долю зародыша в окатыше η ($\eta = m_{зр}/m_{ок}$, где $m_{зр}$ и $m_{ок}$ – масса зародыша и окатыша, г) от нуля до 1. В производственных условиях относительную пористость оболочки $\theta_{об}$ окатышей, полученной доокомкованием в режиме переката, менять достаточно сложно. В расчетах эту величину условно приняли постоянной: $\theta_{об} = 0,3$.

Окатыши третьего типа (рис. 1, в) сформированы по технологии ЗОН [3, 6]. Согласно этой технологии зародышами могут быть окатыши некондиционных размеров диам. 1 – 14 мм, полученные окомкованием влажной шихты в режиме переката. Массовая доля зародышей этого типа окатышей может изменяться в пределах нуля до 1, но пористость условно остается постоянной: $\theta_{зр} = 0,3$. Оболочку окатышей, сформированную по технологии ЗОН, получают теплосиловым напылением влажной шихты на поверхность перекачиваемых окатышей. Напыление позволяет реально менять относительную пористость напыляемой оболочки от 0,2 до 0,6. Для окатышей, полученных по технологиям ЗНД и ЗОН, оценивали влияние напыленной массы на их термонапряженное состояние.

Величину термических напряжений в объеме окатыша можно найти при решении задачи о нагреве пористой сферы в среде с постоянной температурой при граничных условиях III рода. Возникающие вследствие температурной неравномерности радиальные (σ_r) и тангенциальные (σ_τ) напряжения рассчитывали по следующим уравнениям [11]:

$$\sigma_r = 4\mu\alpha(3\alpha + 2\mu) \left(\frac{I_1 - \frac{I_2}{\rho^3}}{\lambda + 2\mu} \right); \quad (1)$$

$$\sigma_\tau = 2\mu\alpha(3\alpha + 3\mu) \left(\frac{\frac{I_2}{\rho^3} + 2I_1 - T}{\lambda + 2\mu} \right), \quad (2)$$

где α – коэффициент линейного термического расширения (для магнетита $\alpha = 8,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [12]); $\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}$ и

$\lambda = \frac{E\nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$ – постоянные Ламе; E – модуль Юнга

пористого материала; ν – коэффициент Пуассона (для магнетита $\nu = 0,23$ [12]); T – текущая температура окатыша, °C; I_1, I_2 – среднеинтегральные температуры окатыша, °C; $\rho = r/R$ – относительный радиус окатыша; R и r – радиус и текущий радиус окатыша.

Значения I_1 и I_2 вычисляли по выражениям

$$I_1 = \int_0^1 T \rho^2 d\rho = \left(\frac{T_c}{3} \right) - (T_c - T_0) \times \sum_{n=1}^{\infty} B_n(\text{Fo}) \sin \mu_n (1 - \mu_n \text{ctg} \mu_n); \quad (3)$$

$$I_2 = \int_0^{\rho} T \rho^2 d\rho = \left(\frac{\rho^3 T_c}{3} \right) - (T_c - T_0) \times \sum_{n=1}^{\infty} B_n(\text{Fo}) \sin(\mu_n \rho) [1 - \mu_n \rho \text{ctg}(\mu_n \rho)], \quad (4)$$

где T_c – температура греющей среды; T_0 – начальная температура материала; $B_n(\text{Fo})$ – комплекс, вычисляемый по выражению $B_n(\text{Fo}) = A_n \exp\left(\frac{-\mu_n^2 \text{Fo}}{\mu_n^3}\right)$; $\text{Fo} = a\tau/R^2$ – число Фурье, имеющее смысл приведенного времени; μ_n, A_n – коэффициенты, зависящие от числа Био [13].

Текущую температуру по радиусу пористой сферы определяли по следующему выражению [13]:

$$T = T_0 + (T_c - T_0) \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n \sin \mu_n \rho \exp(-\mu_n^2 \text{Fo})}{\mu_n \rho} \right]. \quad (5)$$

Модуль Юнга для пористого шара определяли с учетом его пористости на основании данных работы [14]:

$$E = 12E_0 \frac{(1 - \theta_{ок})^3}{4 - 3\theta_{ок}}, \quad (6)$$

где E_0 – модуль Юнга беспористого материала (для магнетита $E_0 = 10^5$ МПа); $\theta_{ок}$ – относительная пористость железорудных окатышей (зависит от пористости зародыша и пористости оболочки).

Значение $\theta_{ок}$ рассчитывали по выражению

$$\theta_{ок} = \frac{\theta_{зр} m_{зр} + \theta_{об} m_{об}}{m_{зр}} + m_{об} = \frac{\theta_{зр} m_{зр} + \theta_{об} (m_{ок} - m_{зр})}{m_{ок}} = \theta_{зр} \eta + \theta_{об} (1 - \eta). \quad (7)$$

В расчетах учитывали, что при использовании технологии ЗНД пористость зародышей выше пористости

оболочки, а при использовании технологии ЗОН пористость зародышей ниже пористости оболочки и изменяется по координате ρ ступенчато на границе раздела.

Среднеквадратичные термические напряжения, обуславливающие сдвиговую деформацию, рассчитали по уравнению

$$\sigma = \left[\frac{\sigma_r^2 + \sigma_\tau^2 - \sigma_r \sigma_\tau + \frac{\theta_{ок} (\sigma_r + \sigma_\tau)^2}{4(1 - \theta_{ок})}}{(1 - \theta_{ок})^3} \right]^{0,5}. \quad (8)$$

На рис. 2 – 5 представлены результаты расчетов по вышеприведенным выражениям, выполненные при следующих условиях: $T_c = 1300 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_0 = 500 \text{ }^\circ\text{C}$, $Bi = 1,0$, $Fo = 0,1$.

Как следует из анализа расчетных данных, для всех видов окатышей радиальные термонапряжения по характеру являются растягивающими, снижаются от максимального значения в центре шара и до нуля на его поверхности (рис. 2). При использовании технологий ЗНД и ЗОН значения σ_r очень близки. В сечении $\rho = 0$ $\sigma_r = 117 \text{ МПа}$ (ЗНД), $\sigma_\tau = 125 \text{ МПа}$ (ЗОН). Тангенциальные термонапряжения по сечению шара больше радиальных, лишь во внутренних слоях шара они примерно равны радиальным и уменьшаются до нуля в сечении $\rho = 0,72$. С увеличением ρ от 0,72 до 1,0 тангенциальные термонапряжения меняют знак и становятся сжимающими. Причем в сечении окатышей, ограниченном интервалом $\rho = 0 \div 0,72$, у окатышей, по-

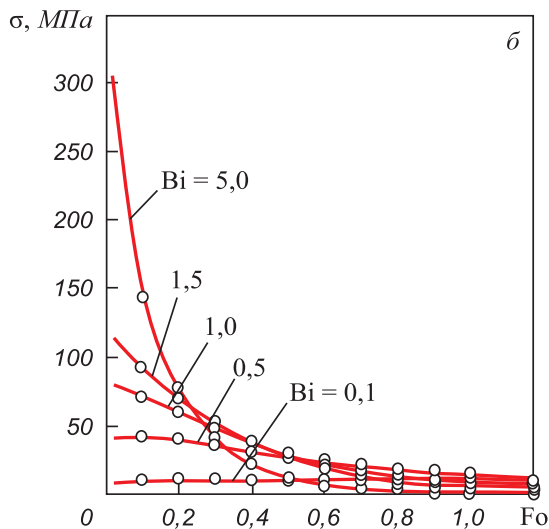
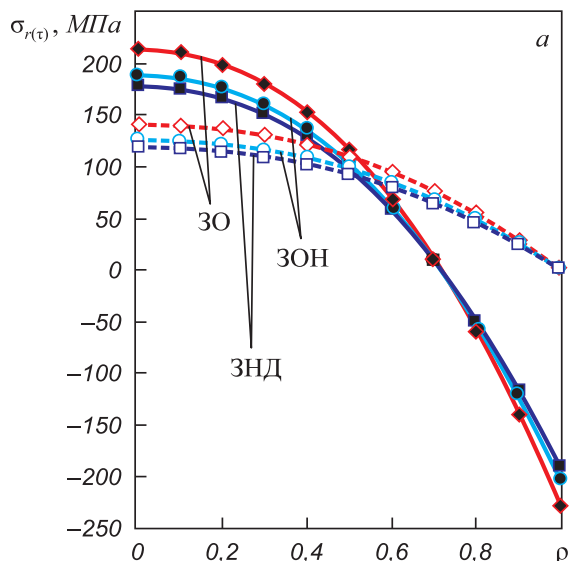


Рис. 2. Распределение радиальных σ_r (светлые точки) и тангенциальных σ_τ (темные точки) термических напряжений по сечению шара (а) (при использовании технологии ЗО $\theta = 0,2$, технологии ЗНД $\theta_{зр} = 0,3$, $\theta_{об} = 0,2$, технологии ЗОН $\theta_{зр} = 0,2$, $\theta_{об} = 0,3$; $\eta = 0,6$) и изменение среднеквадратичных термонапряжений σ в процессе нагрева (б) (при использовании технологий ЗО, ЗОН, ЗНД $\rho = 0,6$, $\eta = 0,6$)

Fig. 2. Distribution of radial σ_r (light dots) and tangential σ_τ (dark dots) thermal stresses along the section of the sphere (а) (when using the technology of NP $\theta = 0,2$, technology of NSPr $\theta_{зр} = 0,3$, $\theta_{об} = 0,2$, technology of NPS $\theta_{зр} = 0,2$, $\theta_{об} = 0,3$; $\eta = 0,6$) and the change of mean-square thermal stresses σ during the heating process (б) (when using the technologies of NP, NPS, NSPr $\rho = 0,6$, $\eta = 0,6$)

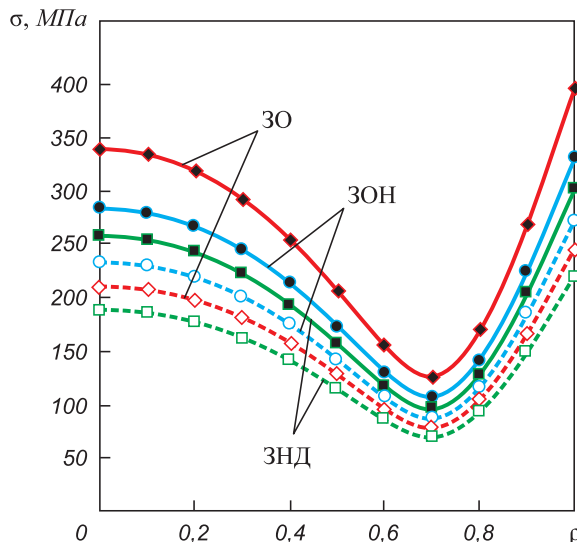


Рис. 3. Распределение суммарных термонапряжений по сечению окатышей, полученных при $\eta = 0,6$ по технологиям ЗО (◆ – $\theta_{ок} = 0,2$; ◇ – $\theta_{ок} = 0,35$), ЗОН (● – $\theta_{зр} = 0,2$, $\theta_{об} = 0,35$, ○ – $\theta_{зр} = 0,2$, $\theta_{об} = 0,5$), ЗНД (■ – $\theta_{зр} = 0,35$, $\theta_{об} = 0,2$, □ – $\theta_{зр} = 0,5$, $\theta_{об} = 0,2$)

Fig. 3. Distribution of summarized thermal stresses along the sections of pellets, obtained at $\eta = 0,6$ by the technologies of NP (◆ – $\theta_{ок} = 0,2$; ◇ – $\theta_{ок} = 0,35$), NPS (● – $\theta_{зр} = 0,2$, $\theta_{об} = 0,35$, ○ – $\theta_{зр} = 0,2$, $\theta_{об} = 0,5$), NSPr (■ – $\theta_{зр} = 0,35$, $\theta_{об} = 0,2$, □ – $\theta_{зр} = 0,5$, $\theta_{об} = 0,2$)

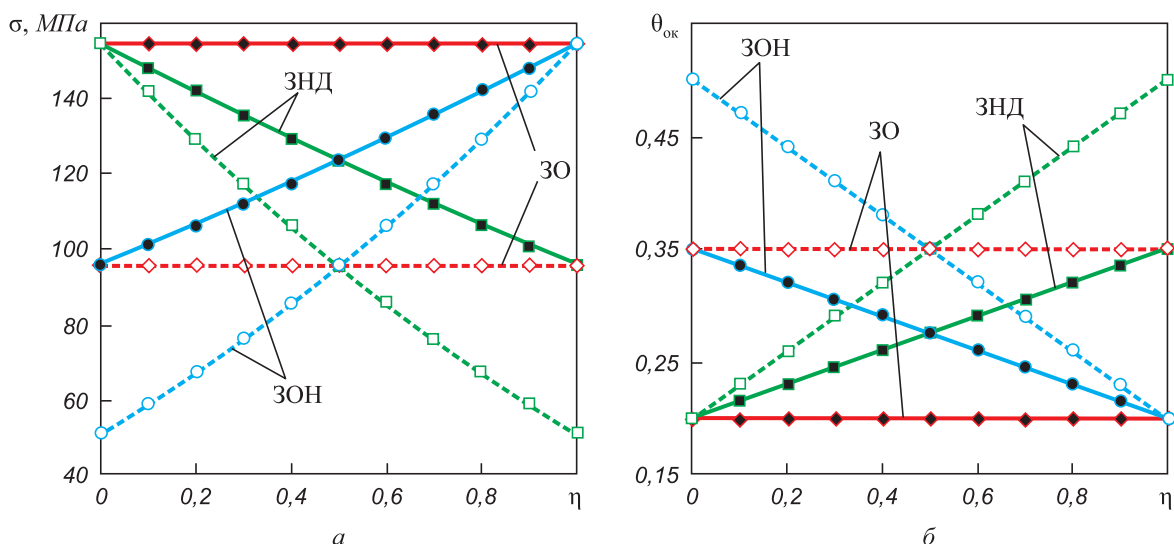


Рис. 4. Зависимость суммарных термонапряжений (а) и общей пористости (б) от массовой доли зародыша в окатышах ($\rho = 0,6$), полученных по технологиям 3O (◆ – $\theta_{ок} = 0,2$; ◇ – $\theta_{ок} = 0,35$), 3OH (● – $\theta_{сп} = 0,2$, $\theta_{об} = 0,35$, ○ – $\theta_{сп} = 0,2$, $\theta_{об} = 0,5$), 3НД (■ – $\theta_{сп} = 0,35$, $\theta_{об} = 0,2$, □ – $\theta_{сп} = 0,5$, $\theta_{об} = 0,2$)

Fig. 4. Dependence of summarized thermal stresses (a) and total porosity (b) on mass fraction of nucleus in pellets ($\rho = 0,6$), obtained by the technologies of NP (◆ – $\theta_{ок} = 0,2$; ◇ – $\theta_{ок} = 0,35$), NPS (● – $\theta_{сп} = 0,2$, $\theta_{об} = 0,35$, ○ – $\theta_{сп} = 0,2$, $\theta_{об} = 0,5$), NSPr (■ – $\theta_{сп} = 0,35$, $\theta_{об} = 0,2$, □ – $\theta_{сп} = 0,5$, $\theta_{об} = 0,2$)

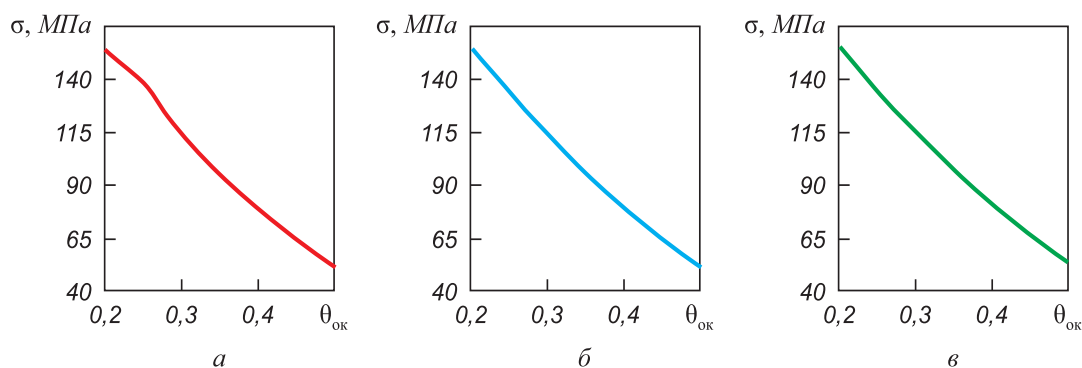


Рис. 5. Зависимость суммарных термонапряжений от общей пористости окатышей, полученных по технологиям 3O (а), 3НД (б), 3OH (в) при $\eta = 0 \div 1$, $\theta_{сп} = 0,2 \div 0,5$, $\theta_{об} = 0,2 \div 0,5$, $\rho = 0,6$

Fig. 5. Dependence of summarized thermal stresses on total porosity of pellets, obtained by the technologies of NP (a), NSPr (b), NPS (v) at $\eta = 0 \div 1$, $\theta_{сп} = 0,2 \div 0,5$, $\theta_{об} = 0,2 \div 0,5$, $\rho = 0,6$

лученных по технологии ЗОН, значение σ_{τ} выше, чем у окатышей, полученных по технологии ЗНД. В сечении $\rho = 0,72 \div 1,0$ напротив, у окатышей, полученных по технологии ЗОН, значение σ_{τ} ниже, чем у окатышей, полученных по технологии ЗНД, но численные значения термонапряжений относительно близки.

Среднеквадратичные напряжения являются результирующими, их величина не зависит от характера σ_r и σ_{τ} . Можно заметить, что максимальные значения σ достигаются в центре и на поверхности шара, а минимальные в сечении $\rho = 0,72$, что объясняется знакопеременными радиальными напряжениями. Поскольку с увеличением времени разность температур поверхность – центр шара уменьшается, то снижается и величина σ (рис. 2, б). По этой же причине (изменение ΔT)

возрастают значения σ с увеличением значения числа Био.

Расчеты показывают, что в окатышах, полученных по технологии 3O, при равных тепловых условиях развиваются максимальные термонапряжения (рис. 2, 3). Окатыши, сформированные по технологиям ЗОН и ЗНД, во всех случаях подвержены меньшим термонапряжениям. Причем у окатышей, окомкованных по технологии 3O, величина σ может превышать σ окатышей, полученных по технологии ЗОН и ЗНД, почти в два раза. Характер изменения термонапряжений и их величина в зависимости от η (рис. 4, а) показывают, что при $\eta = 0 \div 0,5$ минимальная величина σ (100 – 120 МПа) наблюдается у окатышей, полученных по технологии ЗОН. При $\eta > 0,5$ и до $\eta = 1,0$ характер термонапряже-

ний меняется практически зеркально: минимальное значение наблюдается у окатышей, полученных по технологии ЗНД. Это обусловлено величиной и характером изменения пористости по сечению окатышей, изготовленных по технологиям ЗОН и ЗНД (рис. 4, б). При этом зависимость σ от $\theta_{ок}$ показывает почти линейное убывание термонапряжений с ростом общей пористости (рис. 5).

Расчеты предполагали, что технология напыления шихты направлена на снижение пористости окатыша в зародыше (ЗНД) или в его оболочке (ЗОН). Поэтому увеличение доли напыленной массы при использовании технологий ЗНД и ЗОН повышает общую пористость окатышей (рис. 4, б, 5). Согласно этому величина термических напряжений будет в общем случае уменьшаться: для окатышей, полученных по технологии ЗНД, от 160 до 100 МПа при росте η от нуля до 1, а для окатышей, полученных по технологии ЗОН, с уменьшением η от 1 до нуля.

Снижение σ до 50 МПа можно обеспечить при $\theta_{об} = 0,5$. Причем при использовании технологии ЗО пористость окатышей всегда ниже. Зависимость суммарных термонапряжений от общей пористости показывает уменьшение их значений для окатышей, полученных по любой технологии (рис. 5).

Полиномиальные уравнения зависимостей $\sigma - \theta_{ок}$ для окатышей, полученных по технологиям ЗО, ЗНД и ЗОН, представлены ниже:

$$\sigma = 1254,7\theta_{ок}^3 - 989,47\theta_{ок}^2 - 142,12\theta_{ок} + 213,38;$$

$$\sigma = -9,5715\theta_{ок}^3 + 338,8\theta_{ок}^2 - 576,92\theta_{ок} + 256,23;$$

$$\sigma = -10,15\theta_{ок}^3 + 339,24\theta_{ок}^2 - 577,03\theta_{ок} + 256,24.$$

Возможности окатышей, полученных при использовании различных технологий, релаксировать возникающие термонапряжения можно оценить с помощью анализа прочности тела, температурного поля окатыша и интенсивности нагрева зародыша и оболочки окатыша. Учитывая связь термонапряжений с прочностью тела, можно прогнозировать, что окатыши, полученные по технологии ЗНД, способны выдержать более высокую нагрузку, поскольку пористый и менее прочный зародыш равномерно зажат плотной оболочкой. При использовании технологии ЗОН, напротив, плотный зародыш окружен более рыхлой и менее плотной оболочкой, которая теоретически способна разрушиться в большей степени даже в отсутствии термонапряжений. Этот вывод сделан в предположении того, что разрушающие или истирающие усилия действуют в первую очередь на поверхностный (оболочку) слой окатыша. При этом у окатышей, полученных по технологии ЗОН, на поверхности уровень термонапряжений существенно ниже, чем в центре, так как $\theta_{об} > \theta_{зр}$. Оболочка окатыша, полученного по технологии ЗНД, способна теоретически выдержать большие усилия, поскольку

$\theta_{об} < \theta_{зр}$. Однако в оболочке окатышей термонапряжения ($\sigma_i = 160$ МПа) существенно выше, чем в зародышевой части окатыша ($\sigma_i = 60 \div 100$ МПа) (рис. 4, а). Поэтому возможности неразрушающей релаксации термонапряжений в оболочке окатышей, полученных по технологиям ЗНД и ЗОН, примерно равноценны.

Учитывая, что температурное поле окатышей и термическая массивность зависят от пористости зародыша и оболочки окатыша, выполнили расчеты числа Био ($Bi = \alpha S / \lambda$, здесь α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); S – глубина прогрева, равная радиусу окатыша, м; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)) для окатышей, полученных по технологиям ЗНД и ЗОН.

Коэффициент теплопроводности вычисляли по выражению

$$\lambda = \lambda_0 - K\theta_{ок},$$

где $\lambda_0 = 1,73$ и $K = 2,64$ – опытные константы.

Рассчитанные значения числа Био для окатышей, полученных по технологии ЗНД (числитель) и технологии ЗОН (знаменатель) при $\alpha = 150$ Вт/(м²·К) и $S = 0,008$ м, приведены ниже.

Показатель	Значение показателя при η		
	0	0,5	1,0
λ , Вт/(м·К)	1,2/0,8	1,0/1,0	0,8/1,2
Bi	1,0/1,5	1,2/1,2	1,5/1,0

При использовании технологии ЗНД с ростом доли более пористого и менее теплопроводного зародыша термическая массивность окатыша повышается (по числу Био) с 1,0 до 1,5. При использовании технологии ЗОН вывод аналогичный: с увеличением доли напыленной массы (η уменьшается с 1,0 до нуля) термическая массивность пористой сферы также возрастает. Вопрос о том, в какой части окатыша – в центре или на поверхности – должна быть более высокая интенсивность нагрева, является оценочным. Если учесть значительную температурную разность по сечению окатыша, то более высокую интенсивность нагрева целесообразно формировать в центральной части окатыша, где $t_{зр} < t_{об}$. Этому условию удовлетворяют окатыши, полученные по технологии ЗНД, в которых $\eta > 0,5$.

Силы, ответственные за термонапряженное состояние окатышей, можно сравнить с капиллярными силами, действующими на частицы в ходе термической обработки. Величина этих сил зависит от влажности материала; если окатыши имеют остаточную влажность (что теоретически возможно для центральных (зародышевых) слоев окатышей, полученных по технологиям ЗОН и ЗО), то это может осложнить термонапряженное состояние пористого тела [3]. Для сравнения термических напряжений с напряжениями Лапласа рассчитывали среднеквадратичные сдвиговые напряжения, вы-

зываются в пористом шаре капиллярными силами, по выражению [1]

$$\sigma_i^n = \frac{4,5\gamma_n\theta_{ок}^{0,5}}{r_o}, \quad (6.8)$$

где γ_n – поверхностная энергия, Дж/м²; r_o – средний размер частиц, м.

Величина σ_i^n для окатышей, изготовленных из качканарского железорудного концентрата ($\gamma_n = 1,01$ Дж/м² [16], $\theta = 0,30$ и $r_o = 0,074$ мм), равна 0,33 МПа. Прочность на сжатие полностью сухих железорудных образцов, полученных по технологиям ЗНД, ЗОН, ЗОНД, не превышает 0,8 – 1,0 МПа (прочность окатышей для этой нагрузки составляет 40 – 50 Н/окат.). По характеру действия σ_i^n являются контактными напряжениями, развивающимися в железорудном окатыше за счет межчастичных сил взаимодействия, которые обеспечивают прочность окатышей перед спеканием.

Расчет σ для окатышей, нагреваемых от температур конца сушки (500 °С) до температур подогрева и обжига (1000, 1100, 1200 и 1300 °С), приведенный на рис. 2 – 5, показал, что величина σ в начале нагрева ($Fo = 0,1$) на оси шара для $Bi = 1,0$ многократно превышает значение σ_i^n . Причем железорудные окатыши не разрушаются в ходе интенсивного нагрева, о чем свидетельствуют как модельные эксперименты [3], так и промышленные исследования [8 – 10], указывающие на допустимость обжига окатышей с высокой скоростью нагрева в начальной стадии спекания.

В интервале температур от конца сушки (450 – 500 °С) до температур начала спекания (850 – 920 °С) прочность окатыша обеспечивается слабыми коагуляционными силами и силами межчастичного взаимодействия [3, 16]. Поскольку частицы пористого объема произвольно расположены в пространстве, то усилия от термонапряжений могут быть приложены не обязательно по нормали к поверхности, проходящей через центр тяжести частицы, а в произвольной точке. В результате этого создается момент сил, способный повернуть частицу на определенный угол. При достижении определенного энергетического уровня системы в контактах частиц начинается пластическое течение вещества и образование расплава, в результате чего создаются условия для релаксации термических напряжений и активированного скольжения частиц по поверхности друг друга. Микродеформация межчастичных контактов приводит к релаксации термонапряжений, но частицы не выходят из зоны действия сил механического взаимодействия σ_i^n и нарушения межчастичных связей не происходит. Результатом приложения сил от действующих термонапряжений является активно проходящая усадка и уплотнение железорудных окатышей в период нагрева. При дальнейшем нагреве термонапряжения

способны усилить пластическую деформацию перегретых межчастичных контактов и изменить структуру поверхности частиц, повышая ее дефектность и искаженность, что еще в большей степени удаляет порошковую систему от термодинамического равновесия.

Выводы. Выполнена сравнительная оценка термических напряжений, возникающих в объеме нагреваемых окатышей с дифференцированной пористостью по сечению, разработаны рекомендации по совершенствованию теплового режима обжига окатышей. В результате анализа температурного поля и термонапряженного состояния окатыша в зародыше и оболочке сделан вывод о предпочтении использования окатышей, полученных по технологии ЗНД, в структуре которых сформирован пористый зародыш с $\eta > 0,5$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ярошенко Ю.Г., Павловец В.М., Трофимов Н.И. и др. Термонапряженное состояние железорудных окатышей в начальной стадии спекания // Изв. вуз. Черная металлургия. 1987. № 10. С. 102 – 105.
2. Меламуд С.Г., Юрьев Б.П. Методика расчета напряжений в обожженных железорудных окатышах при их охлаждении // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. № 12. С. 10 – 15.
3. Павловец В.М. Окатыши в технологии экстракции металлов из руд. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2014. – 345 с.
4. Павловец В.М. Принципы организации принудительного зародышеобразования в холостой зоне тарельчатого окомкователя // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 4. С. 3 – 6.
5. Павловец В.М. Исследование теплосиловых режимов напыления влажной шихты, предназначенных для принудительного зародышеобразования // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 6. С. 9 – 13.
6. Павловец В.М. Исследование процесса получения влажных окатышей с использованием принудительного зародышеобразования // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 6. С. 15 – 20.
7. Физико-химические и теплотехнические основы производства железорудных окатышей / В.М. Абзалов, Горбачев В.А., Евстюгин С.Н. и др. – Екатеринбург: НПВП «ТОРЕКС», 2012. – 340 с.
8. Интенсификация производства и улучшение качества окатышей / Ю.С. Юсфин, Н.Ф. Пашков, Л.К. Антоненко и др. – М.: Металлургия, 1994. – 240 с.
9. Ручкин И.Е. Производство железорудных окатышей. – М.: Металлургия, 1976. – 184 с.
10. Маерчак Ш. Производство окатышей. – М.: Металлургия, 1982. – 232 с.
11. Боли Э., Уэйнер Д. Теория температурных напряжений. – М.: Мир, 1964. – 518 с.
12. Мельникова И.В. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. – М.: Недра, 1975. – 279 с.
13. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
14. Тучинский Л.И. Пластическая релаксация термических напряжений в неизоотермических условиях // Порошковая металлургия. 1982. № 11. С. 24 – 29.
15. Скороход В.В. Условия пластичности пористых тел // Порошковая металлургия. 1978. № 11. С. 83 – 87.
16. Урусов В.С. Энергетическая кристаллохимия. – М.: Наука, 1975. – 335 с.

Поступила 15 марта 2016 г.

COMPARATIVE EVALUATION OF THERMAL STRESSES IN THE CAPACITY OF IRON-ORE PELLETS WITH DIFFERENTIATED POROSITY

V.M. Pavlovets, A.V. Gerasimuk

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract. The article presents the comparative evaluation of thermal stresses in the capacity of iron-ore pellets with differentiated porosity. Thermostressed state of pellets, derived from the use of thermal power wet charge heat-spraying technology for charge skull and palletized materials has been analyzed. The influence of porosity, thermal pellets massiveness on the magnitude and nature of the thermal stresses changes along the cross section of the pellets has been set. The authors have evaluated the nature of changes in the strength of the pellets with differentiated porosity along its cross section, with the dynamics of the temperature field of the porous spheres and criteria of massive heat in the nucleus and pellet shells. The analysis of the role of thermal stress to activate the sintering of iron-ore pellets has been conducted to propose recommendations for improving the thermal conditions of pellets burning. On the basis of this analysis the authors have concluded that a more favorable pore structure of pellets is produced by forced nucleation technology, in the capacity of which the nucleus with high porosity is formed.

Keywords: thermostressed state, differentiated porosity, nature of strength change, temperature field of porous spheres, heating intensity, criteria, forced nucleation, spraying of wet charge, nucleus, cover, iron-ore pellets.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-8-536-542

REFERENCES

1. Yaroshenko Yu.G., Pavlovets V.M., Trofimov N.I., Shvydkii V.S., Lobanov V.I., Maizel' S.G. Thermostressed state of iron-ore pellets in the initial stage of sintering. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1987, no. 10, pp. 102–105. (In Russ.).
2. Melamud S.G., Yur'ev B.P. Calculation methods of tensions in burnt iron-ore pellets at their cooling. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, no. 12, pp. 10–15. (In Russ.).
3. Pavlovets V.M. *Okatyshi v tekhnologii ekstraksii metallov iz rud* [Pellets in the technology of metal extraction from ores]. Novokuznetsk: Izd. tsentr SibGIU, 2014, 345 p. (In Russ.).
4. Pavlovets V.M. Organization principals of forced nucleation in an empty zone of pelletizing disk. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2009, no. 4, pp. 3–6. (In Russ.).
5. Pavlovets V.M. Research of heat-force regimes of wet charge spraying intended for forced nucleation. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2009, no. 6, pp. 9–13. (In Russ.).
6. Pavlovets V.M. Study of the receiving process of wet pellets with the use of forced nucleation. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 6, pp. 15–20. (In Russ.).
7. Abzalov V.M., Gorbachev V.A., Evstyugin S.N., Klein V.I., Leont'ev L.I. *Fiziko-tekhnicheskie i teplotekhnicheskie osnovy proizvodstva zhelezorudnykh okatyshei* [Applied-physics and heat engineering of iron-ore pellet production basis]. Ekaterinburg: NPVP "TOREKS", 2012, 340 p. (In Russ.).
8. Yusfin Yu.S., Pashkov N.F., Antonenko L.K., Zhak R.M., Maizel' G.M., Bazilevich T.N. *Intensifikatsiya proizvodstva i uluchshenie kachestva okatyshei* [Intensification of production and the improvement of pellets quality]. Moscow: Metallurgiya, 1994, 240 p. (In Russ.).
9. Ruchkin I.E. *Proizvodstvo zhelezorudnykh okatyshei* [Iron-ore pellets production]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 184 p. (In Russ.).
10. Maerchak Sh. *Proizvodstvo okatyshei* [Pellets production]. Moscow: Metallurgiya, 1982, 232 p. (In Russ.).
11. Boley Bruno A., Weiner Jerome H. *Theory of Thermal Stresses*. New York: John Wiley & Sons, 1960. (Russ.ed.: Boley B., Weiner J. *Teoriya temperaturnykh napryazhenii*. Moscow: Mir, 1964, 517 p.).
12. Mel'nikova I.V. *Spravochnik (kadastr) fizicheskikh svoystv gornykh porod* [Reference book (cadaster) of physical properties of rocks]. Moscow: Nedra, 1975, 279 p. (In Russ.).
13. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of heat conductivity]. Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 599 p. (In Russ.).
14. Tuchinskii L.I. Plastic relaxation of thermal stresses in nonisothermal conditions. *Poroshkovaya metallurgiya*. 1982, no. 11, pp. 24–29. (In Russ.).
15. Skorokhod V.V. Plasticity conditions of porous bodies. *Poroshkovaya metallurgiya*. 1978, no. 11, 83–87. (In Russ.).
16. Urusov V.S. *Energeticheskaya kristalokhimiya* [Power crystal chemistry]. Moscow: Nauka, 1975, 335 p. (In Russ.).

Information about the authors:

V.M. Pavlovets, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Thermal Power and Ecology" (pavlovets.victormix@yandex.ru)
A.V. Gerasimuk, Postgraduate of the Chair of Electrical Engineering (heavymetal7200@gmail.com)

Received 15 March, 2016